

Topi Koskinen

**RIPASEINÄRAKENTEEN
KANTAVUUS- JA
JÄYKKYYSOMINAISUUDET
TILAELEMENTTIKERROSTALOSSA**

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: Sami Pajunen ja
Mikko Malaska
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Topi Koskinen: Ripaseinärakenteen kantavuus- ja jäykkyysominaisuudet tilaelementtikerrostalossa
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Toukokuu 2021

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutkia ja vertailla uudenlaisia puusta valmistettavia kantavia seinärakenteita, joiden avulla voidaan valmistaa vähintään kahdeksan kerroksinen tilaelementtirakenteinen puukerrostalo. Työssä keskityttiin ehjiin seinäelementteihin, jotka osallistuvat rakennuksen jäykistämiseen. Seinärakenteita tutkittiin laskennallisesti FEM-ohjelmalla ja analyytisesti yksinkertaistetulla laskentamallilla. Työ tehtiin yhteistyössä Lehto Group Oyj:n sekä Insinööritoimisto Mäkeläisen kanssa ja ohjaajana toimi Insinööritoimisto Mäkeläisen yksikön johtaja Jarkko Luntta. Koulun puolesta työn ohjasivat ja tarkastivat professorit Sami Pajunen ja Mikko Malaska.

Työssä tarkasteltavaksi valittiin neljä erilaista seinärakennetta, joissa tärkeää oli huomioida Lehto Components Oy:n tilaelementit, seinien käyttö ja toiminta tilaelementtikerrostaloissa sekä kustannustehokas valmistaminen tehdasolosuhteissa. Seinärakenteet muodostuivat LVL-levystä sekä -rivoista, jotka kiinnitettiin toisiinsa joko ruuvaamalla tai liimaamalla. LVL-levynä käytettiin joko 21 mm tai 39 mm paksuista LVL-X –levyä ja rivoissa materiaalina toimi LVL-S. Kantavan rakenteen kokonaispaksuus sai olla maksimissaan 123 mm. Levyjen paksuudet määräytyivät rakennusfysikaalisen toimivuuden perusteella. Rakennusfysikaalisten laskelmien mukaan jopa 21 mm LVL-levyllä voitiin korvata höyrynsulkukalvo, kunhan rakenteen ulkopinnassa käytettiin tuulensuojakerroksena 9 mm kipsikartonkilevyä ja 30 mm mineraalivillalevyä. Seinän ulkopinnassa oli käytettävä lämmönvastukseltaan vähintään 0,5 m²K/W sekä hyvin kosteutta läpäisevää tuulensuojakerrosta.

Rakenteiden toimivuutta tutkittiin Lehto Components Oy:lta saadun esimerkkikohteen avulla. Ripaseinärakenteista selvitettiin taivutusjäykkyudet, puristusjäykkyys, vahvemman suunnan nurjahduskestävyys, leikkausvoimakestävyys sekä levyn ja rivan liitoksessa vaikuttava leikkausvoimaresultantikestävyys. Lisäksi esimerkkikohteen avulla tutkittiin rakennuksen jäykistämistä sekä liitoksissa syntyviä puristus- ja ankkurointivoimia. Laskelmien perusteella mitoittavaksi ominaisuudeksi seinärakenteille saatiin vahvemman suunnan nurjahduskestävyys. Tämän lisäksi x-suunnan taivutusjäykkyys oli oleellinen tekijä, joka vaikutti rakennuksen jäykistämiseen. Näiden lisäksi työssä tutkittiin kahdeksan kerroksisen tilaelementtikerrostalon paloteknisiä asioita ja seinärakenteen palotilanteen kuormien kestävyttä. Palon kannalta oleellista oli se, että seinän tulisi kestää 90 minuutin paloa, mikä mahdollistaisi sen, että suojaverhoamatonta katto- ja seinäpintaa palo-osastoittain hyväksyttäisiin jopa 80 %. Palomitoituksen perusteella vaadittava palonkesto saataisiin, mikäli 39 mm LVL-levyn päällä käytettäisiin kahta F-tyyppin palokipsilevyä. Huomioitavaa palomitoituksessa oli ripajako, joka osoittautui mitoittavaksi tekijäksi seinän kestävyttä tarkasteltaessa.

Tulosten perusteella parhaaksi rakenteeksi valikoitui rakenne, jossa käytetään 39 mm LVL-X –levyä sekä 85 * 51 mm LVL-S –ripoja, jotka kiinnitettiin toisiinsa liimaamalla. Palomitoituksen, jäykistyksen ja esimerkkirakennuksessa syntyvien kuormien perusteella tämä oli myös ainoa toimiva rakenne kokonaisuutta tutkittaessa. Ankkurointi- ja puristusvoimalaskelmista selvisi, että esimerkkirakennukseen syntyvien vaakakuormien ja kevyiden rakenteiden johdosta ankkurointivoimia ei synny ehjän seinän kohdalla, vaan seinäelementin kummassakin päässä vaikuttaa puristusvoima.

Avainsanat: puukerrostalo, tilaelementtikerrostalo, tilaelementti, seinäelementti, LVL, kantavuus, jäykistys, ripaseinä.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Topi Koskinen: Load bearing and stiffness capacity of timber ribwall structure in modular multi-storey apartment building construction
Master of Science Thesis
Tampere University
Civil Engineering
May 2021

This Master of Science Thesis examines and compares new load bearing wall structures which are made of timber and can be used to build at least eight storeys high modular apartment building. This research concentrates on the wall elements which participate in stiffening of the building. The wall structures were investigated analytically with simplified calculation and FEM-Design. This thesis was completed in cooperation with Lehto Group Oy and Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy. As the supervisor of the thesis was unit Director Jarkko Lunta from Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy. On behalf of the university, research was directed and checked by professors Sami Pajunen and Mikko Malaska.

In this thesis four different wall structures were chosen to a closer examination and pay attention both modular elements of Lehto Components Oy and functionality with modular construction. It was found important to take notice of cost-efficient factory conditions too. The ribwall structure consists of LVL-X panel and LVL-S ribs, which are fastened together by either screws or adhesives. LVL panel was either 21 mm or 39 mm thick LVL-X panel and the material used for the ribs were LVL-S. However the total thickness of the supporting structure was not allowed to exceed 123 mm. The thickness of the panel was determined by the functionality of building physics. According to building physics calculation even 21 mm LVL panel can be used to replace the vapour barrier when 9 mm of gypsum board and 30 mm mineral fibre panel used as a shelter for the wind layer on the outer surface of the structure. The wall required at the minimum 0,5 m²K/W thermal conductivity wind protection which has a good humidity permeability.

The functionality of the structures was researched with the help from the example received from Lehto Components Oy. Bending stiffnesses, compression stiffness, buckling stiffness of the stronger direction, shear stiffness and shear resultant affecting the joint of a panel and ribs were researched from the ribwall structure. Furthermore, the stiffening of the building, compressive forces and anchorage powers created in the joints were examine with the help of the target from the example. Based on the calculations the buckling stiffness of the stronger direction was the defining factor on the ribwall elements. In addition, the stiffness of the direction x was an essential factor which affected the bending stiffening of the building. In this thesis, the fire technical matters of eight storey modular apartment building and the resistance of the loads of the fire situation on the wall structure had to be additionally researched. It is essential to have walls withstand fire for up to 90 minutes as it would allow 80 % of non-cladded ceiling and wall surface to each fire compartment. Based on the fire calculations the required fire resistance would be obtained if 39 mm LVL panel was covered with two F type fire gypsum boards. In conclusion the ribs spacing was proven to be a defining factor when the strength of the wall was examined.

Based on the research the structure where 39 mm panel and 85*51 mm ribs affixed together by adhesive was discovered to be the most optimal structure. Moreover this structure was identified to be the only functional structure based on the information provided by the example modular apartment building. Based on the calculations of the anchorage power and compressive force it was clear that due to the scale loads created to the example apartment building and due to light structures the anchorage power was not created to the wall rather the compressive force affects both ends of the wall.

Keywords: timber building, modular apartment building, modular element, ribwall element, load bearing, stiffening, ribwall

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty yhteistyössä Lehto Group Oyj:n sekä Insinööritoimisto Mäkeläisen kanssa. Suurin kiitos molemmille yrityksille työn toteutuksen mahdollistamisesta. Työ oli itselleni hyvin mieluisa ja mielenkiintoinen ja rakennusalalla hyvinkin ajankohtainen. Tahtoisin kiittää Insinööritoimisto Mäkeläisen väkeä tärkeästä tuesta ja avusta työn toteutuksessa. Suuri kiitos myös Lehto Asunnot Oy:n Ville-Matti Vänttilälle sekä Strusoft Finlandin Joni Hytöselle mukavasta yhteistyöstä. Lisäksi haluaisin kiittää Tampereen yliopiston professori Sami Pajusta, ohjauksesta työn kirjoittamisen suhteen.

Erytiskiitokset haluan antaa työni ohjaajalle Jarkko Luntalle, joka puurakennesuunnittelun kovana ammattilaisena osasi neuvoa ja auttaa laajasti työn toteutuksessa. Ilman Luntan laajaa osaamista ja ammattitaitoista neuvontaa en olisi koskaan päässyt samantylaiseen lopputulokseen. Lopuksi tahtoisin kiittää perhettäni tuesta ja arvostuksesta tutkintoani kohtaan ja kannustamisesta sen viemisestä loppuun saakka.

Tampereella, 28.5.2021

Topi Koskinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tausta	1
1.2 Tavoitteet.....	2
1.3 Rajaukset	3
2. MENETELMÄT JA AINEISTO	4
2.1 Rakenteen analysointi	4
2.2 Haastattelut	4
3. PUUMATERIAALIT JA -RAKENTEET	5
3.1 Sahatavara	5
3.2 LVL	5
3.3 Kerto-Ripa	8
4. TILAELEMENTTI	10
4.1 Tilaelementtitekniikka	10
4.2 Tilaelementtirakentamisen hyödyt.....	11
4.3 Tilaelementtirakentamisen haasteet.....	12
4.4 Tilaelementtirakentaminen esimerkkikohteissa	13
4.5 Tilaelementtien kantavuus.....	14
4.6 Tilaelementtien jäykistysjärjestelmät	14
4.7 Lehto Components Oy:n tilaelementit	17
5. PALONKESTO PUUKERROSTALOSSA	19
5.1 Paloluokat, luokkavaatimukset ja luokitukset	19
5.2 Sprinklaus puukerrostalossa	20
5.3 Suojaverhous	21
5.4 Leviämisen estäminen.....	21
5.5 Uloskäytävät.....	22
5.6 Julkisivut.....	23
5.7 Varatiet.....	24
6. RIPASEINÄRAKENTEEN OMINAISUUDET	25
6.1 Ripaseinärakenteen hyödyt.....	25
6.2 Vertailu CLT- ja rankarunkoon	28
6.3 Toiminta onnettomuusrajatilassa.....	30
7. RIPASEINÄ-KOERAKENTEET	34
7.1 Rakenne 1 ja 2	34
7.2 Rakenne 3 ja 4	35
8. RIPASEINÄRAKENTEEN ANALYYTTINEN TARKASTELU	36

8.1	Jäykkyysominaisuudet	36
8.1.1	Taivutusjäykkyys y-suunnassa	36
8.1.2	Taivutusjäykkyys x-suunnassa	38
8.2	Nurjahduskestävyys	40
8.3	Leikkausvoimakestävyys	43
8.4	Leikkausvoimaresultanttikestävyys liitospinnassa	44
8.5	Palomitoitus	46
8.5.1	Seinän palomitoitus	47
8.5.2	Materiaaliominaisuudet palotilanteessa	48
8.5.3	Nurjahduskestävyys palotilanteessa	49
9.	RIPASEINÄRAKENTEEN FEM-ANALYYSI	51
9.1	Puristus- ja taivutusjäykkyys	52
9.2	FEM-Design vastaan analyttinen laskenta	55
10.	ESIMERKKIRAKENNUS	58
10.1	Rakennetyypit	58
10.2	Tilaratkaisut	61
10.3	Liitostekniikka	62
10.4	Pystykuormamitoitus	64
10.5	Vaakakuormamitoitus	68
10.6	Jäykistysmitoitus	70
10.7	Ankkurointi- ja puristusvoima	72
11.	TULOKSET	74
11.1	Jäykkyysominaisuudet	74
11.2	Normaalivoima- ja leikkauskestävyys	75
11.3	Palomitoitus	78
11.4	Valittu rakenne	79
11.5	Jäykistys ja ankkurointi	80
12.	YHTEENVETO	83
	LÄHTEET	86
	LIITE 1: RAKENTEIDEN MITOITUS	89
	LIITE 2: PALOMITOITUS	114
	LIITE 3: KUORMITUKSET JA JÄYKISTYS	116
	LIITE 4: LVL-LEVYN RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMIVUUS	132

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Rankajäkysteinen massiivipuulevyrakenne (Puuinfo, Rakenteet).....</i>	<i>2</i>
Kuva 2.	<i>Kertotuotteita (Metsä Wood 2015).</i>	<i>7</i>
Kuva 3.	<i>Kerto-Ripa-elementin kantavat rakenteet (Metsä Wood 2020).</i>	<i>8</i>
Kuva 4.	<i>Tilaelementtitekniikka (Puuinfo, Runkojärjestelmät).....</i>	<i>10</i>
Kuva 5.	<i>Tukireaktiot vaakarakenteissa. (Luntta 2013, s.20).....</i>	<i>15</i>
Kuva 6.	<i>T-poikkileikkaus.....</i>	<i>27</i>
Kuva 7.	<i>Vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti (Lahtela 2018).....</i>	<i>32</i>
Kuva 8.	<i>Rakennevaihtoehdot 1 ja 2.....</i>	<i>34</i>
Kuva 9.	<i>Rakennevaihtoehdot 3 ja 4.....</i>	<i>35</i>
Kuva 10.	<i>Testirakenteen koordinaatisto.</i>	<i>36</i>
Kuva 11.	<i>Todellinen- ja tehollinen poikkileikkaus.</i>	<i>40</i>
Kuva 12.	<i>FEM-Design taivutusjäykkyys.</i>	<i>53</i>
Kuva 13.	<i>FEM-Design puristusjäykkyys.</i>	<i>54</i>
Kuva 14.	<i>Normaalijännitys jakauma rakenteissa, kun levypintaan vaikuttaa tasaisesti jakautunut vaakavoima.....</i>	<i>56</i>
Kuva 15.	<i>Esimerkkirakennuksen pohjakuva.....</i>	<i>58</i>
Kuva 16.	<i>Ulkoseinän rakennetyyppi, jossa kantava riparunko sisäpuolella.</i>	<i>59</i>
Kuva 17.	<i>Väliseinän rakennetyyppi, jossa kantava riparunko sisäpuolella.....</i>	<i>59</i>
Kuva 18.	<i>Välipohjan rakennetyyppi</i>	<i>60</i>
Kuva 19.	<i>Yläpohjan rakennetyyppi.....</i>	<i>60</i>
Kuva 20.	<i>Alapohjan rakennetyyppi.....</i>	<i>61</i>
Kuva 21.	<i>Esimerkkirakennuksen tilaelementtien tilaratkaisut.....</i>	<i>62</i>
Kuva 22.	<i>Päällekkäisten tilaelementtien kiinnityspeeriaate.</i>	<i>63</i>
Kuva 23.	<i>Vierekkäisten tilaelementtien kiinnityspeeriaate.....</i>	<i>64</i>
Kuva 24.	<i>Ankkurointi- ja puristusvoiman laskenta.....</i>	<i>73</i>

1. JOHDANTO

1.1 Tausta

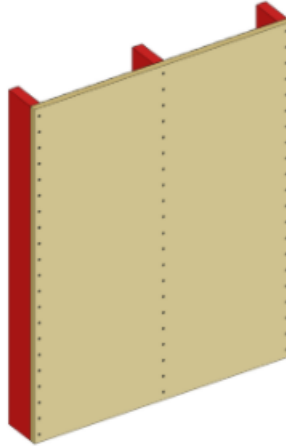
Puukerrostaloasuminen on nostanut suosiotaan merkittävästi viime vuosina, joka johtuu pitkälti puurakentamiseen liittyvistä suurista teemoista, jotka ovat ekologisuus, tyylikkyys ja kotimaisuus. Puukerrostalojen yleistymistä hidastava tekijä Suomessa on ollut puurakentamisen kilpailukyky kustannusmielessä. Aiemmin betonielementtejä käyttämällä rakentaminen oli nopeampaa ja edullisempaa. Uusien teollisten tuotantomenetelmien vuoksi puukerrostalorakentamisen suosio on kuitenkin kasvussa. Puurakentaminen on yhä suosittuempaa ja asiaa halutaan edistää myös poliittisesti. Nykyisellä hallituksella on tavoitteena kaksinkertaistaa puun käyttö rakentamisessa vuoteen 2022 mennessä. (Kimpimäki 2019; Puulehti 1/2020, s. 5)

Puurakentamisen vahva nousu näkyy laajasti myös maailmalla. Aiemmin korkeat puurakennuskohteet olivat vain haaveita mutta nykyisin niistä useat ovat toteutuneet ja lisää tulee vuosittain. Toistaiseksi maailman korkein kokonaan puusta rakennettu rakennus on Norjassa sijaitseva 18-kerroksinen Mjostårnet-hotelli. (Puulehti 2/2020, s. 56)

Puuta käytettäessä runko- ja jäykistysjärjestelmälle on paljon erilaisia vaihtoehtoja. Yhteistä puukerrostalon runkojärjestelmillä on usein hyvin pitkälle suunniteltu teollinen esivalmistus tehtaissa ja nopea rakentaminen suojattuna säältä. Suomessa on yleisesti käytössä neljä erilaista runkojärjestelmää puukerrostaloille: rankarunko-, massiivipuulevy-, tilaelementti- sekä pilari-palkkijärjestelmä. (Puuinfo 2020, Runkojärjestelmät)

Ranka- sekä massiivipuulevyrunko ovat rakennusjärjestelmiä, joissa seinät ovat kantavia ja kerroskohtaisia, jotka välittävät pystykuormat perustuksille. Rungon seinien ollessa kantavia käytetään seiniä usein myös rakennuksen jäykistävinä rakennusosina. Pystykuormien ja jäykistämisen takia seinien tulee sijaita samalla kohdalla eri kerroksissa. Rankarungossa seinien jäykistys hoidetaan usein rankarungon levytyksillä, joiden avulla tuetaan myös rankojen poikkileikkauksen heikomman suunnan nurjahdus ja kiepahdus. Massiivipuulevyrunгон levyt ovat usein niin jäykkiä ja lujia, että ne hoitavat itse riittävän jäykistyksen. Ranka- ja massiivipuulevyrunkojen kantokykyä rajoittavat yleisimmin tukipaine- sekä nurjahduskestävyys. (Puuinfo 2020, Rakenteet)

Ohuen massiivipuulevyn nurjahduskestävyyttä voidaan suurentaa jäykistämällä se rangoilla. Tavassa tulee huomioida, että rangat tulee saada toimimaan liittorakenteena levyn kanssa. Riittävä lujuus ja jäykkyys rakenteeseen saadaan yhdistämällä levy ja rangat joko liimalla tai ruuvaamalla. Kuvassa 1 on esitettyä massiivipuulevy rakenne, joka on jäykistetty rangoilla. (Puuinfo 2020, Rakenteet)



Kuva 1. Rankajäykisteinen massiivipuulevy rakenne (Puuinfo, Rakenteet).

Puukerrostalon runkojärjestelmänä voi olla myös pilari-palkkijärjestelmä. Silloin rakennuksen runko tehdään viilupuisista palkeista ja pilareista. Tällä järjestelmällä voidaan saada avoin, muuntojoustava ja suuria aukkoja sisältävä pohjaratkaisu. Pilari-palkkijärjestelmän pystyrakenteet ovat painumattomia ja nopeita pystyttää työmaalla. (Puuinfo 2020, Rakenteet)

Viime vuosina on yleistynyt nopeasti myös tilaelementtitekniikka, jossa rakennus tehdään tehtaalla valmiiksi kootuista tilayksiköistä. Tilaelementti sisältää usein kantavat seinärakenteet sekä rajaavat pinnat. Tilaelementit valmistetaan kokonaan tehdasolosuhteissa ja kantava rakenne voidaan toteuttaa kaikilla edellä mainituilla runkojärjestelmillä. (Puuinfo 2020, Rakenteet)

1.2 Tavoitteet

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on kehitellä puukerrostalolle uudenlainen seinien rakennejärjestelmä, jolla on mahdollista päästä vähintään kahdeksan kerroksisiin puukerrostaloihin. Aiemmin näin korkeiden puukerrostalojen jäykistys- ja kantavuusongelmat on usein hoidettu käyttämällä paksuja CLT- tai LVL-levyjä. Tarkoituksena on löytää ratkaisu, jossa päästään eroon kallista ja paksuista massiivipuulevyistä ja saataisiin riittävät ominaisuudet uudella rakennusratkaisulla hyödyntäen tilaelementtitekniikkaa. Pohjana rakenteen suunnittelulle on Metsä Woodin tuotannossa käytetyt väli- ja yläpohjien

Kerto-Ripa-rakenteet ja niiden hyvien ominaisuuksien hyödyntäminen seinärakenteessa sekä Lehto Components Oy:n vanhan tilaelementtilinjaston hyödyntäminen uuden rakenteen tuotannossa. Seuraavana on esiteltynä keskeisin tutkimuskysymys ja tavoite työlle.

- Millaisella ripaseinärakenteen rakenneratkaisulla on riittävät kantavuus- ja jäykkyysominaisuudet kantamaan vähintään kahdeksan kerroksista puurakenteista tilaelementtikerrostaloa, joka on samalla kustannustehokas sekä Lehto Components Oy:n tilaelementteihin yhteensopiva?

1.3 Rajaukset

Työtä rajataan niin, että tutkittavalla seinärakenteella halutaan päästä vähintään kahdeksaan kerrokseen tilaelementtirakenteisessa puukerrostalossa. Tarkoituksena on tutkia rakennusjärjestelmää, jossa kantavia rakenteita ovat ulko- sekä huoneistojen väliset väliseinät. Työssä tutkitaan ehjää seinää, jolloin laskuja saadaan yksinkertaistettua. Kaikki ikkunalliset ja ovelliset seinät jätetään huomioitta tässä tutkimuksessa.

Työstä rajataan pois elementtien tarkemmat liitostekniset asiat. Rakenteita suunniteltaessa on kuitenkin huomioitava liitokset, siten että ne ovat mahdollista toteuttaa käytännössä. Työtä rajaa laajasti myös se, että seinien tarkastelussa huomioidaan laajemmin vain lujuus- ja jäykkyysominaisuuksia sekä palonkestävyyttä. Lämpö-, kosteus- ja äänitekniset tarkastelut on jätetty tarkemman tarkastelun ulkopuolelle. Tärkeää on kuitenkin ottaa huomioon, että rakenne on kustannustehokas tehtaan näkökulmasta ja, että rakenne on helppo toteuttaa. Rajauksessa oleellista on myös se, että rakennejärjestelmä on yhteensopiva Lehto Components Oy:n tilaelementtien kanssa.

2. MENETELMÄT JA AINEISTO

2.1 Rakenteen analysointi

Työssä tutkittavia rakenteita tutkittiin yksinkertaistetulla analyttisellä laskennalla sekä FEM-ohjelmalla. Analyttisessä laskennassa apuna oli Suomen rakennusinsinöörien liiton julkaisut, Suomen standardisoimisliiton SFS-standardit sekä eri valmistajien omat julkaisut. Analyttisessä laskennassa apuna oli myös haastatteluissa käydyt keskustelut, joiden avulla päästiin tutkimaan rakenteita, joita ei suoraan standardeista löydy.

Analyttisen laskennan tueksi rakenteita analysoitiin myös FEM-ohjelman avulla. Laskennassa käytettiin FEM-Design –ohjelmistoa, joka on rakenteiden laskentaan ja mitoitukseen tarkoitettu pohjoismainen ohjelmisto. FEM-Designin avulla päästiin tutkimaan valittuja puuseinärakenteita normien mukaisten mitoitustyökalujen avulla. FEM-Designissa käytettiin sen pääkäyttöliittymää 3D structure, jossa on mukana standardien analyysityyppikohtaiset jäykkyydet puulle. Käyttöliittymän avulla saatiin vertailukelpoista ja työn lopputuloksen kannalta tärkeää tutkimusmateriaalia eri rakenteista. (Strusoft 2021)

2.2 Haastattelut

Lehto Componentsin tilaelementtejä ja niiden mitoitusta varten haastateltavana oli Lehto Asuntojen suunnittelupäällikkö Ville-Matti Vänntilä. Vänntilältä saatiin työn kannalta tärkeää tietoa Lehto Components Oy:n tilaelementtien suunnittelusta sekä toteutuksesta. (Vänntilä 2021) Lisäksi haastateltavana oli Insinööritoimisto Mäkeläisen yksikön johtaja sekä työnohjaajana toiminut Jarkko Luntta. Luntalta saatiin ohjausta puurakenteiden mitoitukseen sekä seinärakenteen rakenneanalyysiin. (Luntta 2021)

FEM-Designia varten haastateltavana oli Strusoft Finlandin asiantuntija Joni Hytönen. Haastatteluiden avulla selvitettiin FEM-Designin toimintaa ja saatiin tärkeää rakenneanalyysia seinien toiminnasta. Hytösen kanssa käytyjen haastatteluiden aikana käytiin läpi myös yleisesti FEM-Designin käyttöä ja tärkeitä huomioitavia asioita mallinnettaessa rakenteita. (Hytönen 2021)

Lisäksi eri materiaalivalmistajista haastateltiin CLT-valmistaja Oy Crosslam Kuhmo Ltd:n myyntijohtajaa sekä Puumerkki Oy:n LVL tuotepäällikköä, jotta saatiin tietoa eri materiaalien kustannuksista. Kustannustietojen avulla voitiin vertailla eri rakenteita. (Manninen 2021; Räsänen 2021)

3. PUUMATERIAALIT JA -RAKENTEET

3.1 Sahatavara

Sahatavara on puusta sahattua materiaalia, joka on sahattu pituussuuntaan vähintään kahdelta sivulta. Sahatavara on tuote, jota voidaan käyttää sellaisenaan rakentamisessa tai jalosteiden raaka-aineena. Suomen sahatavarasta noin puolet on mäntyä ja puolet kuusta. Sahatavaran laatuluokan ratkaisee ulkonäkö ja siinä merkittävimpiä asioita ovat oksien koko, määrä ja sijoittuminen. Laatuluokitukseen vaikuttaa myös esimerkiksi halkeamat, vajaasärmäisyys ja värinmuutokset. (Puuinfo 2020, Sahatavara ja sen jalosteet)

Sahatavara jaotellaan lujuutensa mukaan eri luokkiin. Lujuuslajittelu tapahtuu koneellisilla lujuuslajittelumenetelmillä, joita ovat esimerkiksi konenäkömittaus ja ultraäänimittaus. Lujuuslajittelu tapahtuu standardin EN 338 mukaan, jossa lujuusluokat C14-C30 voidaan lajitella joko koneellisesti tai visuaalisesti ja luokat C35-C50 voidaan lajitella vain koneellisesti. (Puuinfo 2020, Sahatavara ja sen jalosteet)

Aiemmin Lehto Components Oy:n tilaelementtien kantavat seinät on valmistettu käyttäen C24 lujuusluokiteltua sahatavaraa rankarunkorakenteena mutta tässä työssä ominaisuuksia halutaan parantaa, joten käytetään LVL-rakenteita, jotka soveltuvat hyvin seinärakenteille. Sahatavara on usein halvempaa kuin vastaavanlainen LVL-rakenne mutta tässä työssä päädyttiin käyttämään LVL-ripoja, sillä ne toimivat hyvin yhteistyössä LVL-levyn kanssa ja materiaaliominaisuudet ovat yleisesti parempia verrattaessa sahatavaraan.

3.2 LVL

Viilupuu eli LVL (Laminated veneer Lumber) on liimaamalla sorvatuista viiluista valmistettu rakenteellinen puutuote. LVL on kevyt ja samalla hyvin luja materiaali. Kerroksellisen rakenteen ansiosta LVL on tasalaatuista, vahvaa ja mittapysyvää materiaalia, joka kestää hyvin kuormaa ja on helposti työstettävää. LVL on CE-merkittyä. CE-merkintä osoittaa, että tuote on läpäissyt vaaditut tarkistukset ja täyttää tuotetta koskevat EU:n direktiivin vaatimukset. (Puuinfo 2020, Viilupuu; Stora Enso 2020)

LVL:ää käytetään nykyisin laajasti uudis- ja korjausrakentamisessa sekä teollisessa käytössä. Viilupuuta käytetään esimerkiksi väli- ja yläpohjissa sekä kantavissa palkeissa, pilareissa ja ristikoissa. Viilupuu tehdään Suomessa liimaamalla 3 mm paksuisia kuusi- tai mäntyviiluja kiinni toisiinsa. Riippuen tuotteesta viilujen syysuunta voi olla pituus- tai pystysuuntaan. Viilut voivat olla myös liimattu ristiin. (Puuinfo 2020, Viilupuu)

LVL:n viilukerrokset liimataan toisiinsa kiinni käyttäen fenoliformaldehydihartsiliimaa. Päällimmäisessä pintaviilun viistesaumassa hyödynnetään väritöntä melamiiniformaldehydihartsiliimaa. LVL täyttää materiaalina EN 717-1 formaldehydiemissioluokituksen E1 vaatimuksen. (Stora Enso 2020)

LVL:ssä käytetty liima on säänkestävää mutta ilman pintakäsittelyä säänkestävyys on rajallinen ulko-olosuhteissa. Tästä johtuen ilman lisäkäsittelyä LVL:ää ei suositella käytettäväksi käyttöluokan kolme kohteissa. Lahottajasienet alkavat vaikuttamaan LVL:ssä, kun kosteuspitoisuus pääsee yli 20 % ja kun lämpötila on +3–40 °C. Lahotessa LVL pehmenee ja menettää lujuutensa. (Stora Enso 2020)

Viilupuupalkkien nimellinen hiiltymänopeus palotilanteessa on 0,7 mm/min ja yksidimensionaalinen hiiltymänopeus on 0,65 mm/min. LVL:n palonkestoluokka on D-s1, d0 standardin EN 13501-1 mukaisesti. Lämmönjohtavuus Stora Enson LVL-materiaalille on 0,13 W/(mK) ja ominaislämpökapasiteetti 1 800 J/(kg*K). Liekille altistettuna LVL:n syttymislämpötila on noin 270 °C mutta välittömään syttymiseen vaaditaan yli 400 °C:n lämpötila. (Puuinfo 2020, Viilupuu; Stora Enso 2020)

Viilut ovat normaalisti hiomattomia ja paikkaamattomia, mutta tilauksesta lapepinnan pintaviilut on mahdollista saada hiottuna. Viilupuuta on mahdollista saada erilaisilla pintakäsittelyillä ja esimerkiksi AB-luokan painekyllästys on mahdollinen. (Puuinfo 2020, Viilupuu)

Viilupuun suurin valmistusleveys on 2,5 metriä. Osien enimmäispituus määräytyy enimmäkseen kuljetuksen rajoitteista. Suomessa kuljetusrajoitus pituussuunnassa on 25 metriä. Kerrannaisliimaamalla voidaan LVL-levyistä valmistaa paksuja levymäisiä rakennusosia. (Puuinfo 2020, Viilupuu)

Stora Ensolla on LVL-tuotteista saatavilla kolmea erilaista laatua: S-, X- ja T-laatu. S-laatu on varsinkin palkkeihin soveltuva laatu, jossa kaikkien viilujen syysuunta on pitkittäin, jolloin materiaalin ominaisuudet paranevat syysuunnassa. Tässä tilanteessa syitä vastaan kohtisuorat ominaisuudet ovat kuitenkin heikompia. Seinälevyihin sopivin laatu on X-laatu, jossa viiluista osa liimataan ristiin, jolloin materiaalin mittapysyvyys ja ominaisuudet levy- ja laattakäytössä paranevat. X-laatu sopii erityisesti kohteisiin, joissa levyistä tehdyiltä rakenteelta vaaditaan pitkää jänneväliä. Kolmas T-laatu on parhaiten seinätolppiin soveltuva materiaali, jossa viilukerrosten syysuunta on pitkittäin. T-laadun vahvuuksia on mittatarkkuus, kieroutumattomuus sekä rakenteen jäykkyys. (Stora Enso 2020)

Metsä Woodilla LVL-tuotteita on neljää erilaista Kerto-Q, Kerto-T, Kerto-S ja Kerto-QP. Kerto-S on palkkeihin tarkoitettu materiaali, joka suuren jäykkyytensä ansiosta estää haitallisen värähtelyn pitkilläkin jänneväleillä. Kerto-Q on levymäiseksi rakenteeksi tarkoitettu materiaali, jota käytetään esimerkiksi Kerto-Ripa-elementeissä. Kerto-Q –levyssä noin viidennes viiluista on poikittainen, joka lisää poikittaista lujuutta sekä jäykkyyttä. Jäykkyytensä ansiosta hyvä tuote on myös Kerto-QP. Kerto-QP on palkkeihin tarkoitettu materiaali, joka voidaan toteuttaa hoikempana ja korkeampana kuin Kerto-S –palkit. Kerto-QP –rakenteessa on poikkiviilut, jotka luovat jäykkyyttä, joka minimoi esimerkiksi kosteuden aiheuttamaa turpoamista. Viimeinen varsinkin seiniin tarkoitettu materiaali on Kerto-T. Kerto-T:n avulla voidaan valmistaa korkeita ja suoria seiniä. Kerto-T:tä käytetään enimmäkseen pystysauvana ja siinä kaikkien viilukerrostojen syysuunta on pitkittäinen. Metsä Woodin kertotuotteita on esitetty kuvassa 2. (Metsä Wood 2015)



Kuva 2. Kertotuotteita (Metsä Wood 2015).

Tuotteita on mahdollista kosteussuojata vesiohenteisella puu-öljyllä. Kosteussuojaus saadaan toimimaan hyvin, jos se levitetään tuotteen kaikille sivuille. Kosteussuojaus on tarkoitettu kuitenkin vain tilapäiseen rakennustöiden ja varastoinnin aikaiseen suojaukseen. Ulkoilmaan jäävät LVL-rakenteet on suojattava uudelleen vuosittain. (Stora Enso 2020)

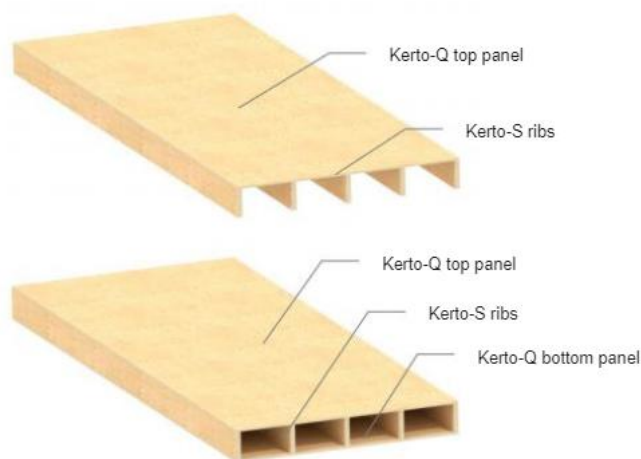
LVL on kemiallisesti melko kestävä materiaali. LVL kestää hyvin heikkoja happoja ja happamia suolaliuoksia. Suoraa kosketusta tulee silti välttää happamiin aineisiin. Emäkset aiheuttavat puun pehmenemistä. Orgaaniset nesteet ja alkoholit aiheuttavat LVL:ssä samanlaisia reaktioita kuten vesi. Veden vaikutuksesta materiaali turpoaa ja lujuusomi-

naisuudet heikkenevät hieman. Öljyillä sen sijaan ei ole suoraan vaikutusta LVL:n lujuuteen mutta ne voivat aiheuttaa materiaalissa värin muutoksia. Erilaisilla pintakäsittelyillä voidaan parantaa LVL:n kemiallista kestävyyttä eri aineita vastaan. (Stora Enso 2020)

LVL-tuotteissa tulee huomioida myös lämmöneristävyys. LVL:n lämmönjohtavuus riippuu tuotteen sen hetkisestä kosteuspitoisuudesta. Esimerkiksi suhteellisen kosteuden ollessa 47 % on LVL:n kosteuspitoisuus 9,3 %. Tällöin lämmönjohtavuusarvo LVL:lle on 0,110 W/(mK). LVL:n lämpölaajeneminen voidaan jättää huomioimatta, sillä se on hyvin vähäistä. Yleisesti kuitenkin LVL:ää voidaan käyttää 100 °C:n lämpötilassa mutta se kestää paremmin kylmyyttä kuin kuumuutta. (Stora Enso 2020)

3.3 Kerto-Ripa

Metsä Woodin puuelementtiä kutsutaan nimellä Kerto-Ripa-elementti. Elementti koostuu kantavista Kerto-S –palkeista ja Kerto-Q –levyistä, jotka liimataan kiinni toisiinsa. Kantavien rakenteiden lisäksi Kerto-Ripa-elementteihin sisältyy esimerkiksi onteloiden sisäiset villat sekä rakennetta palosuojaavat kipsilevytykset. Liimauksen ansiosta mitoituksessa voidaan käyttää Kerto-S –palkkien lisäksi sekä pohja- että pintalevyt. Kerto-Ripa-elementit ovat tarkoitettu kattoihin ja välipohjiin. Välipohjissa maksimi jänneväli on noin 10 metriä ja yläpohjissa elementtejä valmistetaan jopa 25 metrin jänneväleille. Pitkän jännevälin johdosta tarvitaan vähemmän palkkeja, pilareita ja rakenteiden liitoksia. Kuvassa 3 on esitettyä Metsä Woodin avoimen- sekä laatikkomallisen Kerto-Ripa-rakenteen kantavat rakenteet. (Metsä Wood 2020)



Kuva 3. Kerto-Ripa-elementin kantavat rakenteet (Metsä Wood 2020).

Kuvassa 3 nähdään Metsä Woodin kaksi erilaista Kerto-Ripa-rakenteen kantavaa rakennetta. Alemmassa rakenteessa on molemmissa pinnoissa Kerto-Q –levyt ja levyjen välissä Kerto-S –rivat. Ylemmässä rakenteessa on ainoastaan yläpuolen levytys. Kerto-

Ripa-elementit ovat yleisimmin 1,8 m tai 2,4 m leveitä. Kerto-Ripa-elementtien korkeus riippuu rakenteen jännevälisestä ja ripojen jakoväleistä. Ripojen jakoväleinä käytetään yleensä 400 mm tai 600 mm välejä. (Metsä Wood 2020)

Kerto-Ripa-rakenteella on paljon hyviä ominaisuuksia, jotka vaikuttavat positiivisesti niiden käytettävyyteen ja esimerkiksi runkorakenteen ja perustusten tarvittaviin lujuusominaisuuksiin. Verrattaessa betonirakenteisiin, Kerto-Ripa-rakenteessa huomio kiinnittyy varsinkin elementtien painoon. TT-betonilaatta on noin viisi kertaa painavampi kuin Kerto-Ripa-kotelolaatta ja betonilaatta on noin viisi kertaa painavampi kuin Kerto-Ripa-elementti. Kerto-Ripa-elementit nopeuttavat kohteen kokoamista ja pienentävät projektien kustannuksia. Elementtejä voidaan käyttää valmiina sisäkattopintana, lämmöneristeenä ja ulkokattona, jolloin seuraavat rakennusvaiheet voivat jatkua välittömästi kuivissa olosuhteissa. Rakennusnopeutta lisää myös elementtien nopea asennettavuus ja yksinkertaiset liitokset. (Metsä Wood 2020)

Metsä Woodin Kerto-Ripa-rakenteen paloluokka on parhaimmillaan jopa REI 90 (A1-s1.d0), kun rakennetta on palosuojattu. Rakenteiden lämpö- ja kosteuskäyttäytyminen on testattu Tampereen teknillisessä yliopistossa. Kerto-Ripa-välipohjaelementtien ääneneristävyyden on testattu sekä valvotuissa testiolosuhteissa että valmiissa rakenteessa. Testien mukaan täysin kuiva välipohjaelementti ilman pintavaluja täyttää huoneistojen välisen välipohjan vaatimukset asuinrakennuksessa. Kerto-Ripa-elementeillä on CE-merkintä sekä ETA-07/0029-hyväksyntä. (Metsä Wood 2020)

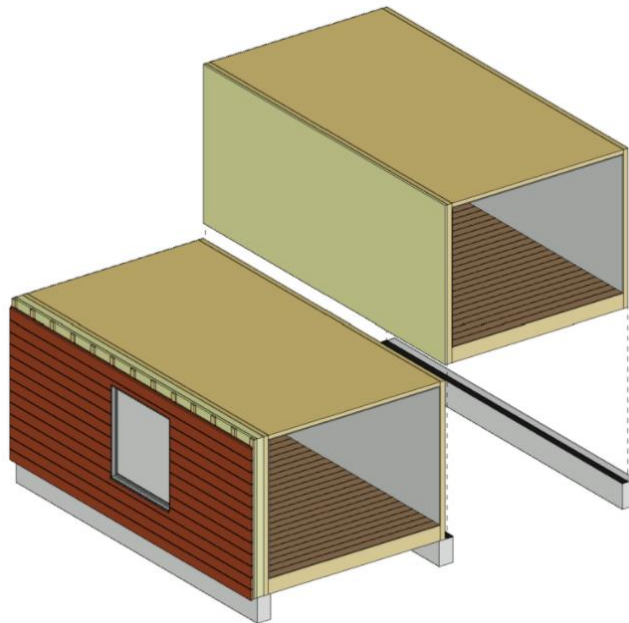
Kerto-Ripa-välipohjaelementit ovat kevyitä, äänieristettäviä ja kuivia rakenteita, jotka eivät vaadi lainkaan työmaalla tehtäviä betonivaluja. Ilman pintavaluja Kerto-ripa-rakenteen kantavat rakenteet vaativat vierelleen siihen vaadittavat pintaverhoukset, jotta rakenne saavuttaa tarvittavat ilmaääneneristävyyden ja askeläänitasovaatimukset asuinrakennuksessa. Ilman pintavaluja asennuksien kanssa on oltava kuitenkin tarkempi ja esimerkiksi korkojen tasaaminen on hankalampaa ja lattialämmitysten lisääminen rakenteeseen on monimutkaisempaa. (Metsä Wood 2020)

Kerto-Ripa-välipohjaelementin jäykkyys ja lujuus ovat suurempia kuin saman korkuisella välipohjapalkilla. Välipohjaelementti liittyy kantaviin rakenteisiin ylälaatan välityksellä, jolloin kerroskorkeus ja kustannukset pysyvät matalina. Elementit suunnitellaan rakennuksen koon mukaan ja ne voidaan suunnitella lämmöneristettyihin tai eristämättömiin kohteisiin. Lämmöneristetyssä kohteessa eristys sijoittuu elementtien ontelotilaan. Sprinkleriputkisto voidaan laittaa elementin ja ripustetun alakaton väliin. (Metsä Wood 2020)

4. TILAELEMENTTI

4.1 Tilaelementtitekniikka

Tilaelementtitekniikassa rakennus kootaan tehtaalla valmistetuista tilayksiköistä. Tilaelementit tehdään kokonaan säältä suojassa ja pinnat viimeistellään valmiiksi, jolloin työmaalla tekeminen vähentyy oleellisesti. Tilaelementti koostuu seinistä, lattiosta ja katoista ja rakenne voidaan toteuttaa kantavana usealla eri tavalla. (Puuinfo 2020, Runkojärjestelmät) Tilaelementtirakentamisessa eli modulaarisessa rakentamisessa esivalmistus on viety hyvin pitkälle, mikä tarkoittaa esimerkiksi pintamateriaalien, talotekniikan ja kiintokalusteiden asentamisen valmiiksi tehtaissa tilaelementtien sisälle. Tilaelementtitekniikassa tavoitteena tulisi olla se, että tilaelementti lähtisi tehtaalta sataprosenttisen valmiina asuttavaksi. Jokainen työmaalla tehty työvaihe on kalliimpi kuin saman työvaiheen tekeminen tehtaalla. (Sorri 2016, s. 10 ja s. 22) Kuvassa 4 on havainnekuva tilaelementtitekniikalla tehtävästä rakennuksesta. (Puuinfo 2020, Runkojärjestelmät)



Kuva 4. Tilaelementtitekniikka (Puuinfo, Runkojärjestelmät).

Tilaelementtien märkätilat voidaan toteuttaa alusta asti tehtaalla rakentaen tai valmiilla märkätilaelementillä. Valmiit märkätilaelementit voivat olla erillisen toimittajan valmistamia ja ne asennetaan tilaelementtien sisään sen kasausvaiheessa. (Sorri 2016, s. 15) Tässä työssä käytettävissä Lehdon tilaelementeissä hyödynnetään tehtaalla valmiiksi tehtyjä märkätilaelementtejä, jotka asennetaan tehtaalla valmiiksi tilaelementteihin. (Vänttilä 2021)

Alimman kerroksen toteutuksessa on yleisesti käytössä kaksi erilaista tyyliä. Alin kerros voidaan toteuttaa kokonaan betonikerroksena, jolloin se voi olla maanpäällinen tai kellarikerros. Toinen tapa on sijoittaa ensimmäiset tilaelementit suoraan sokkelin päälle, jolloin alapohja toteutetaan tuuletettuna. Tilaelementitalon huoneistot koostuvat normaalisti yhdestä tai kahdesta tilaelementistä. Akustiikan kannalta samaan tilaelementtiin ei kannata sijoittaa kahden eri asunnon tiloja. (Sorri 2016, s. 18)

Tilaelementtitekniikan lähtökohtana alusta asti on ollut kustannustehokas toteuttaminen. Toteutuksen kannalta kustannustehokkuutta saadaan lisättyä laittamalla kaikki talotekniikan pystynousut porrashuoneiden kohdalle. LVIS-hormien sijoittaminen porrashuoneeseen luo useita etuja rakennusvaiheessa: huoneistojen välipohjalävistyksen saadaan minimoitua, joka helpottaa ääni- ja paloteknisen toteutuksen, talotekniikan huoltaminen ja tarkastaminen on helpompaa, viemäreiden meluhaitat vähenevät ja talotekniset kytkennät voidaan tehdä erillisinä työvaiheena heti rungon pystyttämisen jälkeen, jolloin itse huoneistoihin ei tarvitse mennä. (Vänttilä 2021; Sorri 2016, s. 18)

4.2 Tilaelementtirakentamisen hyödyt

Tilaelementtirakentamisessa on paljon hyötyjä, joiden takia niiden käyttö on yhä suosittumpaa. Hyödyt perustuvat varsinkin työvaiheiden toteuttamiseen tehdasolosuhteissa. Tehdastuotanto ja teollinen valmistus mahdollistavat tilaelementtirakentamisessa kiinteän sääsuojan, työskentelyolosuhteiden hallittavuuden sekä ajallisesti nopeamman tuotantovaiheen verrattaessa työmaalla rakentamiseen. Jos työmaalla haluttaisiin vastaavia hyötyjä niin se aiheuttaisi lisäkustannuksia. (Sorri 2016, s. 23; Säyriö 2016, s. 43)

Yksi suurimmista eduista tilaelementtirakentamisessa on ajan säästö rakentamisprosessissa ja varsinkin työmaavaiheessa. Tehdastuotannossa työn tuottavuus on tehokasta ja työmaalle valmiiksi tehtyjen osien asentaminen on nopeaa. Kiinteä sääsuoja mahdollistaa elementtien nopean ja jatkuvan tuotannon sääolosuhteista riippumatta. (Sorri 2016, s. 23; Säyriö 2016, s. 44)

Tehdastuotanto pienentää rakennuksen aikasidonnaisia kustannuksia sekä tekee mahdolliseksi rakennuksen nopeamman käyttöönoton. Paikalla rakennettaessa seuraava työvaihe on usein sidonnainen edellisen työvaiheen kanssa mutta tehtaalla tuotettaessa rakenteiden yhtäaikainen valmistus on mahdollista, jolloin tuotantonopeus kasvaa. Tehdasolosuhteissa yksilöityjen työpisteiden käyttö eri rakenteille on mahdollista, joka mahdollistaa nopean tuotannon huomioimatta muiden työvaiheiden viivästyksiä tai sääolosuhteita. (Säyriö 2016, s. 45)

Tilaelementtirakentamisen hyötynä voidaan pitää tuotannon laatua. Tehdasolosuhteet mahdollistavat paremman laadunvalvonnan ja vakioidut työvaiheet. Näistä johtuen laatuvirheitä ja reklamaatioita syntyy vähemmän, mikä tuo säästöjä rakentamisprosessiin. (Sorri 2016, s. 23) Tehtaassa valmistus mahdollistaa työnjohtajien, -tekijöiden, rakennusmateriaalien, kalustojen ja laitteistojen sijoittamisen samaan tilaan, mikä tekee prosessista tiiviin ja helposti seurattavan. Tuotannon laatua parantaa myös se, että menetelmät ovat vakioituja esimerkiksi työturvallisuuden, työmenetelmien ja yleisten käytäntöjen osalta, mikä tekee työskentelystä helppoa. Tuotannon laadun kannalta toistuvuus on tärkeä tekijä, joka tekee rakentamisesta nopeampaa, turvallisempaa sekä taloudellisempaa. (Säyriö 2016, s. 44)

Suuri hyöty tehdasolosuhteista näkyy kosteusongelmien välttämällä. Tilaelementtien rakentaminen tapahtuu lämpimissä ja kuivissa tehdasolosuhteissa, jolloin kosteudenhallinta on helpompaa kuin ulkona rakennettaessa. (Sorri 2016, s. 23) Kuivaketjun toteutuminen rakentamisessa on huomattavasti helpompaa, kun käytössä on kiinteä sääsuoja. Paikalla rakennettaessa sääsuoja joudutaan suunnittelemaan, purkamaan ja asentamaan rakennuksen tarpeiden mukaisesti, mikä tuo paljon lisäkustannuksia. (Säyriö 2016, s. 44)

Tilaelementtirakentamisessa ekologisuutta voidaan pitää rakentamistavan hyötynä. Rakennusjätteen määrä on pienempää, kun tilaelementit voidaan valmistaa kontrolloidussa tehdastuotannossa. Tilaelementtirakentamisessa liitostekniikkaan kiinnitetään myös hyvin paljon huomiota, mikä lisää rakennuksen ekologisuutta, kun rakenteet ovat tiiviimpiä. Yleisesti myös puun käyttö rakennusmateriaalina luo ekologisuutta. (Sorri 2016, s. 23)

Tilaelementtirakentamisen hyötynä voidaan pitää myös rakenteiden hyvää purettavuutta. Liitostekniikka on mahdollista suunnitella siten, että rakennus voidaan myöhemmin purkaa ja koota uudelleen rikkomatta tilaelementtien rakenteita. Pienempi purkujätteen määrä ja rakenneosien uusiokäyttö pienentävät rakennuksen käytön aikaisia ympäristövaikutuksia. (Luntta 2021)

4.3 Tilaelementtirakentamisen haasteet

Tilaelementtien huonona puolena voidaan pitää sitä, että tilaelementtien käyttö rajoittaa tilasuunnittelua muita tekniikoita enemmän. Tilaelementtien suunnittelulla on maksimit, jotka määräytyvät Suomen tieverkostossa sallittujen maksimimittojen, välipohjan jännevälin ja nostokaluston kapasiteetin mukaan. (Laakkonen, s. 4–5) Tyypilliset enimmäismitat tilaelementeille ovat 12 * 4,2 * 3,2 metriä. Moduulijärjestelmän ja mitoituksen suunnittelussa on huomioitava nämä enimmäismitat (Puuinfo 2020, Runkojärjestelmät)

Kilpailukykyä rajoittaa myös tilaelementtien välisten seinien suuri rakennepaksuus. (Sorri 2016, s. 24) Rakennettaessa tilaelementtikerrostaloa, sen vierekkäiset tilaelementit muodostavat rakenteeseen kaksinkertaisen seinän, mikä luo rakenteeseen suuremman rakennepaksuuden, mitä muilla menetelmillä olisi mahdollista saada. Toisaalta ripaseinä-rakennetta käytettäessä rakennepaksuutta on mahdollista pienentää limittämällä seinärakenteen runkotolppia. Massiivilevyrakenteisessa seinässä tämä ei ole mahdollista.

Aiempien lisäksi tilaelementtirakentamisen haasteita voi olla ihmisten yleiset asenteet puurakentamista kohtaan sekä taloudellinen ja kilpailuttamisen vaikeus. Esimerkiksi betonirakentamisen vahvat perinteet saattavat vaikuttaa ihmisten asenteisiin, jolloin puurakentamiseen ei luoteta niin paljon. Rakennuttajat saattavat myös kokea tietämättömyyden takia tilaelementtirakentamisen isona taloudellisena riskinä. (Sorri 2016, s. 24)

4.4 Tilaelementtirakentaminen esimerkkikohteissa

Suomessa tilaelementtirakentaminen on nousussa ja uusia kohteita tulee jatkuvasti. Yksi esimerkki puukerrostalosta, joka on valmistettu käyttäen tilaelementtejä, on HOAS Tuuliniitty Espoossa. HOAS on Helsingin seudun opiskelija-asuntosäätiö. Rakennus sisältää kaksitoista kerrosta ja ullakkotilan. Talossa on 165 asuntoa, joista suurin osa on yksiöitä. Rakennuksen ensimmäinen kerros on betonirakenteinen ja loput kerrokset puuta. Rakennus on palotekniikan ja rakennesuunnittelun osalta luokkaa poikkeuksellisen vaativa. (Puulehti 2/2020, s. 21)

Alkuperäisenä ajatuksena runkojärjestelmäksi suunniteltiin solurunkoa, jossa CLT- ja LVL-puulevyjä liitettäisiin kerrosten välillä suoraan toisiinsa ilman ääneneristys- tai muuta vastaavaa kerrosta. Solurungossa jäykistys olisi tehty levymäisin rakenneosin. Alakerrosten jäykistyksen olisi hoitanut betoniseinät ja ylempänä massiivipuuseinät. (Puulehti 2/2020, s. 21)

Tilaelementtien hyöty tuli esiin seuraavassa vaiheessa, kun huomattiin, että solurunkoinen ratkaisu tulisi hyvinkin kalliiksi mutta tilaelementeistä tekemällä mahdollisuus olisi halvempaan vaihtoehtoon. Päätös tilaelementtien hyödyntämiseen johti uuteen suunnittelukierrokseen ja erityisesti jäykistysratkaisut sekä värähtelylaskenta tuottivat uusia haasteita, sillä aiemmin tilaelementeistä ei ole rakennettu näin korkeaa rakennusta. Rakennuksen hissikuilut ja tilaelementtien seinä- ja lattiarakenteet ovat tehty käyttäen CLT-levyjä. (Puulehti 2/2020, s. 21)

Toinen esimerkki tilaelementtikohdeesta on Jyväskylässä sijaitseva KOAS Seminaarinmäki. KOAS on Keski-Suomen opiskelija-asuntosäätiö. Rakennuksessa on 103 asuntoa, joista suurin osa yksiöitä. Rakennus on erinomainen tilaelementtikohde, sillä se sisältää

paljon pieniä asuntoja. Tilaelementtirakentamisen ansiosta asunnot saatiin tehtyä tehtaassa valmiiksi asunnoiksi, jotka myöhemmin vain yhdistettiin toisiinsa. Ratkaisun ansiosta rakennus oli valmis yhdeksässä kuukaudessa työmaan aloituksesta. (Puulehti 2/2020 s. 25–29)

KOAS Seminaarimäessä tilaelementeistä valmistettiin kaikki asunnot, porrashuoneet ja hissikuilut. Kellarikerros oli betonirakenteinen. Kohteen tilaelementit ovat valmistettu CLT-puulevyistä, jotka kantavat itsensä ja kannattelevat talon keskikäytäviä. (Puulehti 2/2020 s. 25–29)

4.5 Tilaelementtien kantavuus

Tilaelementtitekniikalla valmistettu kerrostalo muodostuu erillisistä, vierekkäin ja päällekkäin asennetuista tilaelementeistä. Toisiinsa kiinnitetyt tilaelementit muodostavat kerrostalon jäykistävän ja kantavan rungon, jolloin erillistä runkorakennetta ei tarvita, vaan tilaelementtien oma runko hoitaa tämän. (Sorri 2016, s. 17) Kantava rakenne voidaan toteuttaa monella eri tavalla tilaelementeissä. Esimerkkejä ovat pilari-palkkitekniikka, kehärakenne tai laattamaiset suurelementit. (Puuinfo 2020, Runkojärjestelmät) Tässä työssä jäykistys- ja kantavuusominaisuuksia lähdetään ratkaisemaan hyödyntäen ripaseinärakennetta.

Ripaseinärakenne ei muuta tilaelementtirakentamisen normaaleja periaatteita, joissa jokaisessa tilaelementissä on omat kantavat osansa ja tilaelementtien välisessä liitoskohdassa on kaksoisrakenne. Siispä ulkoseinissä vaikuttaa yksirunkoinen kantava seinä mutta huoneistojen välisissä seinissä on tuplarunko kantavana seinänä.

Tilaelementtikohteiden rakennejärjestelmänä voidaan pitää kantavaseinäistä rakennusjärjestelmää. Tässä järjestelmässä kantavat seinät ovat kerroskohtaisia, jolloin vaakarakenne kiinnitetään seinän päälle. Rakennusjärjestelmässä kantavat seinät suunnitellaan välittämään pystykuormat perustuksille. (Puuinfo 2020, Runkojärjestelmät)

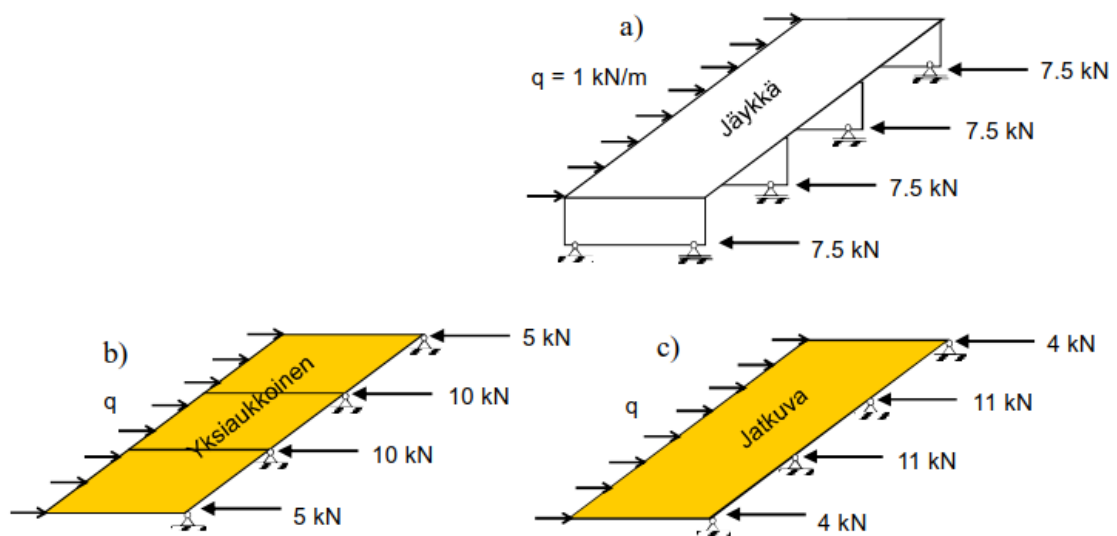
4.6 Tilaelementtien jäykistysjärjestelmät

Rakennukset tulee jäykistää vaakakuormia vastaan ja yleisin Suomessa vaikuttava vaakakuorma on tuulikuorma. Jäykistämiseen vaikuttaa oleellisesti rakennuksen korkeuden kasvattaminen. Puukerrostaloissa suunnitteluhaasteena on usein liitoksissa vaikuttavat voimat, vaakasuuntaiset siirtymät sekä ankkurointi kerroksittain. (Puuinfo 2020, Runkojärjestelmät) Tilaelementtirakenteinen kerrostalo voidaan jäykistää hyödyntäen jäykistäviä seiniä tai erillisellä jäykistysrakenteella, mikä voi olla esimerkiksi betonirakenteinen

porrastorni. (Sorri 2016, s. 48) Tässä työssä rakenteen jäykistyksen hoitaa tilaelementtien kantavat seinät sekä puiset vaakarakenteet.

Välipohjan levykentällä on suuri merkitys, kun lähdetään tutkimaan jäykistysjärjestelmää. Levykenttä voi toimia täysin jäykkänä, tukien yli jatkuvana joustavana rakenteena tai tukien kohdalla katkaistuna joustavana rakenteena. Puurakenteisissa välipohjissa jäykistäminen onnistuu usein runkoon kiinnitetyillä levyillä. (Laakkonen 2016, s. 8)

Välipohjatason yksinkertaistetussa tarkastelussa taso voidaan olettaa erittäin jäykäksi tai yksiaukkoiseksi ja joustavaksi rakenteeksi. Joustava levykenttä koostuu useista yksiaukkoisista osista, jolloin tasossa siirtyvät leikkausvoimat jakautuvat leikkausseinille levykentän kuormitusalan perusteella. Toisessa tapauksessa jäykkä levykenttä on yhtenäinen ja täysin jäykkä, jolloin vaakakuormat siirtyvät vertikaalijäykisteille niiden jäykkyyksien suhteessa. Kiertymisestä johtuen leikkausvoima siirtyy kuorman suuntaan nähden myös poikittaisille vertikaalijäykisteille. Kuvassa 5 on esitettyä seinien tukireaktioiden vaihtelua vaakarakenteissa, kun tasot ovat toteutettuna erilaisilla tavoilla. (Luntta 2013, s. 20)



Kuva 5. Tukireaktiot vaakarakenteissa. (Luntta 2013, s.20)

Vaakarakenteille on kuvan 5 mukaan oletettuna kolme erilaista toimintamallia: a.) jäykkä, b.) joustava ja tukien kohdalta epäjatkuva sekä c.) joustava ja tukien kohdalta jatkuva. Kuvassa keltaisella värillä on esitetty joustavat levykentät ja seinien jäykkyydet on oletettu samoiksi. Kohdan b.) levykenttä toimii yksiaukkoisena, kun taas kohdan c.) jatkuva ja joustava levykenttä voidaan mitoitaa moniaukkoisena rakenteena. Kohdan a.) täysin jäykkä vaakataso ei deformoidu lainkaan, jolloin jäykkä taso siirtää vaakakuormat seinille niiden jäykkyyksien suhteena. (Luntta 2013, s. 20)

Tilaelementtirakennuksissa käytettävä puurakenteinen välipohja on joustava ja tukien kohdalta katkaistu rakenne. Varsinkin ääniteknisistä syistä rakenne halutaan jakaa usein huoneiston välisten seinien kohdalta huoneistokohtaisiin lohkoihin. Tilaelementtien mukaan jaetut lohkot muodostavat rakennuksen sisään torneja, jotka välittävät vaaka- ja pystykuormat perustuksille. (Laakkonen 2016, s. 8) Sorrin diplomityön haastattelujen perusteella CLT-tilaelementtikerrostalon välipohjatason todellinen toiminta on yksiaukkoisen rakenteen ja jäykän tason välimaastossa. (Sorri 2016, s. 52)

Tässä tutkimuksessa jäykistävinä seininä tilaelementtikerrostalossa toimivat ulkoseinät sekä huoneistojen väliset seinät. Tilaelementtirakentamisessa ongelmaksi muodostuu se, että elementtien kiinnitys toisiinsa tapahtuu ulkopuolelta. Silloin huonoimmassa tapauksessa huoneistojen välisistä seinistä vain toinen pystytään kiinnittämään niin, että sitä voidaan hyödyntää rakennuksen jäykistyksessä. Mitoituksen kannalta tärkeää siis olisi kehitellä liitostekniikka, jolla molempia huoneistojen välisistä seinistä pystyttäisiin käyttämään rakennuksen jäykistävänä rakenteena. (Laakkonen 2016, s. 10)

Jäykistämässä haasteita tuo tilaelementtien väliset liitokset ja niiden joustavuus, kun jäykistävinä osina käytetään tilaelementtejä. Jäykyyden kannalta tärkeää olisi, että tilaelementit kiinnitettäisiin toisiinsa kiinni mahdollisimman jäykästi. Akustisen toimivuuden kannalta tilaelementtien voidaan kiinnittää toisiinsa pehmeästi ja joustavasti käyttäen akustoivia tärinäkumeja tai erottamalla rakenteet toisistaan studiorakennetta hyväksikäyttäen. Studiorakenteessa rakenteen katto- ja seinäpinnat ovat erotettu kantavasta rungosta esimerkiksi jousirangalla tai ääntä vaimentavalla villakerroksella. (Puulehti 2/2020, s. 48; Luntta 2021)

Liitostekniikan lisäksi jäykistys haasteita tilaelementtikerrostaloissa luo pienet pystykuormat, jotka stabiloivat rakennetta. Pienet pystykuormat johtuvat ainakin kolmesta erisyystä: puun tilavuuspaino on vain noin viidesosa betonin tilavuuspainosta, joten se on hyvin kevyt materiaali, tilaelementtien koot ovat rajallisia, jolloin jännevälit ovat lyhyitä ja kuormitukset melko pieniä, huoneistojen väliset seinät ovat kaksoisrakenteisia, jolloin kummallekin puolelle vaikuttaa vain puolikkaan jännevälän kuormat. (Sorri 2016, s. 49)

Rakennuksessa voi syntyä kiertymistä jäykkyysuhteiden tai jäykistävien seinien epäsymmetrisyyden johdosta. Epäsymmetrisen jäykistys voi syntyä esimerkiksi ulkoseinän suurten aukotusten johdosta, jos muut seinät ovat huomattavasti ehjempää. Tilaelementtikerrostalossa jäykistysjärjestelmän symmetrisyys tulisi tarkistaa niin, että eri jäykistystornien välillä vaakakuormista johtuvat siirtymät olisivat samaa suuruusluokkaa. (Laakkonen 2016, s. 9)

4.7 Lehto Components Oy:n tilaelementit

Lehto Group Oyj omistaa tytäryhtiö Lehto Components Oy:n, joka vastaa konsernin tehdastuotannosta. Lehto Components tuottaa tehtaissaan esimerkiksi tilaelementtejä, kattoelementtejä ja seinäelementtejä sekä betonirakenteisia kylpyhuone moduuleja ja kiin-tokalusteita. (Jokinen 2019; Väänttilä 2021)

Lehto-konsernilla on Deco-konsepti, joka koostuu puurakenteisista luhti- ja asuinkerrostaloista. Deco-konseptin talot ovat yleensä 2–4 kerroksisia ja ne valmistetaan Lehto Components Oy:n tilaelementeistä. Tuotteen jatkokehityksessä pyritään kehittämään tilaelementtirungon jäykkyyssominaisuuksia ja tavoite on päästä rakentamaan tilaelementtikohteita jopa yli kahdeksaan kerrokseen. (Jokinen 2019)

Deco-konseptin mukaiset tilaelementit ovat tehtaalla täysin valmiiksi valmistettuja rakennusosia. Kattolohkot kootaan esivalmisteosista, ja ne kootaan päällekkäin tilaelementtien kanssa, jolloin erillistä sääsuojasta ei tarvita. Työmaalle tehtäväksi jää tilaelementtien kiinnittäminen toisiinsa, tekniikan liittäminen tekniikkalousuihin sekä muut kytkentä- ja viimeistelytyöt. (Jokinen 2019)

Tilaelementtien painot vaihtelevat 8 500–13 000 kg:n välillä. Mikäli tilaelementtiin liittyy parveke, lisää se painoa noin 800–1 600 kg:lla. Tilaelementtien kokonaispaino vaikuttaa niiden kuljetukseen, valmistukseen sekä nostokalustoon. (Jokinen 2019)

Rakennuksen kokoamisessa pyritään siihen, että elementit toimitetaan tilaajalle suojatuna säältä ja mekaanisilta vaurioilta. Tärkeää on myös, ettei tilaelementtejä tarvitse säilyttää työmaalla säälle alttiina. Heti kun tilaelementit ovat toimitettu työmaalle, ne asennetaan perustuksille ja katto asennetaan suojaamaan rakenteita. Höyrynsulku limitetään sekä tiivistetään kumitiivisteellä elementtien saumoista ja ulkoverhous tiivistetään kivivilla eristeellä sekä tiivistenauhalla. (Jokinen 2019)

Tehtaalla tilaelementteihin tehdään kolminkertainen muovipäällystesuojaus kuljetuksen ajaksi ja tilaelementtien sisäpuolelle lisätään kosteutta imevää materiaalia, joka kerää ylimääräisen kosteuden. Ennen asennusta suojamuovit on poistettava. Tilaelementtien asennukset pyritään toteuttamaan sateettomana päivänä, jolloin ei tarvita erillistä sääsuojasta, vaan suojan tekee viimeisenä päälle nostettavat vesikattoelementit. (Jokinen 2019)

Lehto Components Oy valmistaa Deco-konseptin tilaelementtikerrostaloja ja tässä työssä voidaan hyödyntää siinä käytettyä jäykistysjärjestelmää. Pää tavoite työssä on siis kehittää kantaviin seiniin uusi rakennejärjestelmä, jolla pystytään valmistamaan vähintään kahdeksan kerroksisia tilaelementtikerrostaloja.

Aiemmin kantavina seinärunkorakenteina Lehdon tilaelementtikohteissa on käytetty C24 lujuusluokan rankarunkoa. Pystypuiden rankajako on ollut riippuvainen rakenteiden kuormista ja jäykistyksen tarpeesta. Tilaelementtien kantavissa ala- ja yläpohjarakenteissa on käytetty Kerto-S –rankarunkoa. (Jokinen 2019)

Rakenteen rungon jäykistävänä rakenteena on käytetty levyrakenteita. Kantaville seinärakenteille vaakasuuntaiset kuormitukset on siirretty hyödyntäen ylä- ja alapohjan levyrakenteita. Vaakasuuntaiset kuormitukset on tuotu perustuksille seinärakenteiden levyrakenteilla, jotka jäykistävät pystyrakenteet. Kokonaisuudessaan jokainen tilaelementti on alusta alkaen ollut erikseen kantava ja jäykistetty rakennekokonaisuus. (Jokinen 2019)

Rakennejärjestelmässä kuormituksia on siirtänyt tilaelementtien keskinäiset liitokset. Perustuksiin tilaelementtien kiinnitys on tapahtunut Deco-konseptissa kulmaraudalla, jossa sokkelikiinnitys on toteutettu kiila-ankkureilla. Aiemmin rankarunkoisessa tilaelementtijärjestelmässä tilaelementtien keskinäiset kiinnitykset toteutetaan vinoruuvatuilla ruuvi-liitoksilla sekä kulmarautakiinnityksillä. (Jokinen 2019) Tässä työssä kantavuus- ja jäykkyysominaisuuksia pyritään parantamaan ripaseinärakennetta hyödyntäen niin, että mahdollistettaisiin vähintään kahdeksan kerroksisen tilaelementtikerrostalon rakentaminen kustannustehokkaasti. Kantavien seinien rakenteen muuttuessa myös liitostekniikka muuttuu. Tässä työssä keskitytään kuitenkin kantavien seinien rakenneominaisuuksiin, jolloin liitostekniikkaa ei laajemmin huomioida.

5. PALONKESTO PUUKERROSTALOSSA

5.1 Paloluokat, luokkavaatimukset ja luokitukset

Palonkesto luokitukset perustuvat 1.1.2018 voimaan astuneeseen ympäristöministeriön asetukseen 848/2017 rakennuksen paloturvallisuudesta ja sen toiseen painokseen, jota on päivitetty 1.1.2021 voimaan astuneen ympäristöministeriön asetuksen 927/2020 mukaisesti. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Rakennukset voidaan jakaa neljään paloluokkaan P3, P2, P1 ja P0. Kun rakennus suunnitellaan osin tai kokonaan oletetun palonkehityksen mukaan eli toiminnallisella palomitoituksella käytetään paloluokkaa P0. Paloluokkia P1, P2 ja P3 käytetään silloin kun käytössä on taulukkomitoitus eli noudatetaan palomääräysten paloluokkia ja lukuarvoja. Puukerrostalon ollessa kahdeksan kerroksinen ja korkeintaan 28 metriä korkea on paloluokaksi valittava P2, kun mitoitus halutaan määrittää taulukkomitoitusta hyödyntäen. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Puurungon osalta paloteknisiä vaatimuksia voidaan tutkia taulukon avulla. Palokirjassa esitetty taulukko 7 esittää rungon vaatimukset, kun kyseessä on luokan P2 asuinrakennus, joka on alle 28 metriä korkea ja enintään kahdeksan kerroksinen. Henkilörajoituksena tämäntyyppiselle asuinrakennukselle on 1000 henkilöä ja rungon vaatimuksena on R 60 vaatimustaso. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Rakennuksen eri osastoivat ja kantavat rakennusosat täytyy suunnitella REI-luokkavaatimusten mukaisesti. REI-luokkavaatimuksissa kirjain R tarkoittaa kantavuutta, jossa rakennusosan tulee säilyttää kantavuus vaaditun palonkeston ajan. Kirjain E tarkoittaa tiiviyyttä, jossa rakennusosan tulee säilyttää savukaasu- ja lämpösäteilytiiviyys vaaditun palonkeston ajan. Viimeinen kirjain I tarkoittaa eristävyyttä, jossa rakennusosan tulee säilyttää lämmöneristävyys vaaditun palonkeston ajan. REI-luokkavaatimusten mukainen suunnittelu tehdään käyttäen standardipalokäyrän esittämää palotilannetta. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Rakennustarvikkeiden luokkiin jakaminen tapahtuu sen mukaan, miten ne osallistuvat paloon. Luokkamääritykseen vaikuttaa materiaalin syttymisherkkyys, palon leviämisoimaisuudet sekä savun ja palavien pisaroiden tuotto. Ulko- ja sisäpinnoille on asetettu erilaisia luokkavaatimuksia. Pintaluokalla on merkitystä palon lämmöntuottoon, leviämi-

seen, lieskahduksen alkamishetkeen sekä pisaroiden ja savun muodostumiseen. Pinta-luokkaan puurakenteissa vaikuttaa merkittävästi asennustapa, tiheys, paksuus ja alus-rakenne. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Paloon osallistuminen määritetään erilaisin perustein. Osallistuminen paloon yleisesti merkitään isoin kirjaimin ja luokkia ovat A1, A2, B, C, D, E, ja F. Esimerkiksi A1-luokan tarvike ei osallistu paloon, sillä se on palamaton materiaali ja A2-luokan rakennusmate-riaali osallistuu paloon erittäin rajoitetusti. Luokissa A2-D on tutkittava myös savun- ja palavien pisaroiden muodostumista. Savuntuotto jaetaan erittäin vähäiseen (s1), vähäi-seen (s2) tai muuhun kuin edelliset (s3). Palavien pisaroiden muodostus jaetaan taas luokkiin, jossa sitä ei esiinny (d0), esiintyy nopeasti sammuvia (d1) sekä muihin kuin edelliset (d2). (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

5.2 Sprinklaus puukerrostalossa

Sammutuslaitteiston asennus on oleellinen asia puukerrostalorakentamisessa. Sprink-laamattomassa asuinhuoneistossa palo kehittyy hyvin nopeasti. Jopa 3–4 minuutissa palo pääsee kehittymään lieskahduspisteeseen. Palon jäähtymisvaihe sprinklaamatto-massa rakennuksessa alkaa vasta kun tilassa oleva palokuorma on loppuun palanut tai pelastuslaitos on alkanut sammuttamaan paloa. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Sprinklauksen avulla tulipalo asuintalossa saadaan hallintaan jo ensimmäisten minuut-tien aikana. Normaalisti sprinkleri laukeaa paloalueella 1–2 minuutin kuluttua palon al-kamisesta. Sprinkleri alkaa välittömästi rajaamaan palon leviämistä ja estämään lieskah-dusta. Tällöin palo ei pääse kehittymään missään vaiheessa täyteen mittakaavaan, koska palokuorma ei syty kokonaisuudessaan ja sammutusjärjestelmä jäähdyttää alka-nutta paloa tai sammuttaa sen kokonaan. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Kahdeksan kerroksisessa enintään 28 metriä korkeassa puurunkoisessa rakennuksessa on vaatimuksia sammutuslaitteistojen asennukselle. Tämän tyyppisessä rakennuksessa pakollisena vaatimuksena on luokan OH1 (OH = Ordinary Hazard) tai luokan 3 sprinkle-rijärjestelmät, jotka ovat kytkettyinä hätäkeskukseen. Vaatimuksia sprinklatuille tiloille on asunnot, uloskäytävät, kellarit, varatienä toimivat parvekkeet sekä tekniset tilat. Sprink-leriluokkien 3 ja OH1 vesilähteet ovat varmennettuja yksinkertaisia vesilähteitä tai täyden toiminta-ajan vesisäiliöitä. Tämän tyylisten sprinklereiden toiminta-aika on vähintään 60 minuuttia. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

5.3 Suojaverhous

Rakennusosia voidaan suojata suojaverhouksella. Suojaverhous suojaa alustansa määrätyn ajan hiiltymiseltä, syttymiseltä tai muunlaiselta vaurioitumiselta. Suojaverhouksen tavoitteena on rajoittaa palon kehittymistä. Eurooppalaiset suojaverhousluokat ovat K₁ 10, K₂ 10, K₂ 30 ja K₂ 60. Luokissa oleva alaindeksi viittaa suojaverhouksen takana olevaan alustaan ja sen ominaisuuksiin. Esimerkiksi alaindeksi kaksi tarkoittaa, että kyseistä suojaverhousta voidaan käyttää kaikilla alustoilla. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Suojaverhousvaatimukset P2-luokan 8-kerroksisessa enintään 28 metriä korkeassa rakennuksessa on esitetty palokirjassa taulukossa 27. Asuinkerrostalossa seinä-, katto- ja lattiapinnoissa suojaverhouksena on käytettävä suojaverhouksena luokan K₂ 30, A2-s1, d0 materiaaleja, ja ulkoseinän rungon ulkopinnoissa tuuletusraon sisäpinnassa on käytettävä luokan K₂ 10, A2-s1, d0 materiaaleja. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

P2-luokan 8-kerroksisessa puukerrostalossa suojaverhoamattomille pinnoille on annettu erityisvaatimuksia liittyen siihen kuinka paljon suojaverhoamatonta pintaa saa olla näkyvissä palo-osastoittain. Suojaverhoamatonta seinä- ja kattopintaa saa olla kantamattomat väliseinät. Lisäksi ilman erityisvaatimuksia katto- ja seinäpinnoista suojaverhoamatonta voi olla enintään 20 %. Katto- ja seinäpintojen toteuttaessa luokat R 90 sekä EI 90 voidaan suojaverhoamatonta katto- ja seinäpintaa palo-osastoittain hyväksyä 20–80 %. Lisäksi luokan R 120 sekä EI 120 toteuttaessa voidaan katto- ja seinäpinnoista hyväksyä suojaverhoamattomaksi jopa yli 80 %. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

5.4 Leviämisen estäminen

Rakennukset jaetaan usein palo-osastoihin, jotta saadaan rajoitettua palon ja savun leviäminen, turvattua henkilöiden poistuminen, helpotettua pelastus- ja sammutustoimia sekä vähennettyä omaisuusvahinkoja. Osastoiva rakennusosa rajoittaa palon ja savun leviämistä vaaditun palonkestonajan. Osastoivuutta määrittäessä tarkastellaan palon vastaisen puolen lämpötilan nousua sekä rungon kestävyyttä. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

P2-luokan rakennuksessa ullakko tulee kerrososastoida. Tämä tarkoittaa sitä, että kerroksen ja ullakon välillä on oltava osastoiva rakennusosa. P2-luokan rakennuksissa ylä-

pohjan runkorakenteen on säilytettävä kantavuutensa vaaditun osastointiajan sekä alapuolisessa että ullakkopalossa. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Yläpohjarakenteen sisältäessä ontelon, ei onteloa tarvitse välttämättä osastoida ontelosta. Tällöin ontelon kaikkien pintojen tulee olla kuitenkin B-s1, d0-luokkaa. Suositeltavaa on kuitenkin, että yläpohjan ontelo osastoidaan aina kerroksesta, jolloin ontelon pinnat voivat olla luokkaa D-s2, d2, ja ontelossa saa olla normaali E-luokan aluskate. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Palon leviämistä estetään palomuurien avulla. Palomuuuri on seinä, joka estää palon leviämisen seinän toiselle puolelle sekä kestää siihen vaikuttavien rakennusten ja osien sortumisen vaadittavan ajan verran. Palomuuria tarvitaan sellaisissa tapauksissa joissa, kahdella eri rakennuspaikalla olevat rakennukset ovat niin lähellä toisiaan, että palon leviäminen on mahdollista, rakennukset rakennetaan kiinni toisiinsa, rakennuksen eri osat ovat eri paloluokkaa tai rakennus ylittää yhdelle rakennukselle sallitut kerrosala- tai henkilömäärärajoitukset. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

P2-luokan rakennuksessa palomuuuri täytyy tehdä A1-luokan rakennustarvikkeista ja mahdolliset ovet tulee tehdä vähintään A2-s1, d0-luokan rakennustarvikkeista. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Osastoivat rakennusosat sisältävät usein epäjatkuvuuskohtia, joita ovat esimerkiksi talotekniset läpiviennit sekä tuuletusraot. Tällaiset epäjatkuvuuskohdat osastoivissa rakenteissa on suojattava palokatkoilla, jottei paloleviä niistä. Palokatkoja käytetään myös hidastamaan palon leviämistä rakenteen pinnalla. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

5.5 Uloskäytävät

Uloskäytävä on reitti, jota pitkin tulee voida poistua turvallisesti ja nopeasti ulos rakennuksesta. Jos ylimmän kerroksen lattian etäisyys porrashuoneen sisäänkäyntitasosta on enintään 24 metriä, tarvitaan kaksi osastoitua uloskäytävää. Kuitenkin asunnossa ja alle 300 m²:n työpaikkatiloissa riittää vain yksi uloskäytävä sekä varatiejärjestely. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Yli kaksi kerroksisen P2-luokan rakennuksen uloskäytävälle on erilaisia paloteknisiä vaatimuksia. Yleisiä vaatimuksia osastoidulle uloskäytävälle: kantavat rakennusosat oltava vähintään luokkaa R 60, osastoivat rakennusosat oltava vähintään luokkaa EI 60, por-

rastasanteilta ja -syöksyiltä vaaditaan luokkaa R 30 ja portaan rungon rakennustarvikkeet on oltava vähintään D-s2, d2-luokkaa. Lisäksi osastoivassa seinässä sijaitseva oven on oltava vähintään luokkaa EI 30. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Uloskäytävässä on rakennusosille erilaisia suojaverhouks- ja pintaluokkavaatimuksia. Lattioissa, seinissä, katoissa sekä porrastasanteen ja -syöksyn rakenteissa on käytettävä luokan K₂ 10, A2-s1, d0 suojaverhouksia. Pintaluokkavaatimuksena lattioille sekä portaiden ja porrastasanteiden yläpinnoille on D_{FL}-s1 ja seinille, katoille sekä porrastasanteen ja -syöksyn rakenteille A2-s1, d0. Portaiden sekä porrastasanteiden etupinnoille pintaluokkavaatimuksena on B-s1, d0. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Kahdeksan kerroksinen rakennus on yli 12 metriä korkea, joten savunpoistotapana uloskäytävässä on käytettävä sisäänkäyntitasolta avattavaa savunpoistoluukkaa tai -ikkunaa, jonka vähimmäisala on 1,0 m². (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

5.6 Julkisivut

Paloluokassa P2 puujulkisivun käyttö on mahdollista tietyin edellytyksin. Kun julkisivu on palosuojaamaton ja yli kaksi kerroksinen on palon leviämistä julkisivuja pitkin estettävä esimerkiksi puujulkisivun palokatkoilla. Sprinklatussa rakennuksessa palon leviäminen julkisivuihin asti on kuitenkin hyvin epätodennäköistä. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Kahdeksan kerroksisessa sprinklatussa puukerrostalossa voidaan käyttää ulkoverhouksena luokan D-s2, d2 pintamateriaalia kunhan se täyttää seuraavat ehdot: ensimmäisen kerroksen pintojen luokkana on oltava vähintään B-s2, d0, poistumis- ja varapoistumisten ylä- ja alapuolen pintojen luokkana on oltava vähintään B-s2, d0, palokatkot on löydyttävä ulkoverhouksen tuuletusraosta sekä porrashuoneen ulkoverhouksen tuuletusraosta, ulkoverhouksen laajojen osien putoaminen palotilanteessa on oltava rajoitettua, paloräystäs on oltava vähintään luokkaa EI 30, poistumistien ollessa huoneiston alapuolella on poistumistien päällä oltava katos sekä, kun parvekelaatalla on osastointivaatimus on laatan katkaistava ulkoverhouksen tuuletusvälin. Lisäksi vaatimuksena on, että varatieparvekkeiden ulkopintojen ja parvekelaattojen alapintojen luokituksena on oltava B-s2, d0. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

5.7 Varatiet

Parvekkeet suunnitellaan käytännössä aina varatiekäyttöön. Puisen parvekkeen ollessa varatie palotilanteessa, on se sprinklattava, kun kyseessä on yli 2-kerroksinen P2-luokan rakennus. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Sprinklatun varatienä toimivan parvekkeen yleisiä paloteknisiä vaatimuksia P2-luokan yli 2-kerroksisessa rakennuksessa: lasitetun parvekkeen parvekelaatan osastoivuus on oltava vähintään EI 30, parvekkeen kantavat rakennusosat on oltava vähintään luokkaa R30, parvekelaatan osastoivuudeksi vaaditaan luokkaa EI 0 sekä osastoivan parvekelaatan tiivistykset ja läpiviennit on saatava vähintään luokkaan E 15. Lisäksi eri rakennusosilla on erilaisia pintaluokkavaatimuksia. Pintaluokkavaatimuksena B-s2, d0 on ensimmäisen kerroksen laatan alapinnassa, katoissa, kaiteen ulkopinnassa sekä palkeissa. Ulkoverhouksen kiinnityskoolauksessa sekä kantavan rungon pilareissa pintaluokkavaatimuksena on D-s2, d2. Ulkoseinän rungon ulkopinnassa suojaverhousvaatimuksena on K₂ 10, A2-s1, d0 ja pintaluokkavaatimuksena A2-s1, d0. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

Lisäksi lasitetulle parvekkeelle paloteknisenä vaatimuksena on luokan EI 15 seinä tietyin edellytyksin: seinän ollessa vierekkäisten parvekkeiden väliseinä, erillisten parvekkeiden vapaan välin ollessa alle kaksi metriä tai kun seinän etäisyys viereisen palo-osaston luokittelemattomaan ikkunaan on alle kaksi metriä ja seinän kulma on pienempi kuin 135 astetta ikkunaan nähden. (Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen)

6. RIPASEINÄRAKENTEEN OMINAISUUDET

6.1 Ripaseinärakenteen hyödyt

Kantavan seinärakenteen yleinen tehtävä on siirtää pysty- ja jäykistyskuormat alas rakennuksen perustuksille. Ulkoseiniin kohdistuu lisäksi tason suuntaa vastaan poikittaisia kuormia, jotka lisäävät taivutusrasituksia heikentäen seinän nurjahduskestävyyttä.

Oleellinen hyöty LVL-levylle ja käytettävälle seinärakenteelle on sen rakennusfysikaalinen toimivuus. Ilmankosteus siirtyy yleisesti rakenteen lävitse suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen. Rakennuksen käyttäjien tuodessa rakennukseen kosteuslisää, on kosteuden kulkusuunta pääasiassa sisältä ulospäin. Rakenteessa tulee rajoittaa sinne tulevan kosteuden määrää sekä mahdollistaa samalla sinne tulevan kosteuden kuivuminen. Seinärakenteen sisältäessä mineraalivillaa on seinän sisäpinnalla oltava riittävän suuri vesihöyrynvastus, sillä itse mineraalivilla ei pysty juurikaan sitomaan kosteutta. Höyrynvastuksen suuruus vaatimus riippuu käytettävästä tuulensuojakerroksesta. Mitä suurempi vesihöyrynvastus tuulensuojalevyllä on, sitä suurempi vesihöyrynvastus vaaditaan myös rakenteen sisäpinnan höyrynsulkukerroksella. (Vinha 2013, s. 173)

Tampereen teknillisen yliopiston FRAME-tutkimusprojektin yhtenä osana määriteltiin lakenallisesti rankarakenteisen seinän sisäpinnan vesihöyrynvastuksen sekä ulko- ja sisäpinnan välisen vesihöyrynvastussuhteen vaaditut arvot rakennusfysiikan testivuosiin 2050- ja 2100-ilmasto-olosuhteissa. Tutkimuksen tulosten mukaan riittävä arvo sisäpinnan vesihöyrynvastukselle vesihöyryn osapaine-eron suhteen on $Z_{p,i} = 28 \times 10^8 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ käytettäessä tuulensuojana 9 mm kipsikartonkilevyä ja 30 mm mineraalivillalevyä. (Vinha 2013, s. 173)

LVL-levyn vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron suhteen syysuuntaan vastaan kohtisuorasti on $\delta_{v,LVL} = 0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Tästä saadaan määritettyä LVL-levyn vesihöyrynvastus vesihöyryn osapaine-eron suhteen kaavojen (1) ja (2) avulla. Kaavoissa pitoisuusero $\delta_{v,LVL}$ muutetaan osapaine-eroksi $\delta_{p,LVL}$ kaavan (1) avulla, josta saadaan kaavalla (2) LVL-levyn vesihöyrynvastus vesihöyryn osapaine-eron suhteen. (RIL 255-1-2014)

$$\delta_{p,LVL} = \frac{\delta_{v,LVL}}{\left(\frac{R}{M_w}\right) * (273,15 + t)} \quad (1)$$

missä

$\delta_{v.LVL}$	on LVL-levyn vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron suhteen syy-suuntaan vastaan kohtisuorasti
R	on yleinen kaasuvakio
M_w	on veden molekyylimassa
t	on lämpötila (°C)

$$Z_p = \frac{h_1}{\delta_{p.LVL}} \quad (2)$$

missä

Z_p	on LVL-levyn vesihöyrynvastus osapaine-eron suhteen
h_1	on LVL-levyn paksuus
$\delta_{p.LVL}$	on kaavan (1) mukainen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron suhteen

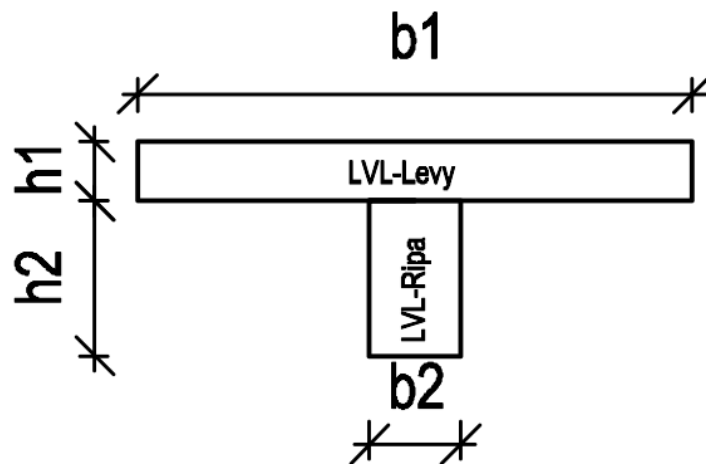
LVL-levyn vesihöyrynvastus vesihöyryn osapaine-eron suhteen on näin ollen $Z_{p.LVL} = 52,9 \times 10^8 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ levyn paksuuden ollessa 21 mm. Tämä on riittävä arvo verrattaessa tulosta Tampereen teknillisen yliopiston FRAME-tutkimusprojektin vaadittuun arvoon käytettäessä tuulensuojana 9 mm kipsikartonkilevyä ja 30 mm mineraalivillalevyä. (RIL 255-1-2014; Vinha 2013, s. 173) Laskenta on liitteessä 4. Tarkempaa rakennetta määrittäessä laskentaa on suoritettava tarkemmin ja on huomioitava, minkälainen tuulensuojalevyrakente soveltuu parhaiten kyseiselle rakennukselle. Tuulensuojalevyn materiaali ja laatu vaikuttaa oleellisesti tarvittavan sisäpuolen levytyksen valintaan.

Tuulensuojakerroksella on vaatimuksia myös lämmönvastuksen suhteen. Lämmönvastuksen tulisi olla vähintään luokkaa $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$. Tämän suuruinen lämmönvastus saadaan esimerkiksi 20 mm tuulensuojamineraalivillalla, joka tarkoittaa, että työssä käytetty tuulensuojarakente on riittävä tämän vaatimuksen suhteen. (RIL 250-2020; Koivukan gas 2020, s.53)

Laskennan mukaan 21 mm LVL-levyllä saataisiin riittävästi höyrynvastusta ulkoseiniin, jolloin höyrynsulkumuoveja ei tarvittaisi käytettävissä seinärakenteissa. Toisaalta massiivipuinen CLT-levyseinä voidaan toteuttaa myös ilman höyrynsulkumuovia, mutta tässä tapauksessa ilmavuotojen riski on suurempi massiivipuun halkeilun takia. Ilmavuotojen riski kasvaa myös käytettäessä syrjäliimaamatonta seinälevyä.

LVL-levyn hyötyjä ovat myös sen mittatarkkuus sekä mittapysyvyys, jolloin tilaelementtien nurkkaliitokset voidaan toteuttaa jäykempinä. Jäykempien liitosten ansiosta työmaalla tehtävä korjaustyö on vähäistä.

Ripaseinän T-poikkileikkauksen liitostyyppi vaikuttaa oleellisesti rakenteen jäykkyysominaisuuksiin. Tässä työssä levyn ja rivan välinen liitos on toteutettu liima- tai ruuviliitoksena. Kuvassa 6 on havainnollistettu työssä tutkittavan rakenteen T-poikkileikkausta.



Kuva 6. T-poikkileikkaus.

Kuvassa 6 mitta h_2 on rivan korkeus ja h_1 mittaa esittää rakenteen LVL-levyn paksuus. Poikkileikkauksen b_2 mittana on rivan paksuus ja b_1 mittana käytetään rakenteen tehollista leveyttä b_{ef} .

Liimaliitos huomioidaan jäykkänä liitoksena ja ruuviliitos joustavana liitoksena rivan suunnassa. Ruuviliitoksen heikkouksia ovat siinä tapahtuvat liitossiirtymät, jotka vaikuttavat rakenteen jäykkyyteen. Tehdasolosuhteissa ruuvien kiinnittäminen on myös tahtistava työvaihe, joka vie paljon aikaa verrattaessa liimaamiseen. Toisaalta myös liiman kuivumiseen on varattava oma aikansa.

Ripaseinän hyötynä on sen toiminta onnettomuustilanteissa. Palotilanteessa voidaan jäykistävää sisäpuolen LVL-levyä hyödyntää palosuojauksessa, joka mahdollistaa rakenteen hyvän palonkeston. Jatkuvan sortuman tilanteessa ripaseinärakenne voidaan mitoittaa yhtenäisenä palkkirakenteena, jolloin alapuolen seinän sortuessa yläpuolen seinät välittävät pystykuormat palkkirakenteena tilaelementin nurkille. Jatkuvan sortuman tilanteessa alakerrosten nurkissa tulee olla kuitenkin kapasiteettia niin paljon, että rakenne kestää ylemmiltä kerroksilta tulevat pistekuormat.

Ripaseinien sisällä olevat levysaumot voidaan kiinnittää toisiinsa liimaamalla tai mekaanisin kiinnikkein. LVL-levyn leveyden ollessa 2,5 metriä esimerkiksi 8 metriä pitkään seinään muodostuu vähintään kolme seinän sisäistä pystysaumaa. Seinän toiminta palkkirakenteena jatkuvan sortuman tilanteessa voidaan tehostaa yhtenäisellä ylä- ja alajuoksulla tai vetorasitukselle mitoitetuilla teräsvanteilla.

6.2 Vertailu CLT- ja rankarunkoon

Seuraavana on vertailtu ranka-, CLT- sekä ripaseinän eroavaisuuksia. Taulukossa 1 (Vänttilä 2021) on vertailtu plussin ja miinuksiin rakenteiden eroja käytettäessä niitä Lehto Components Oy:n tilaelementeissä kantavina seinärakenteina. Taulukko 1 on Lehto Asunnot Oy:n vertailutaulukko, jossa eri ominaisuudet on huomioitu oman tuotannon näkökulmasta.

Taulukko 1. *Seinärakenteiden vertailu (Vänttilä 2021).*

Vertailu:	Ripaseinä	Ranka	CLT
Hinta	+	++	--
Lujuus ja jäykkyys	+	-	++
Suunnittelun haasteet	+	-	++
Myynti-imago	+	-	++
Rakennettavuus tehtaalla	+	++	+
Rakennettavuus työmaalla	+	-	++
Toimitusvarmuus	+	+	--
Mittatarkkuus	+	-	++
Äänitekkinen toiminta	+	+	-
Kosteudensietokyky	-	-	+
Rakennusfysikaalinen toiminta	++	-	+

Kun T-poikkileikkauksellista riparakennetta verrataan rankarunkoon, rakenteellinen hyöty T-poikkileikkauksessa on rakenteen sisäpuolen levyn hyödyntäminen laipparakenteena, jolloin rivat toimivat uumina. Seinärakenteessa ripojen tarkoitus on estää ohuemman sisäpuolen levyn lommahdus eli jäykistää ja stabiloida laipparakennetta.

CLT:hen verrattaessa ripaseinärakenne on huomattavasti optimaalisempi rakenne, sillä CLT:ssä on paljon ylimääräistä ja turhaa materiaalia. Jos esimerkiksi otetaan viisi kerroksinen CLT-levy, niin rakenteessa on jo suoraan kaksi paksua kuormankantosuuntaan nähden poikittaista levykerrosta, jotka eivät näin ollen suoraan välitä pystykuormia. CLT:n mitoituksessa kantavina rakenteina huomioidaan vain ne kerrokset, joissa laudan syynsuunta on samansuuntainen kuin ulkoiset kuormat. Riparakenteessa näitä kantosuuntaan nähden poikittaisia viilukerroksia on huomattavasti vähemmän varsinkin materiaalipaksuuksia verrattaessa. (Kevarinmäki 2017; Luntta 2021)

CLT-rakenteessa on paljon hyviä ominaisuuksia mutta sen selvä heikkous on se, että yksittäisen seinän kohdalla rakenteellinen optimointi on hyvin haasteellista. Yksittäinen seinä on yleensä kokonaisuudessaan samaa CLT-levyä, jolloin rakenne mitoitetaan suurinta rasiitusta vastaan ja tehdään yhtenäisenä koko seinän matkalle. Tästä hyvä esimerkki on se, kun seinän päissä on vaakakuormista johtuen suuremmat rasiitukset tai vutuksen takia. Tässä tilanteessa normaalin pystykuorman lisäksi nurkkaan vaikuttaa taiputuksen pystyvoimakomponentti. Tässä tilanteessa CLT-elementti mitoitetaan nurkassa vaikuttavan suurimman rasiituksen mukaan, jolloin elementin keskialueelle tulee paljon turhaa kapasiteettia. Riparakenteessa vastaavanlainen tilanne pystytään optimoimaan ripojen avulla niin, että reuna-alueilla ripajako on tiheämpi kuin rakenteen keskialueilla. Riparakenteen nurjahduskestävyyteen pystytään vaikuttamaan juuri ripajakoa muuttamalla. (Luntta 2021)

Taulukkoa 1 yleisesti katsoen ripaseinärakenne pärjää rankarakenteelle todella hyvin lukuun ottamatta kustannuksia, jotka ovat rankarakenteella pienemmät. Verrattaessa ripaseinärakennetta CLT:hen huomataan, että CLT:llä on monia erittäin hyviä puolia mutta toisaalta huonojakin puolia on enemmän kuin ripaseinällä. CLT:ssä huomioon otettavia asioita ovat hinta, toimitusvarmuus sekä äänitekninen toiminta, jotka kaikki ovat negatiivisella puolella huomioitaessa niiden hyödyntäminen Lehdon tilaelementtirakentamisessa. CLT:ssä on usein myös paljon ylikapasiteettia tutkittaessa lujuus- ja jäykkyysteknisiä asioita mutta toisaalta, mitä korkeammaksi rakennus tehdään, sitä enemmän kapasiteettia tarvitaan. Ripaseinän selvänä heikkoutena on kosteudensietokyky, mikä taas CLT:llä on hyvä.

Rakentamisessa hinta on todella merkittävä asia, kun vertaillaan eri rakennetyyppejä ja tässäkin tapauksessa eri seinärakenteiden hintoja voidaan vertailla tilaelementtikohtaisesti. Lehto Asunnot Oy:n tekemien laskemien perusteella käytettäessä 120 mm CLT-seiniä ovat niiden kustannukset tilaelementeissä jopa yli 100 % suuremmat kuin kipsilevytetyillä rankaseinillä. Toisaalta ripaseinillä tehdyn tilaelementin kustannukset ovat noin 45 % suuremmat kuin kipsilevytetyillä rankaseinillä, kun tilaelementit valmistetaan tehdasolosuhteissa. Verrattaessa CLT- ja ripaseinää, ovat CLT:n kustannukset jopa 55 % suuremmat käytettäessä rakenteita Lehto Components Oy:n tilaelementeissä. Tästä voidaan huomata, että prosentuaalisesti hintaerot voivat olla todella suuria, joka vaikuttaa oleellisesti rakennuksen kokonaiskustannuksiin ja toimivimman rakenteen valintaan. Tilaelementtirakenteiden kustannukset pohjautuvat Lehto Asunnot Oy:lla tehtyihin kustannusvertailuihin käytettäessä tuotannossa Lehto Components Oy:n valmiita tuotantolinjoja. (Luntta 2021; Vänntilä 2021)

Jos kustannusvertailuun otetaan neliöhinta Crosslam Oy:n 120 mm CLT-rakenteelle ja ripaseinärakenteelle, jossa käytetään Stora Enson LVL-X –levyä sekä LVL-S –ripoja, niin voidaan havaita selkeämmin, minkälaisia kustannuseroja rakenteilla on. Puumerkki Oy:lta saatujen tietojen mukaan 39 mm LVL-X –levyn neliöhinta on 23,4 €/m². LVL-S –rivoille (51 * 84 mm) metrihinta on 3,2 €/m, kun käytetään erikoismittoihin sahattua materiaalia. (Räsänen 2021) Näin ollen ripaseinärakenteen neliöhinta on noin 28,7 €/m², kun rivat on kiinnitetty levyyn 600 mm ripajaolla. Crosslam Oy:lta saatujen tietojen mukaan 120 mm CLT-rakenteen neliöhinta on noin 60–75 €/m², riippuen kerrosten määrästä ja puun yleisestä hintatasosta. (Manninen 2021) Keskiarvallisesti 120 mm CLT-rakenteen neliöhinta on noin 67,5 €/m². Verrattaessa CLT-rakennetta riparakenteeseen on kantavien rakenteiden neliökustannuksissa selkeä ero. Haastattelussa saatujen kustannusten perusteella CLT-rakenne on noin 135 % kalliimpaa neliöhinnallisesti kuin ripaseinärakenne verrattaessa rakenteiden kantavia osia. Koko tilaelementtien kustannuksissa tulee kuitenkin huomioida esimerkiksi liitostekniikka, palosuojaus, eristäminen sekä vaadittavan työn osuus. Esimerkiksi liitosteknisesti CLT-rakenne on huomattavasti helpompi toteuttaa kuin riparakenne. CLT-rakenteessa elementti tulee tehtaalle myös täysin valmiina mutta riparakenteen tapauksessa levyjen ja ripojen kiinnitys toisiinsa tapahtuu vasta tilaelementtitehtaalla. Tämä luo lisäkustannuksia riparakenteelle, mutta mahdollisuudet riparakenteella ovat kustannustehokkaampaan ratkaisuun.

Tietojen perusteella ripaseinärakenne vaikuttaa ominaisuuksiltaan ja kustannuksiltaan järkevimmältä vaihtoehdolta, jolla on mahdollista rakentaa vähintään kahdeksankerroksinen tilaelementtikerrostalo, kunhan jäykistys- ja kantavuusominaisuudet saadaan riittäviksi.

6.3 Toiminta onnettomuusrajatilassa

Onnettomuustilanteessa rakenteen on säilytettävä toimintakyky vähintään niin kauan, että ihminen pääsee poistumaan tai hänet voidaan pelastaa rakennuksesta ja sen välittömästä läheisyydestä. (10/16 Ympäristöministeriön asetus 2016)

Rakenne on suunniteltava tunnistetuilla onnettomuuskuormilla niin, että onnettomuustapauksessa tapahtuva rakenteen vaurioituminen ei saa aiheuttaa kokonaisen rakennuksen tai sen rakenteellisesti tärkeän osan sortumista. Rakenteella on siis oltava riittävä vaurionsietokyky. (10/16 Ympäristöministeriön asetus 2016) Vaurionsietokyky tarkoittaa käsitettä, jossa rakenteen on vastustettava tapauksia, kuten törmäyksiä, tulipaloja, räjähdyksiä tai inhimillisten virheiden seurauksia vahingoittumatta rakenteen alkuperäiseen syyhyn verrattuna suhteettoman laajasti. (SFS-EN 1991-1-7)

Vaurionsietokyky on varmistettava monikerroksisessa rakennuksessa joko sidejärjestelmällä tai suunnitteleamalla vaihtoehtoinen kuormansiirtymisreitti. Sidejärjestelmä on suunniteltava niin, että rakennuksen vaurionsietokyky ja sitkeys paranevat vaurion seuraamusten suurentuessa. (10/16 Ympäristöministeriön asetus 2016)

Vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti on suunniteltava niin, ettei paikallinen vaurio ylitä 10/16 Ympäristöministeriön kohdan 4 § rajoja. Paikallisen vaurioitumisen hyväksyttävä raja riippuu rakennustyyppistä. Tässä tapauksessa kyseessä on monikerroksinen rakennus, jolloin yhdessä kerroksessa paikallisen vaurion laajuus saa olla enintään 15 % kerroksen lattiapinta-alasta ja enintään 100 m² yhdessä kerroksessa. Tässä tapauksessa vaurio voidaan hyväksyä päällekkäin kahdessa kerroksessa. (10/16 Ympäristöministeriön asetus 2016)

Jos vaihtoehtoista kuormansiirtoreittiä ei löydy tai sen löytäminen johtaa kohtuuttomaan rakenneratkaisuun voidaan vaurionsietokyvyn parantamisessa käyttää avainasemassa olevan rakennusosan tapaa siten, että rakennuksen vaurionsietokyky kasvaa huomattavasti. Tässä tapauksessa suunnitellaan rakenteen stabiilisuuteen vaikuttavat avainasemassa olevat rakennusosat niin, että ne kestävät onnettomuuskuormien vaikutukset. Avainasemassa olevaan rakennusosaan vaikuttava onnettomuuskuorma on määritettävä riskiarvioinnin perusteella. (10/16 Ympäristöministeriön asetus 2016, SFS-EN 1991-1-7)

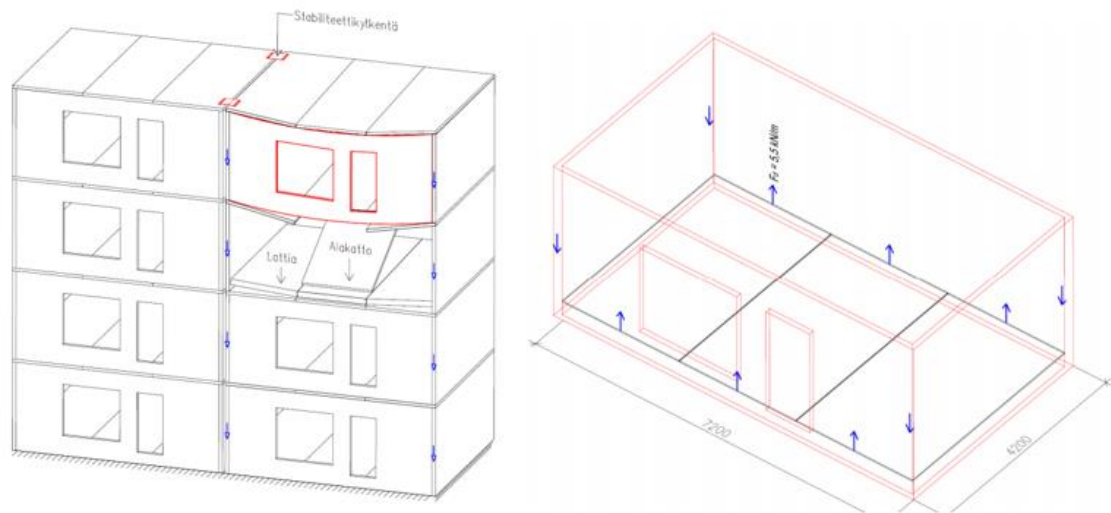
Onnettomuusmitoitustilanteessa rakennukset jaotellaan seuraamusluokkiin CC1, CC2 tai CC3 vaurion seuraamuksen mukaisesti. Kun kyseessä on pienet seuraamukset hengenmenetysten tai vähäisten ja merkityksettömien sosiaalisten, taloudellisten tai ympäristövahinkojen johdosta, luokaksi valitaan CC1 ja suurissa vaurion seuraamuksissa luokaksi valitaan CC3. Tässä työssä kyseessä on kahdeksan kerroksinen puukerrostalo, jolloin seuraamusluokka on CC2b. Jos asuinrakennus on 9–15 kerroksinen niin seuraamusluokaksi valitaan CC3a. (Lahtela 2018; SFS-EN 1990)

CC2b seuraamusluokassa jatkuvan sortuman estämiseen on esitetty kaksi erilaista menetelmää. Ensimmäisessä menetelmässä käytetään sidejärjestelmää, jossa on huomioitava sekä vaakasidonta tai vaakarakenteen sidonta seiniin että pystysidonta. Toisessa menetelmässä apuna käytetään vaihtoehtoista kuormansiirtoreittiä. (Lahtela 2018)

Jatkuvan sortuman estämisessä toimivin ratkaisu puukerrostalossa on vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti, koska puurakenteet ovat painoltaan kevyempiä ja jänneväliltään suhteellisen lyhyitä verrattuna betonirakenteisiin. Betonirakenteissa jatkuva sortuma estetään usein sidejärjestelmällä, sillä betonirakenteet sisältävät paljon raudoituksia, jotka

kestävät suuria sidevoimia. (Puuinfo, Vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti jatkuvan sortuman estämisessä 2020)

CC2b seuraamusluokan tilaelementtikohteessa suositeltavaa on käyttää vaihtoehtoista kuormansiirtoreittiä. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki tilaelementtikohteen vaihtoehtoisesta kuormansiirtoreitistä, jossa vaurioituneen seinän yläpuolinen elementti vie kuormitukset poikittaisille seinille. (Lahtela 2018)



Kuva 7. Vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti (Lahtela 2018)

Jatkuvan sortuman estäminen tulee ottaa huomioon jo varhaisessa vaiheessa suunnittelun alettua, koska se vaikuttaa oleellisesti rungon ja liitosten suunnitteluun. Vaihtoehtoisia kuormansiirtoreittejä kannattaa miettiä huolellisesti niin, että rakenteet saadaan optimoituja myös onnettomuustilanteen näkökulmasta. (Puuinfo, Vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti jatkuvan sortuman estämisessä 2020)

Kuvan 7 mukaisella vaihtoehtoisella kuormansiirtoreitillä tarkoitetaan menetelmää, jossa onnettomuustilanteessa menetetyn kantavan rakennusosan kuormitukset ohjataan perustuksille vaihtoehtoisia reittejä pitkin. Vaihtoehtoisina kuormansiirtoreitteinä voidaan pitää esimerkiksi seinämäisiä palkkeja tai vaakarakenteiden jatkuvuutta. Mitoituksessa käytetään onnettomuustilanteen kuormituksia. (Puuinfo, Vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti jatkuvan sortuman estämisessä 2020)

Kuvan 7 tilanteessa on hyödynnetty seinämäisiä palkkeja vaihtoehtoisien kuormansiirtoreitin muodostamisessa. Kantavaseinäisessä runkojärjestelmässä tämä on toimivin ratkaisu, sillä ääni- ja värähdysteknisistä syistä asuinkerrostalossa ei voida tehdä jatkuvia vaakarakenteita huoneistosta toiseen. Kuvan 7 menetetyn seinän yläpuoliset seinät mitoitetaan toimimaan onnettomuustilanteessa seinämäisenä palkkina, johon vaakarakenteiden

teet ovat kiinnitetty. (Puuinfo, Vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti jatkuvan sortuman estämisessä 2020) Ripaseinärakenteen kohdalla vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti tarkoittaisi sitä, että seinät tulee mitoittaa niin, että ne toimivat onnettomuustilanteessa seinämäisinä palkkeina. Lisäksi seinän sortuessa seinäelementtien nurkka-alueilla tulee olla yläpuolelta tulevia pistemäisiä pystykuormia välittäviä rakenteita, jotka voivat olla esimerkiksi järeämpiä puupilareita.

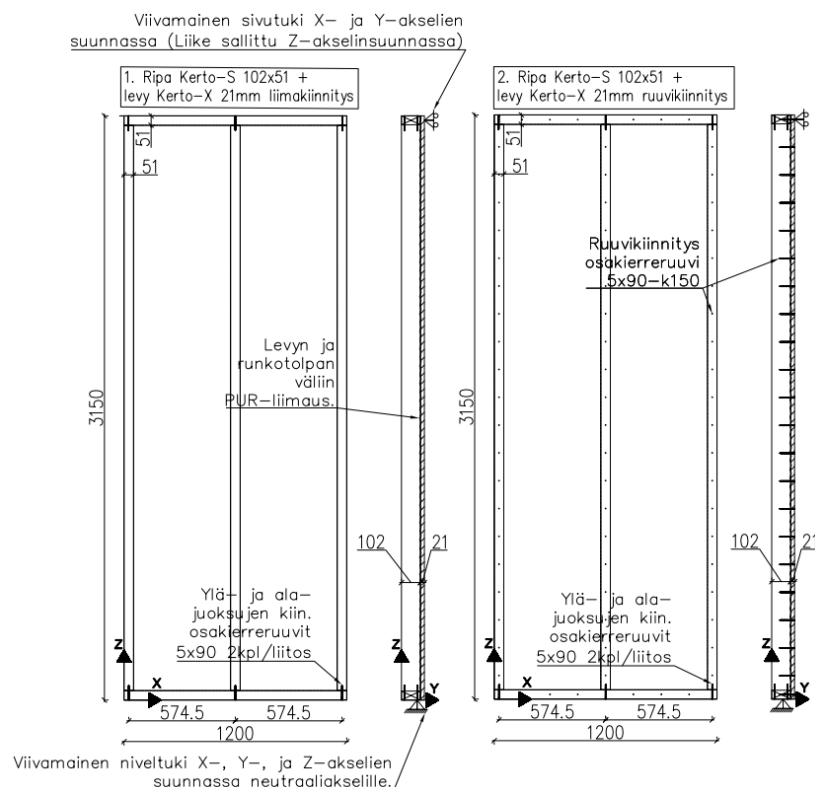
Stabiliteetin turvaamiseksi erillään olevat huoneistot täytyy aina kiinnittää toisiinsa esimerkiksi teräslevyillä, jolloin rungosta saadaan yhtenäinen kokonaisuus stabiliteetit näkökulmasta. Tämä toimii myös onnettomuustilanteessa, jolloin viereiset huoneistot stabiloivat vaurioitunutta aluetta. (Puuinfo, Vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti jatkuvan sortuman estämisessä 2020)

7. RIPASEINÄ-KOERAKENTEET

7.1 Rakenne 1 ja 2

Työhön valitaan neljä erilaista seinärakennetta, jotka ovat paksuudeltaan ja korkeudeltaan yhteensopivia Lehto Components Oy:n tilaelementtien kanssa. Rakennevaihtoehdot valitaan niin, että päästään tutkimaan LVL-levyn paksuuden ja kiinnitystavan vaikutusta seinärakenteen kantavuusominaisuuksiin. Seinärakenteiden valinnoissa on huomioitu se, että ne olisi mahdollista valmistaa Lehto Components Oy:n valmiilla tuotantolinjoilla kustannustehokkaasti.

Seinät suunnitellaan niin, että ne ovat ylä- ja alareunoista tuettuja. Seinän yläreunassa vaikuttaa viivamainen sivutuki, joka tukee seinää x- ja y-suunnissa mutta sallii pystysuuntaisen liikkeen. Alareunassa vaikuttaa viivamainen niveltuki, joka tukee seinää x-, y- sekä z-suunnissa. Seinärakenteet ovat 3150 mm korkeita ja 1200 mm leveitä. Kuvassa 8 on esitettyä kaksi ensimmäistä rakennevaihtoehtoa.



Kuva 8. Rakennevaihtoehdot 1 ja 2.

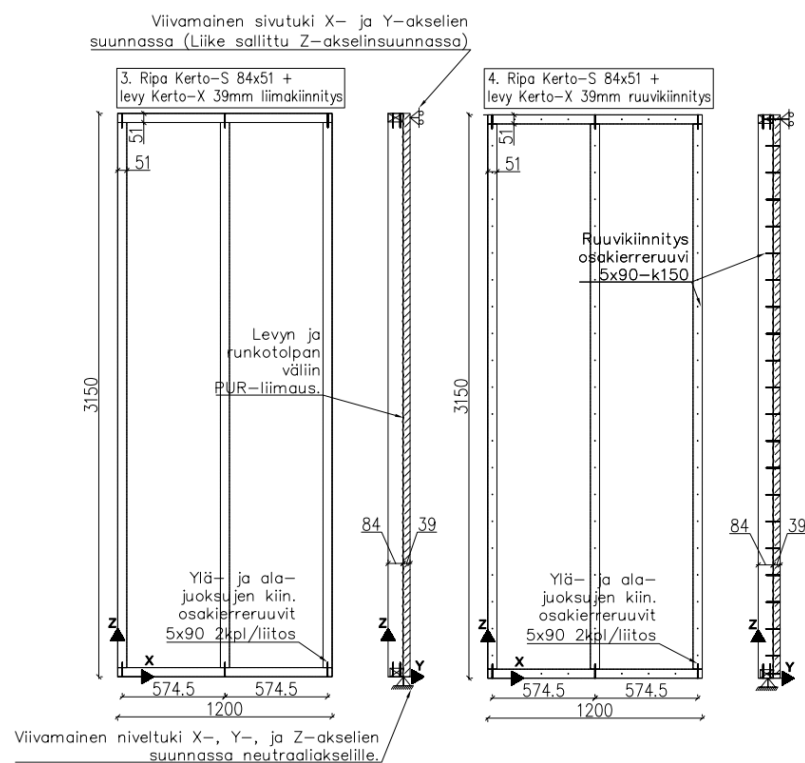
Ensimmäinen rakennevaihtoehto on LVL-S –ripa 102 * 51 mm + LVL-X –levy 21 mm liimakiinnityksellä. Rivat ovat kiinni levyssä 574,5 mm jaolla ja ylä- ja alapäissä on juoksupuut, jotka kiinnitetään osakierruuvein ripoihin. LVL-levy kiinnitetään ripoihin sekä

ylä- ja alajuoksuihin polyuretaaniliimalla (PUR). Liima sivellään rivan sekä ylä- ja alajuoksun syrjäpinnalle.

Toinen rakennevaihtoehto on LVL-S –riipa 102 * 51 + LVL-X –levy 21 mm ruuvikiinnityksellä. Materiaalit, ripajako sekä ylä- ja alapäissä olevien juoksupuiden kiinnitys toteutetaan samalla tavalla kuin aiemmassa mutta LVL-X –levy kiinnitetään ripoihin 150 mm jaolla osakierreruuvein.

7.2 Rakenne 3 ja 4

Seuraavat rakenteet eroavat levyn paksuudessa ja ripojen koossa. Kuvassa 9 on havainnollistettu rakennevaihtoehtoja 3 ja 4.



Kuva 9. Rakennevaihtoehdot 3 ja 4.

Kolmas rakennevaihtoehto on LVL-S –riipa 84 * 51 mm + LVL-X –levy 39 mm liimakiinnityksellä. Rivat ovat kiinnitetty LVL-X –levyyn 574,5 mm jaolla ja ylä- ja alapäissä on juoksupuut, jotka kiinnitetään osakierreruuvein ripoihin. Levy kiinnitetään ripoihin sekä ylä- ja alajuoksuihin polyuretaaniliimalla (PUR). Liima sivellään ripojen sekä ylä- ja alajuoksun syrjäpinnalle.

Neljäs rakennevaihtoehto on LVL-S –riipa 84 * 51 mm + LVL-X –levy 39 mm ruuvikiinnityksellä. Materiaalit, ripajako sekä ylä- ja alapäissä olevien juoksupuiden kiinnitys toteutetaan samalla tavalla kuin edellisessä mutta levy kiinnitetään ripoihin 150 mm jaolla osakierreruuvein.

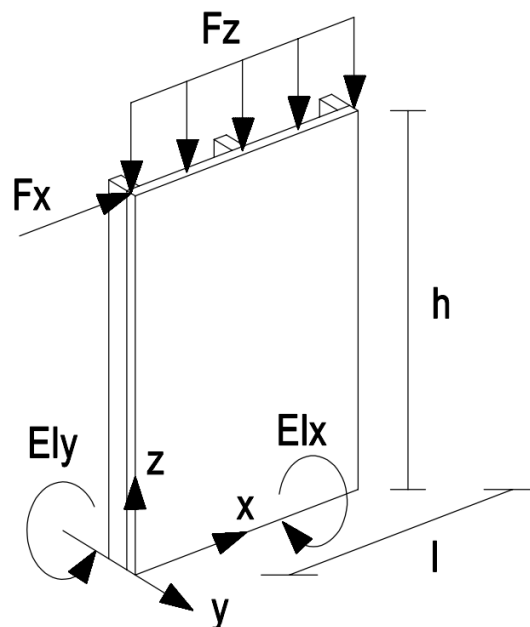
8. RIPASEINÄRAKENTEEN ANALYYTTINEN TARKASTELU

Mahdollisia rakennevaihtoehtoja tilaelementin kantavaksi seinärakenteiksi vertaillaan analyttisesti tarkastelemalla seinäelementtien kantavuus- ja jäykkyysominaisuuksia. Rakenteiden mitoitus on esitetty liitteessä 1 ja tarkastellut koerakenteet on esitetty kappaleessa 7. Analyttisen tarkastelun tuloksia verrataan FEM-laskennan tuloksiin kappaleessa 9.

Seinärakenne palomitoitetaan hyödyntäen RIL 205-2-2019 sekä paloturvallinen puutalon liitettä kaksi. Palomitoituksessa tavoitteena on saavuttaa 90 minuutin palonkesto aika seinälle. Rakenteen palomitoitus on esitetty liitteessä 2. (RIL 205-2-2019; Puuinfo 2021, Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen, liite 2)

8.1 Jäykkyysominaisuudet

Rakenteista määritetään taivutusjäykkyydet rakenteen x- ja y-suunnissa. Kuvassa 10 on esitetty rakenteen koordinaatisto ja havainnekuva. Kuvassa mitta h on elementin korkeus ja l on elementin leveys.



Kuva 10. Testirakenteen koordinaatisto.

8.1.1 Taivutusjäykkyys y-suunnassa

Y-suuntainen eli heikomman suunnan taivutusjäykkyys on taivutus levyypintaa vasten kohtisuorassa suunnassa. Taivutusjäykkyys y-suunnassa (E_{ly}) määritetään hyödyntäen

rakenteen luomaa T-poikkileikkausta. Kuvassa 6 on havainnekuva rakenteen luomasta T-poikkileikkauksesta. T-poikkileikkauksen perusteella oleellista laskennan kannalta on määrittää rakenteen tehollinen leveys. T-pilareille tehollinen leveys lasketaan käyttäen kaavaa (3). (RIL 205-1-2017)

$$b_{ef} = \min (b_{c.ef} + b_2, k) \quad (3)$$

missä

$b_{c.ef}$ on laipan toimiva leveys

b_2 on rivan leveys

k on ripajako

Laipan toimiva leveys määritetään RIL 205-1-2017 taulukon 9.1 mukaisesti. Toimivan leveyden enimmäisarvot on määritetty materiaaleittain leikkauksen ja lommahduksen suhteen. Kaavassa (4) on esitetty kaava laipan toimivan leveyden laskentaan. (RIL 205-1-2017)

$$b_{c.ef} = \min (0.1 * h, 20 * h_1) \quad (4)$$

missä

h on seinäelementin korkeus

h_1 on levyn paksuus

Rakenteet eroavat toisistaan merkittävästi ripojen ja levyn kiinnitystavoissa. Kiinnitystapa vaikuttaa taivutusjäykkyyteen huomattavasti. Taivutusjäykkyys y-suunnassa määritetään hyödyntäen kaavaa (5).

$$EI_x = \sum_{i=1}^3 (E_i * I_i + \gamma_i * E_i * A_i * a_i^2) \quad (5)$$

Kaavan tekijät on esitetty seuraavissa kaavoissa (6)–(11). Kimmokertoimen E_i arvona käytetään materiaalien mukaisia kimmokertoimia.

$$A_i = b_i * h_i \quad (6)$$

$$I_i = \frac{b_i * h_i^3}{12} \quad (7)$$

$$\gamma_2 = 1 \quad (8)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_i * A_i * s}{K_i * h^2}} \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 * E_1 * A_1 * (h_1 + h_2)}{2 * \sum_{i=1}^2 \gamma_i * E_i * A_i} \quad (10)$$

$$a_1 = \frac{1}{2} * (h_1 + h_2) - a_2 \quad (11)$$

missä

b_i	on rakenteen leveys
h_i	on rakenteen paksuus
E_i	on rakenteen kimmokerroin
A_i	on rakenteen pinta-ala
s	on liitin jako
K_i	on siirtymäkerroin
h	on seinän korkeus
γ_1	on liitoskerroin
γ_2	on liitoskerroin
a_1	on levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselista
a_2	on neutraaliakselin etäisyys rivan painopisteakselista

Y-suuntaisessa taivutusjäykkyydessä rungon kiinnitystapa huomioidaan kaavassa (9). Liimakiinnityksessä liitos on jäykkä, jolloin kaava (9) ei toimi vaan kertoimen γ_1 arvona käytetään arvoa yksi. Mekaanisin liittimin kiinnitetty rakenne ratkaistaan kaavan (9) mukaisella kaavalla. Silloin liitos on joustava rivan suunnassa ja kaava toimii halutulla tavalla. Kaavassa (9) esiintyvä siirtymäkertoimen arvo on määritetty kaavan (12) mukaisesti, joka on siirtymäkerroin esiporaamattomille liittimille. (RIL 205-1-2017)

$$K_i = \frac{\rho_m^{1,5}}{23} * d \quad (12)$$

missä

ρ_m	on materiaalin tiheys
d	on ruuvien halkaisija

Y-suuntaisten taivutusjäykkyyksien avulla päästään käsiksi rakenteiden kestävyysiin ja se on tärkeää pohjatietoa määritettäessä seinien kantavuusominaisuuksia.

8.1.2 Taivutusjäykkyys x-suunnassa

Taivutusjäykkyys x-suunnassa (EI_x) tarkoittaa tason suuntaista taivutusjäykkyyttä. X-suuntaisen taivutusjäykkyyden laskentaan vaikuttaa oleellisesti rakenteiden kiinnitystapa sekä rakenteen poikkileikkauksen mitat.

Liimakiinnitteisessä rakenteessa kokonaisjäykkyys tason suunnassa lasketaan kaavan (13) avulla.

$$C_y = \frac{1}{\frac{h^3}{3*EI_y} + \frac{6*h}{5*G_{mean}*A}} \quad (13)$$

missä

h on elementin korkeus

EI_y on taivutusjäykkyys x-suunnassa

G_{mean} on materiaalin liukukerroin

A on levyn poikkileikkauksen pinta-ala

X-suunnan taivutusjäykkyys lasketaan kaavan (14) mukaisesti.

$$EI_y = E_{mean.i} * I_i + 2 * E_{mean.j} * (I_j * A_j * k^2) \quad (14)$$

missä

$E_{mean.i}$ on levyn kimmokerroin

I_i on levyn neliömomentti

$E_{mean.j}$ on rivan kimmokerroin

I_j on rivan neliömomentti

A_j on rivan poikkipinta-ala

k on ripajako

Ruuvikiinnityksellä kiinnitettävän rakenteen kokonaisjäykkyys tason suunnassa lasketaan kaavan (15) avulla.

$$C_y = \frac{1}{\beta_1 * \frac{s*h^2}{K_i*l^3} + \frac{h}{l*G_i*h_f}} \quad (15)$$

missä

s on liitin jako

h on elementin korkeus

K_i on siirtymäkerroin Kaavan (12) mukaisesti

l on elementin leveys

G_j on levyn liukukerroin

h_f on levyn paksuus

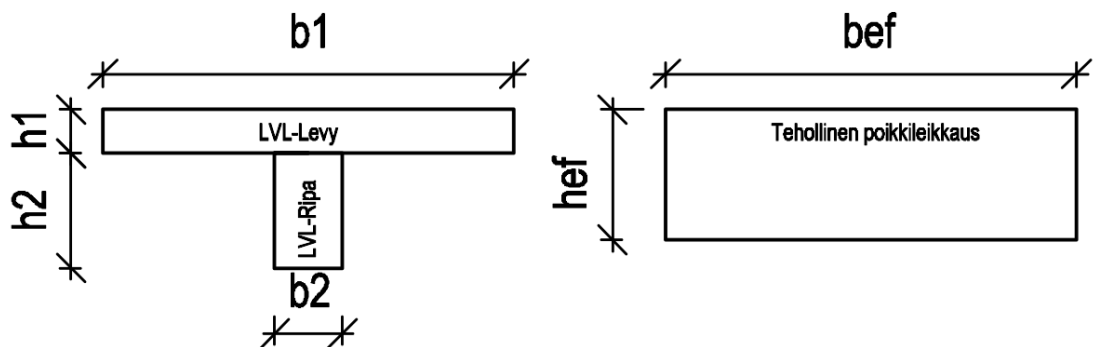
Kaavassa (15) esiintyvä kiinnitystapakerroin β_1 määritetään RIL 205-1-2017 kuvan 9.13S mukaisesti. (RIL 205-1-2017)

X-suuntaisella taivutusjäykkyydellä on oleellinen merkitys tilaelementtikerrostalon jäykistystä määritettäessä. Tason suuntaisen taivutusjäykkyyden avulla voidaan määrittää rakenteen kapasiteetti siirtymän suhteen.

8.2 Nurjahduskestävyys

Rakenteen nurjahduskestävyys lasketaan huomioiden puristuksen ja taivutuksen osuudet. Ripojen heikomman suunnan nurjahdus on estetty levytyksellä, joten tarkasteltavaksi jää mitoitus vahvemmassa suunnassa.

Nurjahduskestävyys on määritetty hyödyntäen puristetun sauvan nurjahduskestävyyden laskentamallia RIL 205-1-2017 kohdan 6.3.2 mukaisesti. (RIL 205-1-2017) Rakenne mitoitetaan hyödyntäen tehollista suorakaiteen mallista rakennetta sekä todellista T-poikkileikkausta. Kuvassa 11 on havainnollistettu kumpikin rakenne.



Kuva 11. Todellinen- ja tehollinen poikkileikkaus.

Kuvassa 11 vasemman puolimmainen on todellinen poikkileikkaus ja oikean puolimmainen on tehollinen poikkileikkaus. Molemmissa poikkileikkauksissa rakenteen leveytenä käytetään kaavan (3) mukaista rakenteen tehollista leveyttä. Tehollista poikkileikkausta hyödyntämällä tehollinen paksuus määritetään kaavan (16) avulla.

$$h_{ef} = \sqrt[3]{\frac{12 * EI_x}{b_{ef} * E_i}} \quad (16)$$

missä

EI_x on kaavan (3) mukainen taivutusjäykkyys y-suunnassa

E_i on levyn kimmokerroin

b_{ef} on rakenteen tehollinen leveys kaavan (1) mukaisesti

Nurjahduskestävyyden käyttöaste vahvemmassa suunnassa määritetään kaavan (17) avulla.

$$\frac{\sigma_{c.o.d}}{k_{c,y} * f_{c.o.d}} + \frac{\sigma_{m,y.d}}{f_{m.d}} \leq 1 \quad (17)$$

Kaavassa (17) puristusjännitys $\sigma_{c.o.d}$ lasketaan jakamalla pystysuuntaisen mitoituskuorman osuus rakenteen poikkipinta-alalla. Tehollisessa poikkileikkauksessa poikkipinta-ala lasketaan kertomalla kaavan (3) tehollinen leveys kaavan (16) mukaisella tehollisella korkeudella. Kaavan (17) puristuslujuus $f_{c.o.d}$ on määritetty LVL-levyn syiden suuntaisen puristuslujuuden $f_{c.o.k}$ avulla. Kaavoissa (18)–(24) on esitetty nurjahduskertoimen ja jännityksen laskentaan käytettävät kaavat, joita tarvitaan kaavan (17) laskentaan. (RIL 205-1-2017) Kimmokertoimien E_i ja $E_{0.05}$ arvoina käytetään materiaalien mukaisia kimmoker-toimia.

$$\sigma_{m,y.d} = \frac{6 * M_{y.d}}{b_{ef} * h_{ef}^2} \quad (18)$$

$$\sigma_{m,y.d} = \frac{E_i}{EI_x} * (\gamma_1 * a_1 + 0.5 * h_1) * M_{y.d} \quad (19)$$

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad (20)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (21)$$

$$\lambda_{y,rel} = \frac{\lambda_y}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c.o.k}}{E_{0.05}}} \quad (22)$$

$$k_y = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{y,rel} - 0,3) + \lambda_{y,rel}^2) \quad (23)$$

$$k_{c,y} = \min \left(\frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{y,rel}^2}}, 1 \right) \quad (24)$$

missä

$M_{y.d}$ on mitoittava momentti huomioiden epäkeskisyydet

b_{ef} on rakenteen tehollinen leveys kaavan (1) mukaisesti

h_{ef} on rakenteen tehollinen korkeus kaavan (16) mukaisesti

EI_x on kaavan (3) mukainen taivutusjäykkyys y-suunnassa

$L_{c,z}$ on nurjahduspituus z-akselin suuntaisessa nurjahduksessa

I_y on rakenteen neliömomentti

A on rakenteen poikkipinta-ala

β_c	on sauvan alkukäyryydestä riippuva kerroin
h_1	on levyn paksuus
a_1	on levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselista
γ_1	on liitoskerroin

Kaavan (18) avulla määritetään tehollisessa poikkileikkauksessa vaikuttava taivutusjännityksen arvo ja kaavalla (19) lasketaan vastaavasti todellisessa poikkileikkauksessa vaikuttava levyn jännityksen arvo ulkopinnassa. Kuormituksen epäkeskisyyks on LVL-levyn painopisteen etäisyys koko poikkileikkauksen neutraaliakselilta. Rakenteen nurjahduspi-tuudessa on huomioitava tilaelementin ylä- ja välipohjat. Rakenteen todellinen nurjahduspi-tuus on noin kattorungon puolesta välistä välipohjapalkin keskiakselille.

Näiden lisäksi todellisesta poikkileikkauksesta on määritettävä rivassa syntyvät jännitykset ja niiden käyttöasteet, jotta voidaan nähdä, ettei rivin jännitykset saavuta täyttä kapasiteettiaan ennen koko poikkileikkauksen murtumista. Rivin käyttöaste jännityksen suhteen lasketaan kaavan (25) avulla.

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (25)$$

missä

$f_{m,d}$	on rivin taivutuslujuus
$\sigma_{m,y,d}$	on kaavan (26) mukainen rivassa vaikuttava jännitys

Kaavassa arvo $\sigma_{m,y,d}$ on rivassa vaikuttava jännityksen arvo ulkopinnassa, joka lasketaan kaavan (26) avulla.

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{E_i}{EI_x} * (-\gamma_2 * a_2 + 0.5 * h_1) * M_{y,d} \quad (26)$$

missä

E_i	on rivin kimmokerroin
a_2	on neutraaliakselin etäisyys rivin painopisteakselista
γ_2	on liitoskerroin

Analyttisen laskennan lisäksi tehollisen poikkileikkauksen tuloksia tutkitaan ja vertailaan FEM-Designin avulla. Ohjelmaan syötetään analyttisen laskennan mukaiset arvot ja kuormaksi syötetään analyttisen laskennan mukainen maksimiarvo rakenteen nurjahduskestävyydelle. Näin FEM-Designista voidaan tutkia, onko analyttinen yksinkertaistettu laskenta toteutettu samalla tavalla kuin FEM-Designin nurjahduskestävyyden

ratkaisee. Nurjahduskestävyyden laskenta ja vertailu FEM-Designin kanssa on liitteessä 1.

8.3 Leikkausvoimakestävyys

Leikkausvoimakestävyys määritetään yksinkertaistetulla menetelmällä, jossa rakenne ratkaistaan levynä. Runkotolpat ovat mukana levyn jäykkyydessä ja levyn paksuutena on rakenteen tehokas paksuus.

Kriittinen leikkausvoima $F_{v.Ed}$ määritetään kaavan (27) mukaisesti.

$$F_{v.Ed} = \frac{\tau_d * t_{ef} * a}{1,5} \quad (27)$$

Kaavassa (27) esitetyt arvot on laskettu kaavojen (28)–(31) avulla. (RIL 205-1-2017)

$$\tau_d = \min(f_{v.crit}, f_{v.d}) \quad (28)$$

$$f_{v.crit} = 3,3 * kk * \sqrt[4]{\frac{EI_x}{EI_z}} * \frac{EI_z}{I} * \left(\frac{t_{ef}}{l}\right)^2 \quad (29)$$

$$t_{ef} = \sqrt[3]{\frac{12 * EI_x}{E_0}} \quad (30)$$

$$EI_z = E_0 * \frac{h_1^3}{12} \quad (31)$$

missä

$f_{v.d}$	on LVL:n leikkauslujuus syrjällä
t_{ef}	on rakenteen tehollinen paksuus
l	on rakenteen leveys
$f_{v.crit}$	on kriittinen leikkausjännitys
kk	on kuvan 9.14eS mukainen lommahduskerroin (RIL 205-1-2017)
EI_x	on taivutusjäykkyys x-akselin suhteen
EI_z	on taivutusjäykkyys z-akselin suhteen
E_0	on levyn kimmokerroin syynsuunnassa
h_1	on levyn paksuus

Leikkausvoimakestävyys on oleellista tutkia, sillä joissain tilanteissa se voi olla mitoittava tekijä tutkittaessa tilaelementtikerrostalossa syntyviä rasituksia. Esimerkiksi pitkissä seinissä leikkausvoimakestävyys saattaa tulla mitoittavaksi tekijäksi.

8.4 Leikkausvoimaresultanttikestävyys liitospinnassa

Leikkausvoimaresultanttikestävyys rivan suunnassa ripojen ja levyn välillä määritetään T-poikkileikkausta hyväksikäyttäen. Leveytenä käytetään kaavan (3) mukaista tehollista leveyttä. Liitospinnan leikkausvoimaresultantti tulee tutkia, jotta saadaan ratkaistua, tuuleeko rakenteessa mitoittavaksi liitoksen kestävyys ennen muita kantavuusominaisuuksia.

Liimaliitoksessa leikkausvoimaresultanttikestävyuden käyttöaste ratkaistaan kaavalla (32).

$$\frac{\tau_d}{f_{v.0.d}} \leq 1 \quad (32)$$

missä

τ_d on leikkausjännitys liitospinnassa

$f_{v.0.d}$ on Levyn leikkauslujuuden mitoitusarvo

Leikkausjännitys liitospinnassa määritetään kaavojen (33)–(36) avulla. (RIL 205-1-2017)

$$\tau_d = \frac{\gamma_i * E_i * a_1 * A_i}{b_2 * EI_x} * V_{d.tuki} \quad (33)$$

$$V_{d.tuki} = V_d * \left(1 - \frac{h_1 - h_2}{0.5 * h}\right) \quad (34)$$

$$V_d = \frac{1}{2} * q_d * k * h \quad (35)$$

$$q_d = \frac{8 * M}{h^2} \quad (36)$$

missä

$V_{d.tuki}$ on leikkausvoima tuella

γ_i on liitoskerroin

E_i on levyn kimmokerroin

a_1 on kaavan (11) mukainen arvo

b_2 on rivan paksuus

EI_x on taivutusjäykkyys x-akselin suhteen

V_d on leikkausvoiman mitoitusarvo

h_1 on levyn paksuus

h_2 on rivan korkeus

h on rakenteen korkeus

q_d	on ekvivalentti vaakakuorma
k	on ripajako
M	on rakenteeseen vaikuttava momentti
A_i	on levyn poikkipinta-ala

Ruuviliitoksessa vaikuttava leikkausvoimaresultantin käyttöaste ratkaistaan kaavan (37) avulla.

$$\frac{\tau_l}{R_k} \leq 1 \quad (37)$$

missä

τ_l	on liittimeen kohdistuva leikkausvoima
R_k	on liittimen leikkauskestävyyden ominaisarvo (Kerto-käsikirja)

Liittimeen kohdistuva leikkausvoima määritetään kertomalla kaavan (33) mukainen leikkausjännitys liittimien jaolla s sekä rivan leveydellä b_w . Kaavassa (37) oleva liittimen leikkauskestävyyden ominaisarvo määritetään Metsä Woodin Kerto-käsikirjaa hyväksikäyttäen. Liittimen leikkausjännityksen ominaisarvo määritetään kaavojen (38)–(44) avulla. (Kerto-käsikirja)

$$R_k = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,4 * f_{h.k} * t_u * d_{ef} * \sqrt{1 + \frac{3 * M_y}{f_{h.k} * d_{ef} * t_u^2}} \\ 2 * \sqrt{M_y * f_{h.k} * d_{ef}} \end{array} \right. \quad (38)$$

$$f_{h.k} = \frac{f_{h.0.k}}{k_{90} * \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad (39)$$

$$f_{h.0.k} = 0,082 * (1 - 0,01 * d_{ef}) \quad (40)$$

$$k_{90} = 1,3 + 0,015 * d_{ef} \quad (41)$$

$$t_u = \frac{t_2 * f_{h.k}}{f_{h.k}} \quad (42)$$

$$d_{ef} = 1,1 * d \quad (43)$$

$$M_y = 0,3 * f_{u.k} * d_{ef}^{2,6} \quad (44)$$

missä

$f_{h.k}$	on reunapuristuslujuus
d_{ef}	on liittimen tehollinen leveys
M_y	on liittimen myötömomentti

t_u	on tunkeumasyvyyteen liittyvä kerroin
$f_{h.o.k}$	on reunapuristuslujuuden laskenta-arvo
k_{90}	on laskentakerroin
t_2	on liittimen kärkiosan tunkeuma
d	on liittimen paksuus
$f_{u.k}$	on liittimen vetomurtolujuuden ominaisarvo

Rakenteeseen vaikuttava momentti määritetään seinälle tulevan kuorman ja epäkeskisyyden perusteella. Kuormituksen epäkeskisyys on LVL-levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta.

8.5 Palomitoitus

Työssä tutkitaan ulko- ja väliseinissä sijaitsevaa seinärakennetta. Palomitoitus on oleellinen osa seinien suunnittelua, kun halutaan löytää optimaalisin ratkaisu. Palomitoituksen lähtökohdaksi otettiin se, että seinien ja kattojen tulisi kestää 90 minuutin paloa, jolloin voidaan suojaverhoamatonta katto- ja seinäpintaa palo-osastoittain hyväksyä jopa 80 %. (Lahtela 2018) Seinän palomitoitus on liitteessä 2.

Palotilanteessa puurakenteen kantavuus voidaan mitoittaa kolmella erilaisella tavalla: rakenne on suojaamaton, rakenne on suojattu koko vaaditun palonkeston tai rakenne on suojattu osan vaaditusta palonkestosta. Tässä työssä tutkittava seinärakenne kuuluu viimeiseen tapaan, jossa kantavaa rakenneosaa on suojattu siten, että se kestää palotilanteen kuormat vaaditun palonkeston ajan, mutta ehtii hiiltä kipsilevyjen alapuolelta. (Lahtela 2018)

Kun puurakenne on suojattu osaksi vaaditusta palonkestosta, tulee palonsuojaustuotteesta tietää hiiltymisen alkamishetki t_{ch} sekä suojauksen murtumishetki t_f . Palolta suojaava tuote suoja puurakennetta hiiltymiseltä ajanhetkeen t_{ch} asti. Puurakenne paljastuu ja alkaa hiiltä tavallista kovemmalla teholla ajan hetkellä t_f , jolloin palonsuojaus murtuu. Tavallista kovemmalla teholla tapahtuva hiiltymisen jatkuu, kunnes saavutetaan 25 mm hiiltymissyvyys. Tässä työssä pyritään rakennetta suojaamaan palolta niin ettei 25 mm hiiltymistä pääse tapahtumaan eikä suojaavat rakenneosat pääse murtumaan kokonaan missään vaiheessa. (Lahtela 2018)

Kun rakennusosa on osaksi palonkestoajasta suojattu alkaa rakenteen hiiltymisen ajanhetkestä t_{ch} . Kun vaadittava palonkesto-aika on lopussa jää hiiltyneestä puurakenteesta jäljelle tehollinen poikkileikkaus sekä nimellinen jäännöspoikkileikkaus. (Lahtela 2018)

Palomitoituksessa oleellista on stabiiliteettitarkastelu. Ennen palomitoitusta on tärkeää tarkastella rakenneosien ja koko rakennuksen rungon toimintaa stabiiliteetin näkökulmasta. Joissain tapauksissa palotilannetta varten tarvitaan erillinen stabiiliteettituenta. Tässä työssä pyritään siihen, että LVL-levy ei pala vaaditun palonkeston aikana missään vaiheessa kokonaan pois, joka auttaa stabiiliteettitarkasteluissa. (Lahtela 2018)

Puurakenteet tulisi suunnitella siten, että ne palosuojataan koko vaaditun palonkestoajan. Mikäli kuitenkin hiiltymiseltä ei voida välttyä järkevin ratkaisuin, tulisi rakenteissa käyttää niin järeitä rakenneosia, että erillisiä palotilanteen stabiiliteettituentoja ei tarvittaisiin. (Lahtela 2018)

8.5.1 Seinän palomitoitus

Työssä seinän palomitoitusta lähdetään ratkaisemaan hyödyntäen RIL 205-2-2019 standardia sekä paloturvallisen puutalon esimerkkilaskelmia liitteestä kaksi. Vaadittavaksi palonkestoajaksi valitaan $t = 90$ minuuttia. Rakennetta suojataan kahdella 15 mm paksuisella palokipsilevyllä. Palokipsilevy on F-tyyppin kipsilevy. (RIL 205-2-2019)

Laskentaa varten paloa vasten olevalle LVL-levylle tarvitaan hiiltymisnopeuden mitoitusarvot. Mitoitusarvot löytyvät taulukosta 3.2. LVL-levy on yksidimensionaalinen, sillä palo vaikuttaa vain yhdelle sivulle. Tästä johtuen LVL-levyn hiiltymisnopeuden mitoitusarvoksi valitaan $\beta_0 = 0,65$ mm/min. (RIL 205-2-2019)

Palokipsilevyrakenteen kokonaispaksuus voidaan määrittää taulukon 3.4S mukaisesti. Taulukosta löytyy arvot ratkaisulle, jossa käytetään kahta 15 mm paksua F-tyyppin palokipsilevyä. Levyjen kokonaispaksuutena käytetään arvoa $h_p = 27$ mm. (RIL 205-2-2019)

Taulukon 4.5S avulla voidaan määrittää seinärakenteen hiiltymisen alkamishetki t_{ch} , levyjen murtohetki t_f sekä kerroin k_2 , joka on kerroin hiiltymisnopeudelle ennen palosuojauksen murtumista. Rakenteen sisältäessä kaksi F-tyyppin palokipsilevyä, joiden neliöpaino on vähintään $12,7$ kg/m² hiiltymisen alkamishetkenä voidaan käyttää $t_{ch} = 65$ min. Kertoimena k_2 tässä tapauksessa voidaan käyttää arvoa $k_2 = 0,6$. Lisäksi levyjen murtohetkeksi taulukon 4.5S mukaan on määritetty suurempi kuin 90 minuuttia, joka on samalla tarvittava palonkesto aika rakenteelle. Tästä johtuen levyt eivät ehdi murtua vaaditussa palonkestoajassa, jolloin hiiltymisnopeutta ei tarvitse määrittää palokipsilevyjen murtumisen jälkeen. (RIL 205-2-2019)

Hiiltymisnopeus ennen palokipsilevyn murtumista lasketaan kaavan (45) avulla.

$$\beta_n = k_s * k_2 * k_n * \beta_0 \quad (45)$$

missä

k_s	on poikkileikkauskerroin taulukon 4.3S mukaisesti (RIL 205-2-2019)
β_0	on hiiltymisnopeuden mitoitusarvo (RIL 205-2-2019)
k_2	on kerroin (RIL 205-2-2019)
k_n	on kerroin, jolla epäsäännöllisesti hiiltynyt jäännöspoikkileikkaus muunnetaan nimelliseksi suorakaidepoikkileikkaukseksi.

Rakenteen nimellinen hiiltymissyvyys lasketaan kaavalla (46), jonka avulla saadaan määritettyä kaavan (47) mukainen tehollinen hiiltymissyvyys.

$$d_{char.n} = \beta_n * (t_f - t_{ch}) \quad (46)$$

$$d_{ef} = d_{char.n} + d_0 * k_0 \quad (47)$$

missä

d_0	on 7 mm (RIL 205-2-2019)
t_f	on levyjen murtohetki (RIL 205-2-2019)
t_{ch}	on hiiltymisen alkamishetki (RIL 205-2-2019)
β_n	on hiiltymisnopeus kaavan (45) mukaisesti (RIL 205-2-2019)
k_0	on taulukon 4.1 mukainen arvo. (RIL 205-2-2019)

Rakenteen mitoituksessa käytetään tehollista poikkileikkausta. Alkuperäisestä poikkileikkauksesta vähennettäessä tehollisen hiiltymissyvyyden d_{ef} verran pois palolle alttiilta sivuilta saadaan rakenteen tehollinen poikkileikkaus. (RIL 205-2-2019)

Rakenteen mitoittavaksi tapaukseksi palotilanteessa tulee nurjahduskestävyys vahvemmassa eli y-suunnassa. X-suunnassa eli heikommassa suunnassa nurjahdusta ei tarvitse tarkastella, sillä rakenteessa on stabiloiva LVL-levy. LVL-levyn ansiosta myöskään kiepahduskestävyyttä ei tarvitse mitoittaa, sillä rakenteen puristettu reuna on tuettu. Ripojen ollessa suorakaiteen muotoisia ei leikkauskestävyyttä tarvitse myöskään tarkastella. Palotilanteessa tarkastelun ulkopuolelle voidaan jättää edellisten lisäksi tukipainekestävyys sekä taipuma. Taipumaa ei tarvitse tarkastella palotilanteessa, ellei siitä ole haittaa osastoiville rakennusosille ja niiden palosuojauksille. (Puuinfo, Paloturvallinen puutalo, liite 2)

8.5.2 Materiaaliominaisuudet palotilanteessa

Palotilanteessa materiaaleille ominaisia materiaaliominaisuuksia voidaan muuttaa murto- tai käyttörajatilan mukaisista arvoista. RIL 205-2-2019 taulukon 2.1 mukaisesti k_{fi}

arvo LVL:lle on $k_{fi} = 1,1$, jolla vaikutetaan rakenteen puristus- ja taivutuslujuuksiin palotilanteessa. (RIL 205-2-2019)

Mekaanista kestävyttä osoitettaessa lujuusominaisuuksien mitoitusarvot ratkaistaan kaavan (48) avulla, jossa lujuusominaisuuden 20 % fraktiili määritetään kaavalla (49). Kaavojen (48) ja (49) avulla määritetään LVL-levyn palotilanteen puristus- sekä taivutuslujuudet.

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} * \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (48)$$

$$f_{20} = k_{fi} * f_k \quad (49)$$

missä

$\gamma_{M,fi}$ on puun osavarmuusluku palotilanteessa

$k_{mod,fi}$ on muunnoskerroin palotilanteessa

f_{20} on lujuusominaisuuksien 20 % fraktiili

f_k on materiaalin puristus- tai taivutuslujuuden ominaisarvo

Suomen materiaaliominaisuuksien osavarmuusluku on $\gamma_{M,fi} = 1$ palotilanteessa. Palotilanteen muunnoskerroin määritetään kaavan (50) mukaisesti. (RIL 205-2-2019)

$$k_{mod,fi} = a_0 - a_1 * \frac{d_{char,n}}{h} \quad (50)$$

missä

a_0 on taulukon 4.8S mukainen kerroin. (RIL 205-2-2019)

a_1 on taulukon 4.8S mukainen kerroin. (RIL 205-2-2019)

$d_{char,n}$ on nimellinen hiiltymissyvyys kaavan (46) mukaisesti

h on tolpan poikkileikkauksen korkeus

8.5.3 Nurjahduskestävyys palotilanteessa

Nurjahduskestävyyksiä mitoittaessa palotilanteessa huomioidaan seinälle vaikuttava z-suuntainen pystykuorma $N_{d,z,fi}$. Hiiltymän aiheuttama epäkeskisyys lasketaan kaavan (51) avulla ja sitä hyödyntäen saadaan rakenteeseen palotilanteessa vaikuttava momentti kaavalla (52). (Puuinfo, Paloturvallinen puutalo, liite 2)

$$e_{ch} = \frac{d_{ef}}{2} \quad (51)$$

$$M_{d,x,fi} = e_{ch} * N_{d,z,fi} \quad (52)$$

missä

d_{ef} on tehollinen hiililyymisyvyys kaavan (47) mukaisesti

$N_{d.z.fi}$ on seinään vaikuttava pystykuorma

Palotilanteen heikomman suunnan nurjahdusta ei tarvitse mitoittaa, sillä tarkoituksena on, että palon jälkeen LVL-levyä on jäljellä, jolloin nurjahduspituus on $L_{c.x.fi} = 0$. Vahvemmassa suunnassa nurjahduskestävyys täytyy tutkia ja tuolloin nurjahduspituus saadaan kaavasta (53).

$$L_{c.y.fi} = 1 * h \quad (53)$$

missä

h on seinän huonekorkeus

Palotilanteen vahvemman suunnan nurjahduskestävyys määritetään kuten vahvemman suunnan nurjahduskestävyys mitoituksessa aiemmin. Mitoituksessa käytetään kaavoja (18) ja (20)–(24). Poikkileikkauksen korkeuden arvona käytetään palon jälkeistä korkeutta h_{fi} , joka saadaan vähentämällä alkuperäisestä korkeudesta kaavan (47) mukainen tehollinen hiililyymisyvyys. Poikkileikkauksen leveyden arvona käytetään ripojen leveyttä. (Puuinfo, Paloturvallinen puutalo, liite 2)

9. RIPASEINÄRAKENTEEN FEM-ANALYYSI

FEM-analyysi toteutetaan käyttäen FEM-Designin 3D structure pääkäyttöliittymää. FEM-analyysin avulla tutkitaan ja vahvistetaan analyyttisen laskennan tuloksia. FEM-Designissa elementit mallinnetaan analyyttisen laskennan kaltaisiksi ja mallinnus pyritään toteuttamaan niin tarkasti kuin mahdollista. Ohjelmaan syötetään erikseen LVL-levylle sekä -rivoille materiaaliominaisuudet, kuten analyyttisessä laskennassa. Elementtien ylä- ja alapäähän asennetaan viivatuet. Yläpäässä viivatuki ottaa vastaan sivuttaisia sekä poikittaisia voimia ja alapäässä näiden lisäksi viivatuki huomioi myös pystykuormituksen, kuten kuvissa 8 ja 9. Viivatuet eivät ota vastaan momenttia. Viivatukien lisäksi tärkeä huomio on kiinnitettävä rivojen ja levyn väliseen viivaliitokseen. Liimaliitoksissa viivaliitoksena voidaan käyttää täysin jäykkää liitosta, mutta ruuviliitoksissa on huomiotava liitoksen siirtymäkerroin K_r , joka on määritetty kaavan (12) mukaisesti. Jäykässä liimaliitoksessa, liitoksen kaikki siirtymäkertoimet on asetettu äärettömän suuriksi, mutta ruuviliitoksessa siirtymäkertoimen z-suuntaista eli rivin suuntaista siirtymäkerrointa muokataan kaavan (12) mukaiseen arvoon, joka huomioi ruuviliitoksen joustamisen rivin suunnassa. Siirtymäkertoimen lisäksi viivaliitokseen lisätään LVL-materiaalille ominainen kitkakerroin, joka RIL 205-1-2017 mukaan on $\mu = 0,4$. (RIL 205-1-2017) Tarkastellut koerakenteet on esitetty kappaleessa 7.

FEM-Designissa elementit mallinnettiin sekä CLT-mallilla (Cross laminated timber), että ortotrooppisella-mallilla (Orthotropic shell), jotta saatiin käsitys millä tyylillä ohjelma antaa toimivimman ratkaisun. CLT-mallilla LVL-rakenteet mallinnettiin kuten todellisuudessa, eli viilukerrokset määritettiin yksitellen todellisen LVL-rakenteen mukaisesti. Ortotrooppisessa-mallissa LVL-rakenteet mallinnettiin yhtenäisenä rakenteena ja rakenteille annettiin LVL:lle ominaiset materiaaliominaisuudet. CLT-mallissa ongelmaksi tuli eri viilukerrosten ominaisuuksien määrittäminen niin, että rakenteesta saadaan samankaltainen kuten LVL-materiaalien ominaisuudet kertovat. Tämä olisi vaatinut hyvin tarkkaa mallintamista ja eri kerrosten huomioimista. Tästä johtuen tässä työssä päädyttiin FEM-Designin rakenteita vertailemaan ortotrooppisen-mallin mukaisilla rakenteilla, jolloin rakenteet pystyttiin mallintamaan yksinkertaisemmin ja mahdollisia virheiden mahdollisuuksia vähennettiin.

9.1 Puristus- ja taivutusjäykkyys

FEM-Designista pyritään ratkaisemaan rakenteiden taivutus- ja puristusjäykkyydet, joita voidaan verrata analyyttisellä laskennalla saatuihin tuloksiin. Taivutusjäykkyyksistä vertailussa on y-suuntainen taivutusjäykkyys. Tuloksien laskenta on liitteessä 1.

Taivutusjäykkyyksiä päästään vertailemaan hyödyntämällä yksiaukkoisen palkin taipuman kaavaa (54). (Mäkelä 2010, s. 148) Kaavan avulla päästään ratkaisemaan seinän taivutusjäykkyys, kun tiedetään seinään vaikuttava kuormitus sekä seinän korkeus ja taipuma. Seinäelementin taipuma saadaan FEM-Designista.

$$EI_x = \frac{5 \cdot q_M \cdot h^4}{384 \cdot d_M} \quad (54)$$

missä

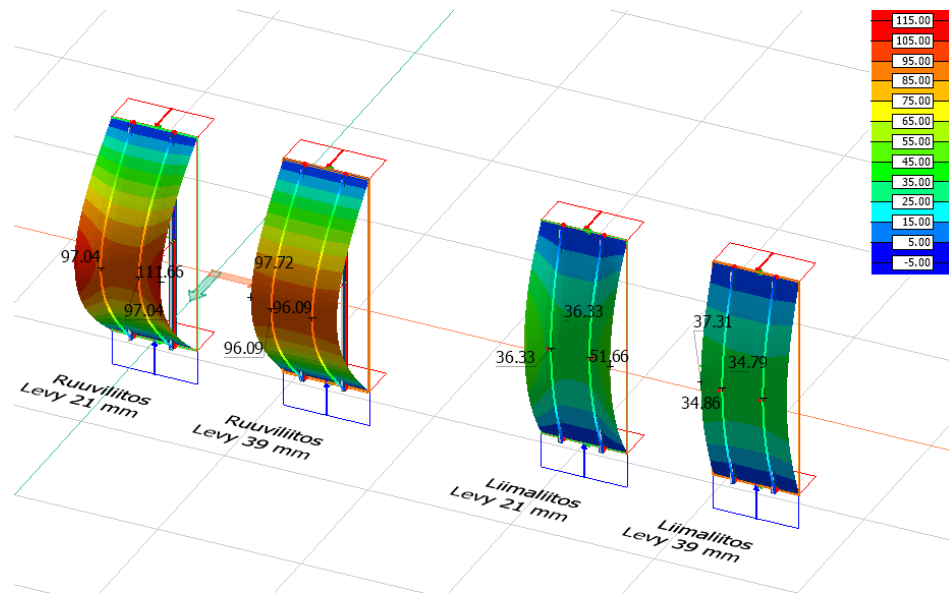
q_M on seinään vaikuttava tasainen vaakakuormitus

h on seinän korkeus

EI_x on seinän taivutusjäykkyys y-suunnassa

d_M on FEM-Designin mukainen seinän keskijänteen taipuma

Rakenteet on mallinnettu FEM-Designiin niin, että elementin reunoilla ei ole ripoja, vaan rivat ovat keskitetty ripajaan mukaisesti elementtiin. Tästä johtuen FEM-Designista saaduista taipuman arvoista ei huomioida reunan taipumaa, vaan vertailuun otetaan rivan kohdalla tapahtuva taipuma vahvempaan suuntaan. Tämä tilanne huomioi parhaiten rivin ja levyn yhteistyön. Todellisessa seinärakenteessa vapaita reunoja ei olisi, vaan seinä jatkuisi yhtenäisenä aina nurkkiin asti. Kuvassa 12 on kuvankaappaus FEM-Designiin mallinnetuista elementeistä, joissa näkyy rakenteiden taipumat, kun niitä kuormitetaan levyn suuntaisella tasaisella kuormituksella, jonka suuruus on 10 kN/m².



Kuva 12. FEM-Design taivutusjäykkyys.

Kuvassa 12 kaksi oikeanpuolimmaista elementtiä ovat liimakiinnitteisiä ja kaksi vasemmanpuolimmaista elementtiä ruuvikiinnitteisiä. Ensimmäinen ja kolmas rakenne oikealta ovat rakenteita, joissa on 39 mm LVL-levy sekä 51 * 84 mm LVL-rivat. Toinen ja neljäs elementti oikealta ovat rakenteita, joissa on 21 mm LVL-levy sekä 51 * 102 mm LVL-rivat. Kuvista huomaa, että oikeanpuolimmaisista liimakiinnitteisistä elementteistä taivutusripojen kohdalta noin 34,79 mm ja 36,33 mm ja vasemmanpuolimmaisista ruuvikiinnitteisistä elementteistä taivutusripojen kohdalta noin 96,09 mm ja 97,04 mm.

Analyttisen- sekä FEM-laskennan puristusjäykkyyksiä päästään vertailemaan hyödyn-tämällä pituuden muutoksen kaavaa (55). (Mäkelä 2010, s.139) Puristusjäykkyys voi-daan ratkaista FEM-Designin avulla, kun tiedetään seinään vaikuttava pistemäinen pystykuormitus sekä pystysuuntainen siirtymä.

$$EA = \frac{N}{d_N} \quad (55)$$

missä

N on seinään vaikuttava pistemäinen pystykuormitus

d_N on seinän pystysuuntainen siirtymä

EA on seinän puristusjäykkyys

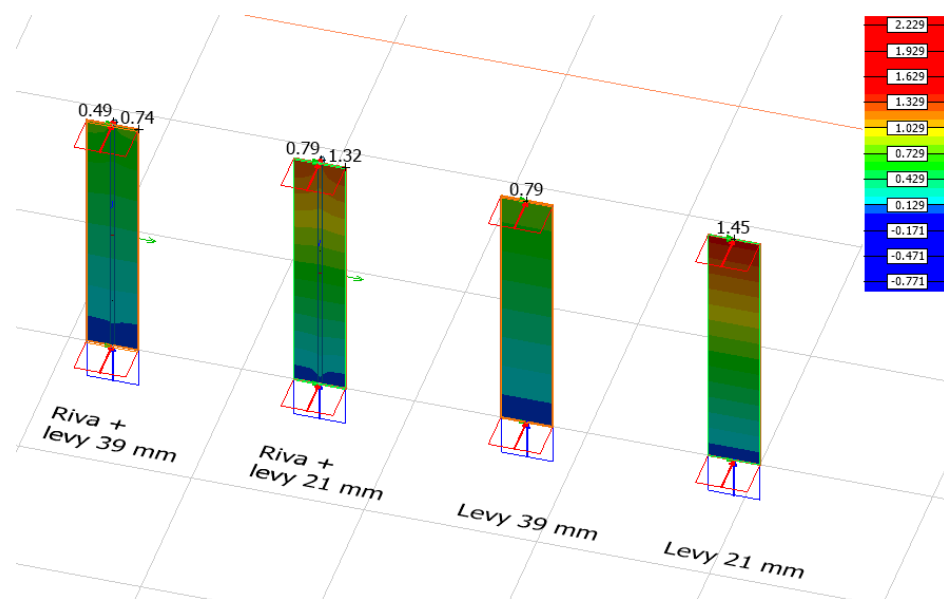
Analyttisessä tarkastelussa puristusjäykkyys seinärakenteelle saadaan kaavalla (56).

$$EA = \frac{E_i * A_i + E_j * A_j}{h} \quad (56)$$

missä

E_i	on levyn kimmokerroin
A_i	on levyn poikkipinta-ala
E_j	on rivan kimmokerroin
A_j	on rivan poikkipinta-ala
h	on seinän korkeus

FEM-designissa puristusjäykkyksiä vertaillaan pelkän LVL-levyn avulla sekä levyllä, johon on lisätty yksi ripa keskitetysti liimakiinnityksellä. Kuvassa 13 on kuvankaappaus FEM-designin puristusjäykkyyden mallinnuksesta, kun elementtejä kuormitetaan pystysuuntaisella kuormituksella, jonka suuruus on 100 kN/m.



Kuva 13. FEM-Design puristusjäykkyys.

Kuvassa 13 kaksi oikean puolimmaista rakennetta ovat pelkkiä levyjä (21 mm ja 39 mm) ja kaksi vasemmanpuolimmaista rakennetta ovat rakenteita, joihin liittyy myös ripa. Kuvan lukuarvot ovat rakenteissa tapahtuvia pystysiirtymiä pystysuuntaisen kuormituksen johdosta. Rakenteissa, joissa on pelkkä levy voi huomata, että maksimi arvoja on vain yksi sillä levyt painuvat tasaisesti. Rivallisista rakenteista voi huomata, että maksimi tuloksia on kaksi kappaletta, sillä rakenne painuu enemmän reunoilta kuin rivan kohdalta. Rivallisessa rakenteessa teoreettisena painuman arvona voidaan käyttää painumien keskiarvoa, sillä todellisuudessa seinärakenteessa ei olisi vapaita reunoja.

9.2 FEM-Design vastaan analyyttinen laskenta

Taulukoissa 2 ja 3 on eriteltynä analyyttisen laskennan sekä FEM-analysoinnin tuloksia eri seinärakenteille. Taulukossa 2 on vertailtu y-suunnan taivutusjäykkyysä ja taulukossa 3 vertailussa on puristusjäykkyudet. FEM-Designin tulosten avulla saadaan vahvistettua analyyttisesti laskettuja tuloksia. Tässä osiossa vertaillaan FEM-Designista ja analyyttisestä laskennasta saatuja tuloksia, mutta itse arvoihin ja eri rakenteiden eroavaisuuksiin ei vielä kiinnitetä huomiota.

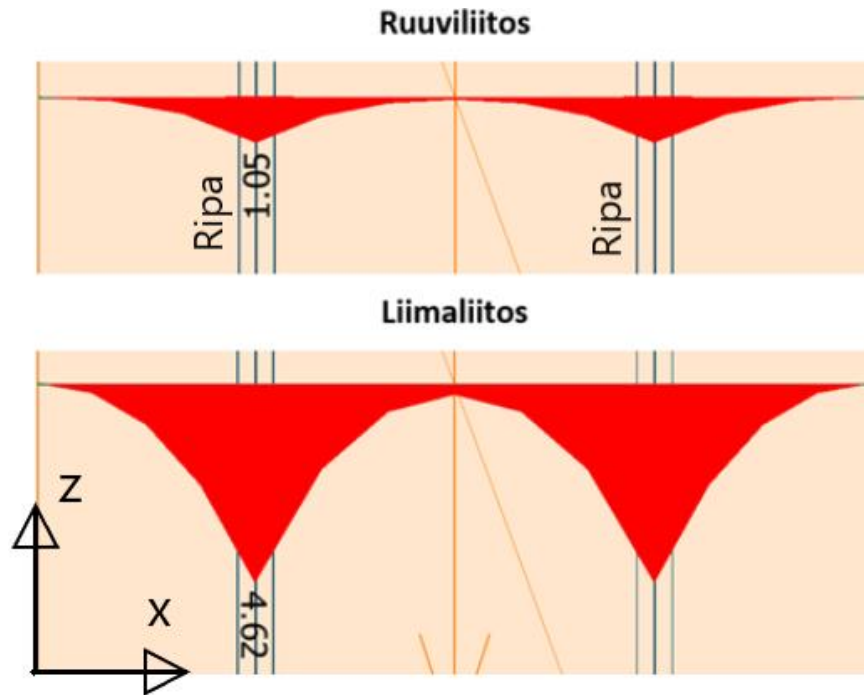
Taulukko 2. Y-suunnan taivutusjäykkyyksien vertailu.

Rakenne (Ripa + levy)	Liimakiinnitys		Ruuvikiinnitys	
	1.) Ripa 102x51 + Levy 21	3.) Ripa 85x51 + Levy 39	2.) Ripa 102x51 + Levy 21	4.) Ripa 85x51 + Levy 39
Taivutusjäykkyys Y (kNm ²)	436,35	447,23	228,16	207,27
FEM-Design (kNm ²)	423,44	441,3	158,53	160,1
Prosentuaalinen ero	3,0 %	1,3 %	30,5 %	22,8 %

Taulukossa 2 on vertailtu analyyttisessä laskennassa sekä FEM-Designilla saatuja tuloksia y-suuntaisen taivutusjäykkyyden osalta. Rakenteiden ollessa liimakiinnitteisiä huomataan, että sekä analyyttisessä laskennassa, että FEM-Designista saadaan melko samansuuruisia tuloksia. Analyyttisen tarkastelun ja FEM-laskennan välinen ero pienee 1,3 % jäykemmän testirakenteen kohdalla. Näin ollen tuloksia voidaan pitää melko luotettavina tämän tutkimuksen osalta.

Taulukon 2 mukaan ruuvikiinnitteisessä rakenteessa eroa havaitaan melko paljon verrattaessa analyyttisen laskennan ja FEM-Designin tuloksia. FEM-Designista saadut tulokset ovat huomattavasti pienempiä kuin analyyttisen laskennan tulokset. Suurin syy tulosten eroon varsinkin ruuviliitoksessa on todennäköisesti tehollisen leveyden b_{ef} eroavaisuus analyyttisessä laskennassa käytettyyn SFS EN 1995-1-1 mukaiseen teholliseen leveyteen, joka on määritetty kaavan (3) perusteella. RIL 205-1-2017 mukaan kaavan (3) mukainen toimivan leveyden laskenta toimii, jos kyseessä on liimattu rakenne. Kaavassa huomioidaan rakenteen lommahduksesta ja leikkausmuodonmuutoksesta johtuva laippojen jännitysten epätasainen jakauma. Tehokkaasta leveydestä käytetään myös nimeä toimiva leveys. (Hytönen 2021; Luntta 2021; SFS EN 1995-1-1; RIL 205-1-2017)

Analyyttisessä laskennassa pyritään aina löytämään tulos, joka on mahdollisimman lähellä todellista tehollista leveyttä. Laskennassa käytetty tehollisen leveyden laskenta perustuu liimaliitoksiseen T-poikkileikkaukseen, joten ruuviliitoksessa tämä ei ole täysin toimiva laskentamenetelmä. Kuvassa 14 on työssä käytettyjen rakenteiden normaalijännitysjaakaumat FEM-Designista, levyn suunnassa poikittain keskeltä levyä.



Kuva 14. Normaalijännitysjaakauma rakenteissa, kun levyrintaan vaikuttaa tasaisesti jakautunut vaakavoima.

Kuvassa 14 ylempi rakenne on ruuviliitoksella kiinnitetty ja alempi rakenne on toteutettu liimaliitoksella. Kuvasta 14 voi huomata, että vaikka kuormitus on molempiin rakenteisiin sama, niin rakenteisiin syntyvät normaalijännitysjaakaumat ovat hyvin erilaiset. Analyytisessä laskennassa tehollisina leveyksinä kumpaankin liitostyyppiin on käytetty samoja arvoja, mutta kuvan 14 mukaisten normaalijännitysjaakumien perusteella voidaan todeta, että todellisuudessa teholliset leveydet ovat erisuuruisia. Ruuviliitoksen joustavuuden takia levyyn kohdistuu taivutuksessa pienempi normaalijännitys, joka johtaa siihen, että kaavojen (3) ja (4) mukaiset laskenta kaavat antavat suuremman tuloksen, mitä ruviliitoksen tehollinen leveys todellisuudessa on. Todellisuudessa poikkileikkauksen y-suunnan taivutusjäykkyys tulisi ruviliitoksen tapauksessa määrittää pienemmällä tehollisen leveyden arvolla kuin eurokoodin mukaiset laskentakaavat antavat. Laskennan perusteella tehollista leveyttä tulisi vähentää ruvikiinnitteisissä rakenteissa jopa 70–85 % verrattaessa analyttisessä laskennassa käytettyyn teholliseen leveyteen, jotta yksinkertaistetussa analyttisessä laskennassa päästään FEM-Designista saatujen tulosten suuruisiin y-suuntaisiin taivutusjäykkyysiin.

Taivutusjäykkyuden lisäksi analyttistä laskentaa verrataan FEM-Designiin antamiin puristusjäykkyysien arvoihin, jotta saadaan lisää vahvistusta analyttisen laskennan luotettavuuteen. Taulukossa 3 on vertailussa puristusjäykkyudet sekä FEM-Designin, että analyttisen laskennan arvoilla.

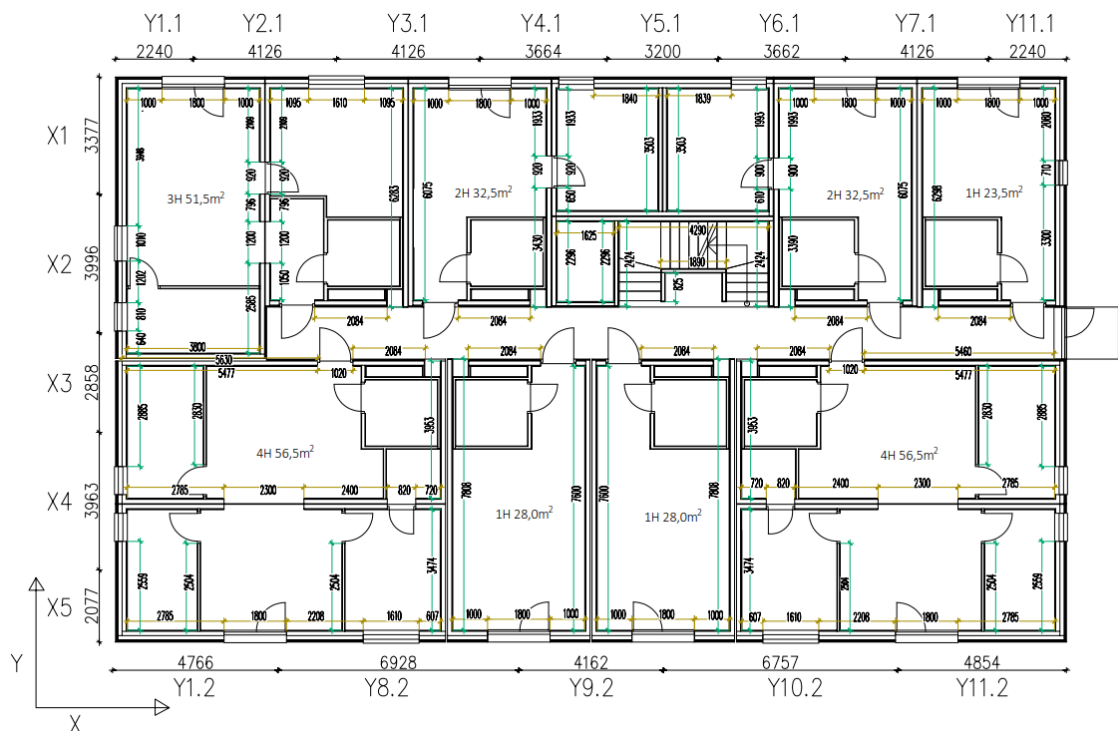
Taulukko 3. *Puristuskestävyyksien vertailu.*

Rakenne	Levy + ripa		Pelkkä levy	
	Ripa 102x51 + Levy 21	Ripa 85x51 + Levy 39	Levy 21	Levy 39
Puristusjäykkyys (kN/m)	64,79	96,77	42	78
FEM-Design (kN/m)	56,87	97,56	41,38	75,95
Prosentuaalinen ero	12,2 %	-0,8 %	1,5 %	2,6 %

Taulukosta 3 voidaan nähdä, että pelkän levyn sisältävät rakenteet, joissa on keskeiset pystysuuntaiset kuormitukset ovat puristusjäykkyudet melko samat verrattaessa analyyttistä laskentaa ja FEM-Design tuloksia. Lisättäessä rakenteeseen ripa näkyy tuloksissa hieman enemmän eroavaisuutta varsinkin seinärakenteessa, jossa on 21 mm LVL-levy. Tulosten erot johtuvat siitä, että FEM-Designissa kuormitus ei ole keskeinen, kun rakenteeseen lisätään levyn lisäksi rivat. Näin ollen kuormitukseen syntyy epäkeskeisyyttä, joka vaikuttaa pystysiirtymään. Yksinkertaistetussa analyyttisessä laskennassa oletetaan tässä tapauksessa, että kuormitus olisi rakenteeseen nähden keskeinen. Virhettä saattaa syntyä riparakenteisiin myös oletuksen takia, jossa siirtymän arvoksi valitaan levyn reunan ja rivan kohdalla tapahtuvien siirtymien keskiarvo. Siirtymän todellinen arvo voitaisiin saada esimerkiksi lisäämällä kuormituksen kohdalle hyvin jäykkä rakenneosa, joka välittäisi kuormituksen tasaisesti elementille

10. ESIMERKKIRAKENNUS

Työssä tutkittavia seinärakenteita tutkitaan Lehto Group Oyj:lta saadun esimerkkirakennuksen avulla. Rakennus on kahdeksan kerroksinen, jossa kaikki kerrokset ovat tehty puisista tilaelementeistä. Alimman kerroksen tilaelementit ovat betonisten sokkelielementtien päällä. Kuvassa 15 on esitettyä esimerkkirakennuksen pohjaratkaisu. Rakennuksen kaikki kerrokset ovat samanlaisia.



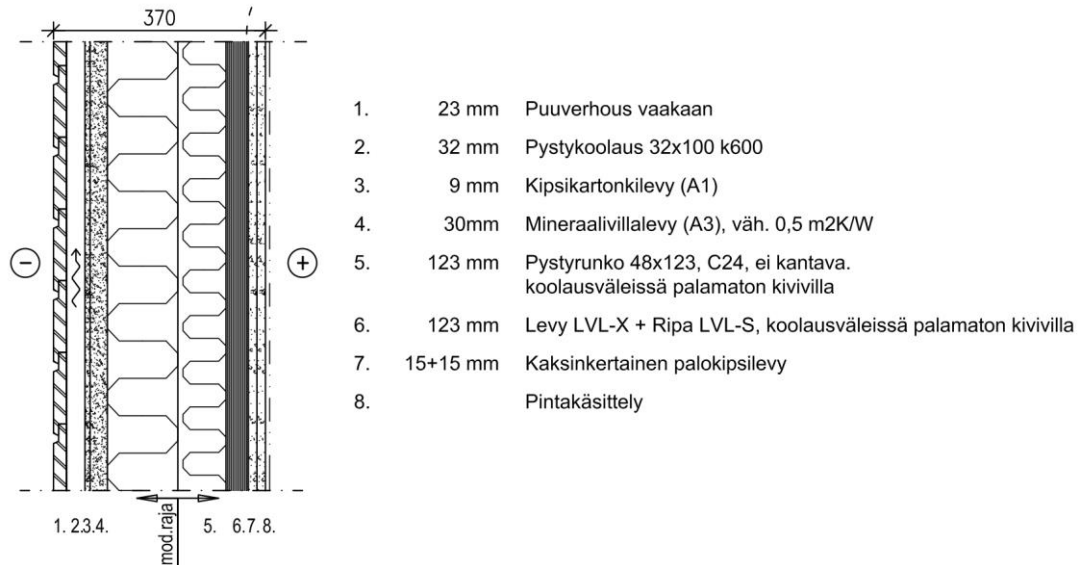
Kuva 15. Esimerkkirakennuksen pohjakuva.

10.1 Rakennetyypit

Tässä osiossa on esitettyä esimerkkirakennuksen kuivien tilojen tyypilliset rakenneratkaisut. Märkätilojen sekä muiden erikoistilanteiden rakenneratkaisut eroavat hieman edellä esitetyistä ratkaisuista.

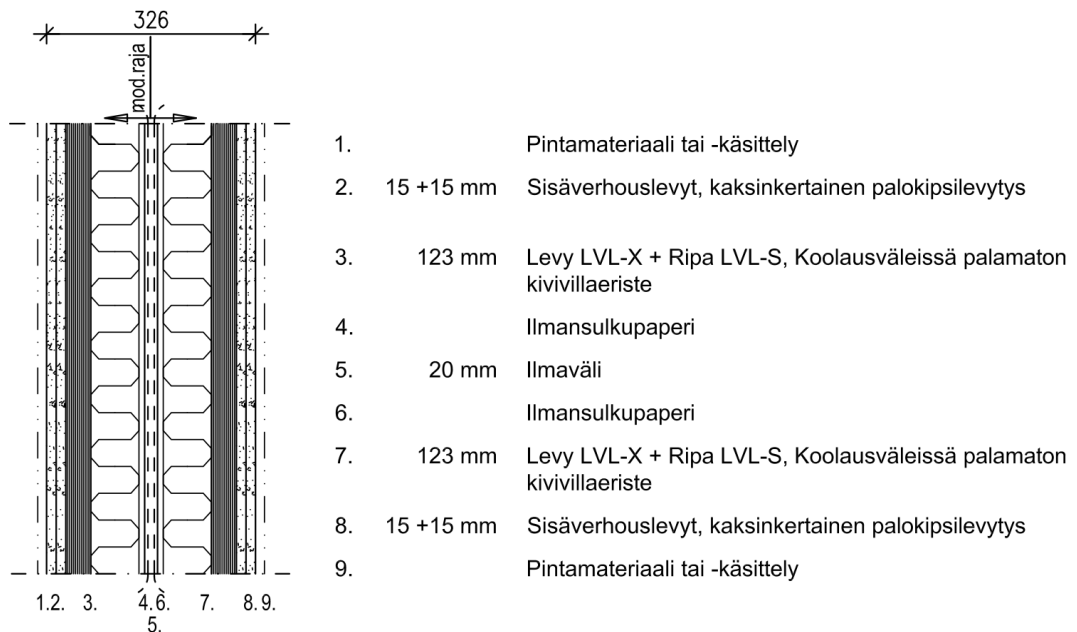
Kuvassa 16 on esitettyä työssä tutkittu ulkoseinän ripaseinärakenne tilaelementtikohdeessa, kun käytössä on kantava rakenneratkaisu. Rakenne koostuu pääpiirteittäin kahdesta kokonaisuudesta, ei-kantavasta ulkokuorielementistä sekä rakenteen kantavasta sisäkuorielementistä. Ulkokuoren julkisivumateriaali voi olla erilainen kuin esitetyssä kuvassa 16. Julkisivun poikkeavat ratkaisut esitetään erillisissä suunnitelmissa ja ne toteutetaan tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle. (Jokinen 2019)

Seinän tehdasvalmistuksessa ulko- ja sisäkuorielementit valmistetaan erikseen. Valmistuksen jälkeen tilaelementtien kokoonpanovaiheessa kantamaton ulkokuorielementti kiinnitetään kantavaan sisäkuorielementtiin ruuvaamalla. (Jokinen 2019)



Kuva 16. Ulkoseinän rakennetyyppi, jossa kantava riparunko sisäpuolella.

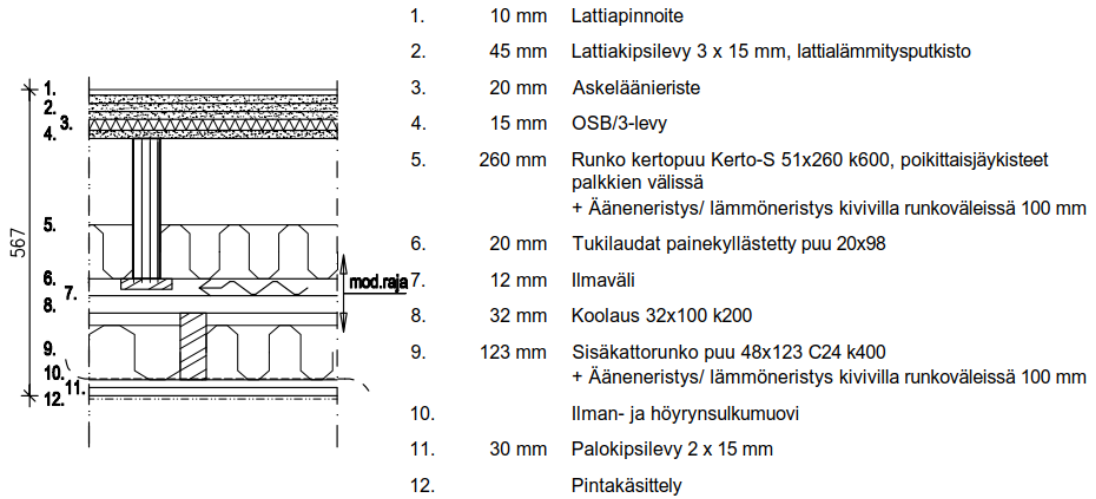
Työssä tutkittu tilaelementtien välisten seinien rakennetyyppi on esitettyä kuvassa 17. Rakenteessa molemmat puolet ovat samanlaisia kantavia rakenneosia ja rakenteet erottavat ilmansulkupaperit sekä 20 mm ilmaväli.



Kuva 17. Väliseinän rakennetyyppi, jossa kantava riparunko sisäpuolella.

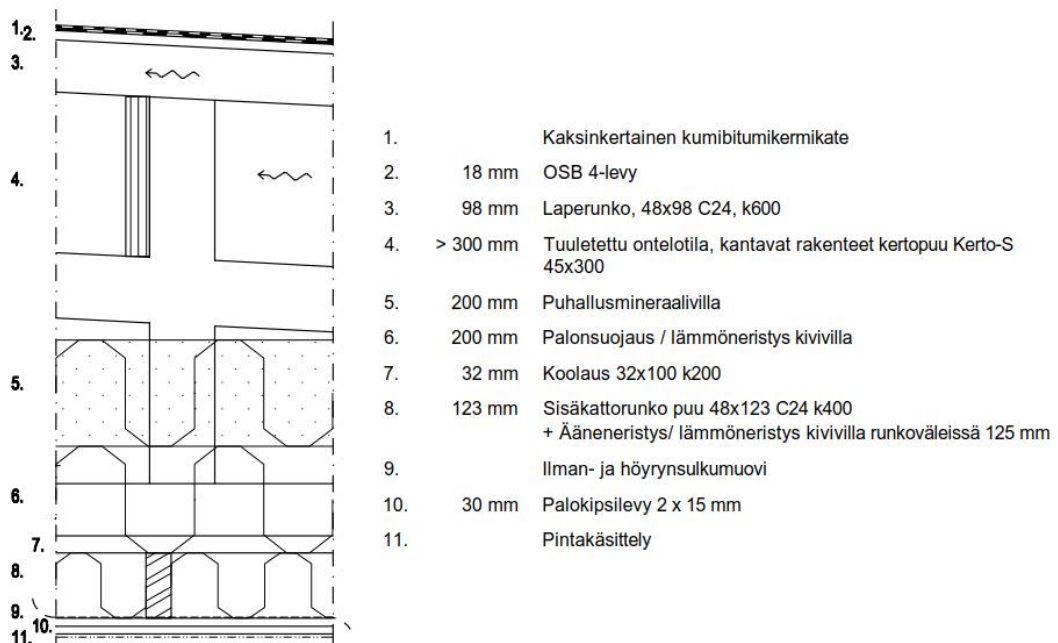
Tilaelementtien välipohjarakenne koostuu alemman tilaelementin kattorakenteesta sekä ylemmän tilaelementin lattiarakenteesta. Kuvassa 18 on esitetty tilaelementtien välipoh-

jarakenne, jossa ala- ja yläpohjan ilmaräily on noin 12 mm. Ilmaräily koostuu tilaelementtien kantavien rakenteiden välisestä eristeen paksuudesta sekä tärinäeristyksestä. (Jokinen 2019)



Kuva 18. Väli-pohjan rakennetyyppi

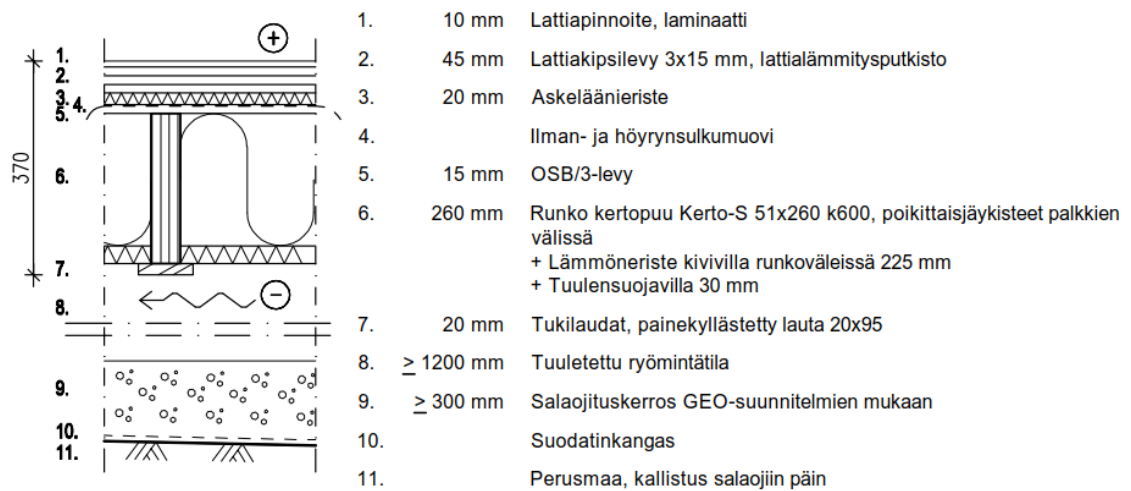
Ylimpien tilaelementtien päälle tuleva yläpohjarakenne on puurakenteinen. Veden pääsyn rakenteisiin estää kaksinkertainen kumibitumikermikate. Kivivillaa rakenne sisältää yhteensä 325 mm ja mineraalivillaa 200 mm. Yläpohjan rakennetyyppi on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Yläpohjan rakennetyyppi

Kun tilaelementtikerrostalon alimmainen kerros on sijoitettu suoraan sokkelien päälle, niin alapohja toteutetaan tuuletettuna. Väli- ja alapohjan suurin ero on se, että alapohjan

kantavan rungon tyhjä tila on kokonaan lämmöneristetty. Tilaelementtikerrostalon tuulettuvan alapohjan rakennetyyppi on esitetty kuvassa 20. Rakenne sisältää kivivilla lämmöneristettä 225 mm.



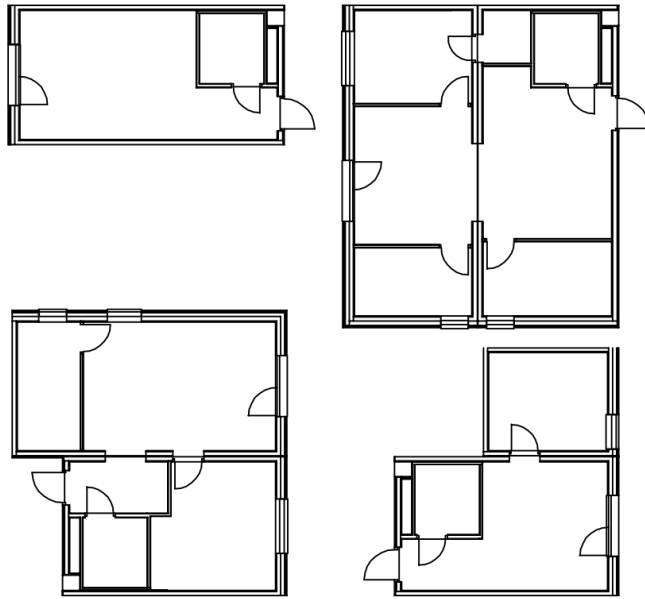
Kuva 20. Alapohjan rakennetyyppi

10.2 Tilaratkaisut

Esimerkkirakennuksessa tilaratkaisut ovat hyvin yksinkertaistettuja ja pohjaratkaisut ovat pelkistetty niin, että ne ovat edullisia ja helppoja toteuttaa. Rakennuksessa märkätilat sijaitsevat aina keskikäytävän seinustalla. Märkätilan ja keskikäytävän väliin tulee jokaisessa tilaratkaisussa hormi, jolloin LVIS-asennukset voidaan toteuttaa menemättä huoneistoihin sisälle. (Vänttilä 2021)

Kohteessa yksiöt koostuvat yhdestä tilaelementistä ja uloskäynti on keskikäytävän suuntaan tilaelementin päädystä. Tilaelementtejä yhdistämällä saadaan luotua isompia tilakokonaisuuksia, joissa uloskäynti voidaan toteuttaa sekä tilaelementin päädystä, että pitkältä sivulta. Uloskäynti on aina keskikäytävän suuntaan. (Vänttilä 2021)

Suuremmissa tilakokonaisuuksissa tilaelementtejä yhdistävät aukotukset toteutetaan tilaelementtejä koottaessa. Kuljetuksen aikana aukotuksiin on lisätty levyrakenteet, jotta tilaelementit säilyttävät jäykkyytensä kuljetuksen aikana. Aukotusten levyrakenteet puretaan tilaelementtien asennustyön jälkeen ja aukotusten tarvittava viimeistely tehdään työmaalla. (Jokinen 2019) Kuvassa 21 on esitettyä erilaisia esimerkkirakennuksessa käytettäviä tilaratkaisuita.



Kuva 21. Esimerkkirakennuksen tilaelementtien tilaratkaisut.

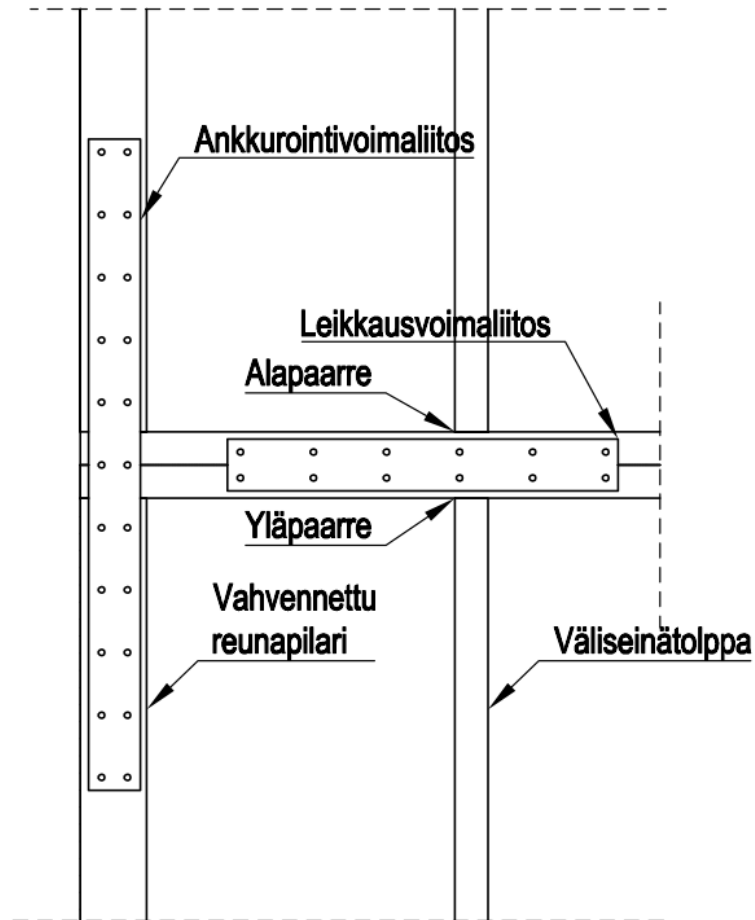
Kuvan 21 tilaratkaisuista huomataan, että yksi tilaelementti sisältää aina enintään yhden huoneiston osia. Tilaelementtejä yhdistelemällä tilaratkaisuista on mahdollista saada hyvinkin erilaisia ja toimivia kokonaisuuksia.

10.3 Liitostekniikka

Lehto Group Oyj:lle tärkeää on kustannustehokkuus sekä nopea työmaa-asennettavuus. Tilaelementtien tapauksessa tärkeää siis olisi, että ne tulisivat työmaalle sisältä täysin valmiina ja kaikki tilaelementtien kiinnittäminen tapahtuisi tilaelementin ulkopuolelta, jolloin työmaalla ei tilaelementtien sisälle enää tarvitsisi mennä. Liitosteknisesti tämä luo hieman haasteita kiinnittäessä päällekkäisiä ja vierekkäisiä tilaelementtejä kiinni toisiinsa. Tilaelementit kiinnitetään toisiinsa moduulien välisestä saumasta usein ulkopuolelta käsin. Kiinnitystavasta johtuen toinen huoneiston välisistä seinistä jää tyypillisesti kiinnittämättä alempaan kerrokseen. Liitostekniikka tulisi suunnitella siten, että molempia huoneistojen välisiä seiniä voitaisiin hyödyntää rakennuksen jäykistyksessä.

Päällekkäisten tilaelementtien kiinnitys tilanteessa, jossa päästään saumaväliin, toteutetaan tyypillisesti teräslevyillä tai naulauslevyillä. Leikkausvoimaliitos toteutetaan kiinnittämällä naulauslevy vaakasuunnassa alemman levyn yläjuoksun ja ylemmän levyn alajuoksun välille. Ankkurointivoimaliitos toteutetaan kiinnittämällä tilaelementin pidemmän sivun molempiin päihin nurkkatolppien kohdalle pystysuunnassa pitkä naulauslevy, joka välittää ankkurointivoimat. Naulauslevyt on mitoitettava niin, että ne kestävät raken-

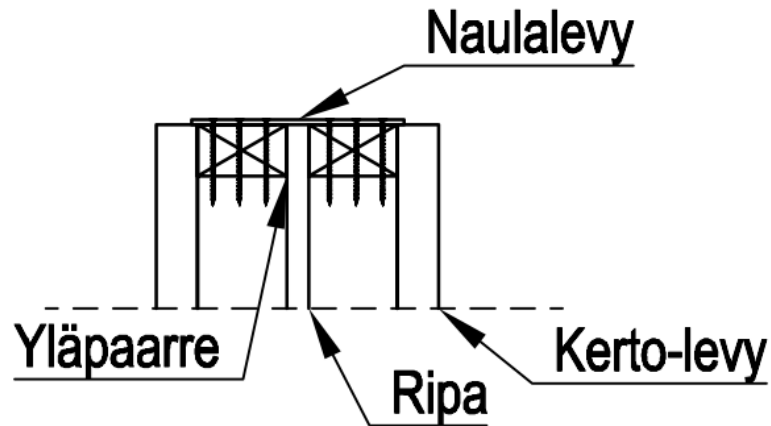
teessa vaikuttavat leikkaus- ja ankkurointivoimat. Tilaelementtien välinen ankkurointi-voima- sekä leikkausvoimaliitos tapauksessa, jossa asennus päästään tekemään saumaväliin, on esitettyä kuvassa 22.



Kuva 22. Päällekkäisten tilaelementtien kiinnityspeiraate.

Tilanteessa, jossa päällekkäisten tilaelementtien saumaväliin ei ole mahdollista päästä, tilaelementissä vaikuttavat veto- ja leikkausrasitukset on saatava elementistä toiseen muulla tavoin kuin liitoksissa vaikuttavilla naulauslevyillä. Yksi tapa olisi kiinnittää tilaelementin päädyissä oleviin vahvennettuihin reunapilareihin teräsosa, joka välittäisi rasitukset elementiltä toiselle. Tässä tilanteessa veto- ja leikkausrasitukset välittyisivät vain tilaelementin vahvennetuissa reunapilareissa olevien teräsosien kautta.

Vierekkäiset tilaelementit kiinnitetään toisiinsa tyyppillisesti teräslevyillä tai naulauslevyillä. Naulauslevyt kiinnitetään kahden vierekkäisen tilaelementin seinien yläjuoksujen yläpinnasta vaakasuunnassa. Teräsosan ja puun väliin asennetaan usein ääneneristyskumit, joiden vaikutus liitosten jäykkyyteen tulee huomioida mitoituksessa. (Luntta 2021) Kuvassa 23 on havainnollistettu vierekkäisten tilaelementtien kiinnitystapaa.



Kuva 23. Vierekkäisten tilaelementtien kiinnityisperiaate.

Naulauslevy ei juurikaan pysty ottamaan puristusta, sillä sauman rako voi olla jopa 30 mm leveä ja naulauslevyn teräs on usein ohutta materiaalia. Tästä johtuen vierekkäiset tilaelementit tulisi kiinnittää toisiinsa myös liitoksella, joka kestää puristusta. Työssä ei liitososia lähdetä tarkemmin tutkimaan, mutta kerrostalon toimivuuden kannalta liitostekniikka on hyvin oleellinen asia, jotta kuormat siirtyvät oikealla tavalla tilaelementistä toiseen.

Liitostekniikan kannalta varsinkin tulevaisuudessa tärkeä asia tulee olemaan purettavuus. Liitokset tulisi toteuttaa niin, että ne ovat mahdollista ja helppoa purkaa. Tämän takia liitoksissa on hyvä suosia naula- sekä ruuviliitoksia, joiden purettavuus on helppoa.

10.4 Pystykuormamitoitus

Esimerkkirakennus mitoitetaan sille tulevia kuormia vastaan, jotta nähdään ripaseinäarakenteiden todellinen toimivuus. Laskennassa selvitetään rakennukselle tulevat pysty- sekä vaakakuormat. Kuormitusten avulla päästään tutkimaan rakennuksen jäykistystä sekä seinissä vaikuttavia voimia.

Laskennassa määritetään tyypillisiä kuormia Lehto Group Oyj:n käyttämiin rakenneratkaisuihin. Mitoituksessa määritetään suoralle seinälinjalle vaikuttavat kuormitukset alimassa kerroksessa. Kuormituksista määritetään erikseen märkätilan ja kuivatilan kohdalla olevat kuormitukset. Pystykuormat määritetään kuvan 15 mukaisessa moduuliviivan C-seinälinjalla, jossa on seinälinjaa sekä kuiva- että märkätilan kohdalla.

Kuivatilan seinälle tulevia kuormia mitoittaessa laskennassa huomioidaan katon omat painot, lumikuorma, ulkoseinien- ja välipohjien omat painot sekä hyötykuorma. Märkätila eroaa kuivatilasta kuormitusalojen, seinien ja välipohjan osalta. Märkätilan kohdalla vä-

lipohjassa on esimerkiksi kaatoja varten tehty betonivalu. Märkätila sijaitsee rakennuksessa aina huoneistojen välisten seinien kohdalla niin, että seinistä sitä kuormittaa vain huoneistojen väliset väliseinät.

Kuormat määritetään alimmassa kerroksessa, jolloin hyötykuorman laskennassa voidaan hyödyntää pienennyskerrointa kerroksittain. Hyötykuorman pienennyskerrointa voidaan käyttää asuinkerrostaloissa. Pienennyskerroin lasketaan kaavan (57) avulla. (SFS EN 1991-1-1 + AC)

$$\alpha_n = \frac{2+(n-2)*\psi_0}{n} \quad (57)$$

missä

n on kerrosten lukumäärä tutkittavan osan yläpuolella

ψ_0 on yhdistelykerroin (SFS EN 1990)

Hyötykuorman arvona käytetään RIL 205-1-2017 taulukon 2.5-FI mukaista luokan A välipohjan kuormitusarvoa 2,0 kN/m². (RIL 205-1-2017)

Lumikuorman ominaisarvona maassa käytetään keskisuomen alueella käytettävää arvoa $s_k = 2,5$ kN/m². Lumikuorman ominaisarvo katolla saadaan kertomalla ominaisarvo maassa lumikuorman muotokerroimella. Katon kaltevuuden ollessa alle 30°, muotokerroin on $\mu = 0,8$. Tällöin lumikuorman ominaisarvo katolla saadaan kaavan (58) mukaisesti.

$$q_{k.s} = s_k * \mu = 2 \frac{kN}{m^2} \quad (58)$$

missä

s_k on lumikuorman ominaisarvo maassa

μ on muotokerroin

Pystykuormitukset määritetään kuiva- sekä märkätiloihin erikseen kahdella eri kuormitusyhdistelyllä. Kuormitusyhdistelyinä käytetään standardin EN 1990 kansallisen liitteen mukaisia muuttuvien kuormien aikaluokkien sekä pysyvien aikaluokkien kuormitusyhdistelmiä.

Märkätilan pystykuorma:

Alimmassa kerroksessa märkätilan määräävä pystykuormitus on kaavoista (59) ja (60) suurempi. Märkätilan kuormitus vaikuttaa tilaelementin pidemmälle sivulle.

$$F_{1krs.M1} = 1.15 * K_{FI} * (g_{k.y.p.yht} + 7 * (g_{k.HVS} + g_{k.VP.M})) +$$

$$1.5 * (7 * \alpha_n * q_k + \psi_0 * q_{k.s}) = 123,18 \frac{kN}{m} \quad (59)$$

$$F_{1krs.M2} = 1.35 * K_{FI} * (g_{k.y.p.yht} + 7 * (g_{k.HVS} + g_{k.VP.M})) = 103,24 \frac{kN}{m} \quad (60)$$

missä

K_{FI} on kuormakerroin (RIL 205-1-2017, taulukko 2.1-FI)

$g_{k.y.p.yht}$ on kattorakenteen omapaino

$g_{k.HVS}$ on huoneistojen välisen seinän omapaino

$g_{k.VP.M}$ on välipohjan omapaino (märkätila)

α_n on kaavan (57) mukainen pienennyskerroin

q_k on hyötykuorma

ψ_0 on yhdistelykerroin (RIL 205-1-2017, taulukko 2.2-FI)

$q_{k.s}$ on kaavan (58) mukainen lumikuorma

Näin ollen märkätilojen kohdalla suurin pystykuormitus alimmassa kerroksessa suoralla seinälinjalla on 123,18 kN/m.

Kuivatilan pystykuorma:

Alimmassa kerroksessa kuivatilan määräävä pystykuormitus on kaavoista (61) ja (62) suurempi. Tämä on samalla kuormitus, joka vaikuttaa tilaelementin pidemmälle sivulle. Lyhyemmälle sivulle vaikuttava kuormitus kuivatilan kohdalla on kaavoista (63) ja (64) suurempi. Lyhyemmälle sivulle vaikuttaa vain seinärakenteen omat painot, sillä katto- sekä välipohjarakenteet eivät ole kiinnittyneinä tilaelementin lyhyemmälle sivulle.

$$F_{1krs.K} = 1.15 * K_{FI} * (g_{k.y.p.yht} + 7 * (g_{k.US} + g_{k.VP.K})) +$$

$$1.5 * (7 * \alpha_n * q_k + \psi_0 * q_{k.s}) = 73,55 \frac{kN}{m} \quad (61)$$

$$F_{1krs.K2} = 1.35 * K_{FI} * (g_{k.y.p.yht} + 7 * (g_{k.US} + g_{k.VP.K})) = 44,98 \frac{kN}{m} \quad (62)$$

missä

$g_{k.US}$ on ulkoseinän omapaino

$g_{k.VP.K}$ on välipohjan omapaino (kuivatila)

$$F_{1krs.K.lyhyt} = 1.15 * 7 * g_{k.US} = 16 \frac{kN}{m} \quad (63)$$

$$F_{1krs.K2.lyhyt} = 1.35 * 7 * g_{k.US} = 18,79 \frac{kN}{m} \quad (64)$$

Kaavojen perusteella kuivatilan kohdalla tilaelementin pidemmälle sivulle vaikuttava määräävä kuormitus on 73,55 kN/m ja lyhyemmälle sivulle vaikuttava määräävä kuormitus on 18,79 kN/m.

Palotilanteen kuormitukset:

Kuormitusyhdistelyissä on huomioitava tapaukset, joissa määräävinä muuttuvina kuormina ovat hyötykuorma, lumikuorma tai tuulikuorma. Muuttuvien kuormien yhdistelykerroimet valitaan RIL 205-2-2019 taulukon 2.2 mukaisesti. Palotilanteen kuormitukset määritetään sekä märkätilan, että kuivatilan kohdalla. (RIL 205-2-2019)

Ensimmäisenä kuormitustapauksena on tapaus, jossa määräävinä muuttuvana luonnonkuormana on lumikuorma. Kuormitustapaus on esitetty kaavassa (65).

$$E_{d1} = \left(\left(g_{k.y.p.yht} + 7 * (g_{k.HVS} + g_{k.VP.M}) \right) + (\psi_{2.i} * 7 * \alpha_n * q_{k.hyö}) + \right) \quad (65)$$

$$\left(\psi_{1.1.l} * q_{k.s} \right)$$

missä

$\psi_{2.i}$ on hyötykuorman yhdistelykerroin (RIL 205-2-2019, taulukko 2.2)

$\psi_{1.1.l}$ on lumikuorman yhdistelykerroin (RIL 205-2-2019, taulukko 2.2)

Toisena kuormitusyhdistelyinä on tapaus, jossa määräävinä muuttuvana luonnonkuormana on tuulikuorma. Tapaus on esitetty kaavassa (66).

$$E_{d2} = \left(\left(g_{k.y.p.yht} + 7 * (g_{k.HVS} + g_{k.VP.M}) \right) + (\psi_{2.i} * 7 * \alpha_n * q_{k.hyö}) + \right) \quad (66)$$

$$\left(\psi_{1.1.t} * W_{0,s} \right)$$

missä

$\psi_{1.1.t}$ on tuulikuorman yhdistelykerroin (RIL 205-2-2019, taulukko 2.2)

Kolmannessa ja neljännessä kuormitusyhdistelyssä määräävinä muuttuvana kuormana on hyötykuorma ja toisena muuttuvana kuormana on lumi tai tuuli. Tapaukset ovat esitettyinä kaavoissa (67) sekä (68)

$$E_{d3} = \left(\left(g_{k.y.p.yht} + 7 * (g_{k.HVS} + g_{k.VP.M}) \right) + (\psi_{2.i} * 7 * \alpha_n * q_{k.hyö}) + \right) \quad (67)$$

$$\left(\psi_{2.1.l} * q_{k.s} \right)$$

$$E_{d4} = \left(\left(g_{k.y.p.yht} + 7 * (g_{k.HVS} + g_{k.VP.M}) \right) + (\psi_{2.i} * 7 * \alpha_n * q_{k.hyö}) + \right) \quad (68)$$

$$\left(\psi_{2.1.t} * W_{0,s} \right)$$

missä

$\psi_{2.1.l}$ on lumikuorman yhdistelykerroin (RIL 205-2-2019, taulukko 2.2)

$\psi_{2.1.t}$ on tuulikuorman yhdistelykerroin (RIL 205-2-2019, taulukko 2.2)

Taulukossa 4 on esitetty palotilanteen kuormitukset eri kuormitustilanteissa. Taulukoon on eritelty sekä märkätilan, että kuivatilan kuormitukset.

Taulukko 4. *Palotilanteen kuormitukset.*

Määräävä kuorma	Palotilanteen kuormitus			
	Lumi	Tuuli	Hyöty + lumi	Hyöty + tuuli
Märkätila (kN/m)	84,3	92,45	83,48	82,66
Kuivatila (kN/m)	41,14	49,29	40,32	39,5

Kaikkien neljän kuormitustapausten perusteella määrääväksi osoittautui tapaus, jossa määräävänä muuttuvana luonnonkuormana on tuulikuorma. Kuormituksista huomataan, että märkätilan kohdalla kuormitus on huomattavasti suurempi. Märkätilan määräävä palotilanteen kuormitus on 92,45 kN/m ja kuivatilan vastaava kuormitus on 49,29 kN/m.

10.5 Vaakakuormamitoitus

Tuulikuormamitoitus on tehty sekä voimakertoimien, että painekertoimien avulla. Rakennuksen kokonaiskorkeus on 27,95 metriä. Leveys on 27,39 metriä ja syvyys 16,27 metriä. Rakennus kuuluu maastoluokkaan kaksi, jolloin RIL 201-1-2017 kuvan 4.5S mukaisesti puuskanopeuspaineen ominaisarvo on noin 0,83 kN/m². (RIL 201-1-2017)

Tuulikuorma voimakertoimilla:

Tuulikuormaa laskettaessa voimakertoimien avulla tarvitsee tehollinen hoikkuus määrittää taulukon 5.1S mukaisesti interpoloimalla käytettyjä kaavoja. Tehollisen hoikkuuden sekä sivusuhteen perusteella saadaan taulukosta 5.2S interpoloitua voimakertoimien c_f arvot. (RIL 201-1-2017)

Voimakertoimien avulla laskettaessa tuulikuorman suuruudet rakennuksen sivussa ja päädyssä saadaan laskettua kaavan (69) avulla.

$$q_{wk} = q_k * c_f * c_c * c_d \quad (69)$$

missä

q_k on puuskanopeuspaineen ominaisarvo (RIL 201-1-2017, Kuva 4.5S)

c_f on voimakerroin (RIL 201-1-2017, Taulukko 5.2S)

c_c on rakennekerroin

c_d on rakennekerroin

Tuulikuorma painekertoimilla:

Tuulikuormaa laskettaessa painekertoimilla vyöhykemitointu tehdään kuvan 7.5 mukaisesti. Lisäksi ulkopuolisen paineen kertoimet c_{pe} valitaan taulukon 7.1 mukaisesti. Rakennuksen aukkosuhteen avulla tulee kuvasta 7.13S määrittää sisäisen paineen kerroin c_{pi} . (RIL 201-1-2017)

Aiempien arvojen perusteella voidaan nyt määrittää nettopaineet eri vyöhykealueilla kaavan (70) avulla. Nettopaineiden avulla voidaan määrittää tuulen kokonaisnettopaineet pidemmälle sekä lyhyemmälle sivulle. (RIL 201-1-2017)

$$q_w = q_k * (c_{pe} - c_i) \quad (70)$$

missä

c_{pe} on ulkopuolisen paineen kerroin

c_{pi} on sisäpuolisen paineen kerroin

q_k on puuskanopeuspaineen ominaisarvo (RIL 201-1-2017, Kuva 4.5S)

Tuulikuormien vertailu:

Tuulikuorman arvot määritettiin erikseen voimakertoimien sekä painekertoimien avulla. Taulukossa 5 on esitettyä eri menetelmillä saatujen tuulikuormien arvoja.

Taulukko 5. *Esimerkkirakennuksen tuulikuormat.*

Tuulikuorma	Pitkä sivu (kN/m ²)	Lyhyt sivu (kN/m ²)
Voimakerroin	1,293	1,006
Painekerroin	1,109	1,08
Vertailu (%)	16,6 %	-7,4 %

Taulukosta 5 havaitaan, että rakennuksen pitkälle sivulle voimakertoimella laskettaessa tuulikuorma on noin 16,6 % suurempi kuin painekertoimella laskettaessa. Toisaalta rakennuksen lyhyellä sivulla voimakertoimella laskettaessa tuulikuorma on noin 7,4 % pienempi kuin painekertoimella laskettaessa.

Tuulikuorman arvoista valitaan suuremmat, joiden avulla voidaan ratkaista tuulikuorman arvot kerroksittain. Jäykistysmitoitus suoritetaan rakennuksen kuormittavimmassa kohdassa, joka sijaitsee rakennuksen alimmassa kerroksessa. Laskelmien mukaan rakennuksen alimpaan kerrokseen vaikuttava tuulikuormitus lyhyemmälle sivulle on 40,86 kN/m ja pidemmälle sivulle 48,92 kN/m.

Lisävaakavoima:

Lisävaakavoima määritetään tilaelementti kohtaisesti. Lisävaakavoima määritetään kaavan (71) avulla. Kaavassa tilaelementin omapainona käytetään keskimääräistä painoa 12 000 kg ja hyötykuormana käytetään asuinrakennuksessa vaikuttavaa hyötykuormaa 2,0 kN/m³. (RIL 201-1-2017)

$$w_{\text{lisä}} = \frac{1.05 \cdot Q_{\text{tila}} + 1.15 \cdot G_{\text{tila}}}{200} * \frac{1}{2} \quad (71)$$

missä

Q_{tila} on tilaelementtiin vaikuttava hyötykuorma pistekuormana

G_{tila} on tilaelementin omapaino pistekuormana

Kaava kerrotaan puolikkaalla, sillä jokaisessa tilaelementissä on kaksi jäykistävää seinää tarkasteltavan vaakavoiman pääsuunnissa. Näin ollen kaava (71) määrittää lisävaakavoiman seinäkohtaisesti.

10.6 Jäykistysmitoitus

Valittua rakennetta tulee testata ja mitoitaa esimerkkirakennukselle tulevia kuormia vastaan, jotta voidaan selvittää, miten rakenne toimisi vaaditun tyyliässä tilaelementtikerrostalossa. Rakennuksen jäykistysmitoitus on liitteessä 3.

Esimerkkirakennus on tilaelementtirakenteinen, jossa jäykistykseen hoitaa kantavat seinärakenteet sekä tilaelementtikerrokselliset väli- ja yläpohjarakenteet. Työssä tutkittavana ovat ehjät seinäelementit, joten jäykistysmitoituksessakin huomioidaan vain seinien ehjät osat. Ikkuna- ja ovikohtien lisäksi jäykistysmitoituksessa ei huomioida porras- eikä hissi-kuilun seiniä eikä rakenteita.

Tilaelementtikerrostalon jäykistysmitoituksessa tulee tarkastella rakennukselle aiheutuvat siirtymä- ja leikkauskapasiteetit ja verrattava niitä tiettyihin raja-arvoihin. Jäykistysmitoituksessa seinäelementeistä on oleellista selvittää tasonsuuntainen kokonaisjäykkyys, joka saadaan kuvan 10 mukaisesti rakenteen x-suuntaisen taivutusjäykkyyden EI_y avulla. Kokonaisjäykkyys tasonsuunnassa selvitetään eripituisille seinäelementeille kaavan (13) avulla. Tiedettäessä kokonaisjäykkyys tason suunnassa, voidaan elementin kapasiteetti siirtymän suhteen laskea kaavojen (72)–(74) avulla.

$$\frac{u}{u_{\text{raja}}} \leq 1 \quad (72)$$

$$u_{\text{raja}} = \frac{h}{500} \quad (73)$$

$$u = \frac{F}{C_y} \quad (74)$$

missä

u	on seinälohkon yläreunan siirtymä tasonsuunnassa
h	on rakenteen korkeus
u_{raja}	on siirtymäraja (RIL 205-1-2017, s. 172)
F	on seinälohkoon vaikuttava vaakasuuntainen kuormitus
C_y	on seinälohkon kokonaisjäykkyys tasonsuunnassa

Seinän osat jaotellaan kuvan 15 mukaisesti lohkoihin ja jokainen seinälohko mitoitetaan erikseen. Tutkittaessa pystysuuntaisia seinäloikkoja, huomioidaan rakennuksesta puoli-
kas niin, että porraskäytävä ei välitä kuormia. Seinälohkot ovat jaoteltu seinille vaikutta-
vien vaakakuormien jaon mukaisesti. Jokaisesta seinästä vaakakuormitus jakautuu siis
puoliksi kuormituksen suuntaisille seinälohkoille. Seinälohkolle vaikuttavan vaakakuor-
man suuruus määritetään painekertoimien avulla saatujen osuuksien avulla, jossa on
määritetty erikseen rakennuksen ylä- ja alapuolen paineet. Tässä tilanteessa nettopai-
neet jakautuvat niin, että tarkasteltavalle puolelle vaikuttaa 71 % nettopaine ja rakennuk-
sen toiselle puolelle 29 % nettopaine.

Siirtymän lisäksi jäykistysmitoituksessa huomioidaan myös rakenteen kapasiteetti leik-
kauksen suhteen. Kapasiteetti leikkauksen suhteen määritetään kaavojen (75)–(77)
avulla.

$$\frac{\tau}{f_{v.k}} \leq 1 \quad (75)$$

$$\tau = 1.5 * \frac{F_v}{h_f * l} \quad (76)$$

$$\frac{F}{\sum \tau} \leq 1 \quad (77)$$

missä

τ	on rakenteen leikkausvuo
$f_{v.k}$	on levyn leikkauslujuus syrjällä
F_v	on yksittäiseen elementtiin vaikuttava kuormitus
h_f	on levyn paksuus
l	on yksittäisen seinäelementin leveys

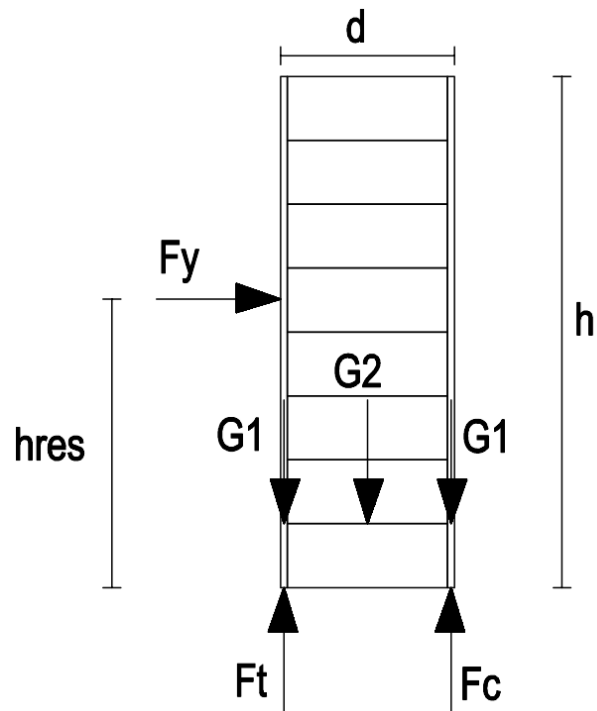
Jäykistysmitoituksessa tarkoitus on siis määrittää eri seinälohkoille oma kapasiteettinsa siirtymän sekä leikkauksen suhteen. Kapasiteettien ylittyessä on mahdollista käyttää joi-tain väliseiniä jäykistyksessä tai yrittää saada ongelmallisiin seiniin pienempää vaaka-kuorman osuutta.

10.7 Ankkurointi- ja puristusvoima

Esimerkkirakennuksesta määritetään alimmassa kerroksessa vaikuttavat ankkurointi- ja puristusvoimat ehjän seinän kohdalla, jotta voidaan tutkia kuinka voimat jakautuvat ra-kenteessa. Ankkurointivoiman laskenta sisältää paljon tekijöitä, jotka vaikuttavat sen tarkkaan määrittämiseen. Tekijöitä ovat esimerkiksi osien jäykkyydet, rakennuksen geo-metria ja ulkoisten voimien jakautuminen. Useiden eri muuttujien takia ankkurointivoi-mien tarkempi laskenta edellyttää epälineaarista FEM-laskentaa. Tässä työssä ei voimia lähdetty kuitenkaan määrittämään FEM-laskennalla, vaan työssä esitetty menetelmä on yksinkertaistettu analyyttiseen muotoon käyttäen tavallisia statiikan yhtälöitä. Työssä voimat on ratkaistu kuvan 15 mukaisesti linjan Y9.2 kohdalta.

Voimien ratkaisu on toteutettu ratkaisemalla seinissä vaikuttavat voimat tasapainoyhtä-löin. Yksinkertaistuksen vuoksi ankkurointi- ja puristusvoimat on oletettu pistemäisiksi seinien päissä vaikuttaviksi voimiksi. Tarkemmissa laskelmissa puristusvoiman paikka tulisi määritellä tarkemmin puristusresultantin avulla. Todellisuudessa puristusresultantti vaikuttaa jäykistävän seinän keskilinjan ja nurkkapisteen välillä. Tällöin seinän sisäinen momenttivarsi lyhenee, mikä kasvattaa ankkurointivoimia.

Laskenta on toteutettu kuvan 24 perusteella, jossa F_t on oletettu ankkurointivoima ja F_c on puristusvoima tukipisteessä. Kuvassa 24 kokonaisvaakakuorma F_y rakennuksen alimmassa kerroksessa määritetään hyödyntäen korkeuden resultanttia.



Kuva 24. Ankkurointi- ja puristusvoiman laskenta.

Kuvassa 24 voima F_y esittää kokonaisvaakakuormitusta, joka vaikuttaa tutkittavalle seinälohkole. Vaakakuormituksessa huomioidaan tuulen ja lisävaakavoiman vaikutus. Voima G_1 on seinälohkoon nähden poikittaisten seinien kuormitus ja G_2 on seinälohkon suuntaisten seinien kuormitus. Kuvassa 24 mitta h on rakennuksen korkeus ja mitta d on tilaelementin pidemmän sivun pituus.

11. TULOKSET

11.1 Jäykkyysominaisuudet

Työssä on tutkittu neljää erilaista seinärakennetta, joista valitaan esimerkkirakennukseen parhaiten sopiva. Rakenteiden kestävyysiin vaikuttaa oleellisesti taivutusjäykkyydet rakenteen x- ja y-suunnissa. Taulukossa 6 on havainnollistettu taivutusjäykkyyksien analyyttisen laskennan tuloksia huomioiden eri rakenteet, kun ripajako on 574,5 mm ja elementin leveys 1200 mm. Tuloksissa ei ole huomioitu FEM-Designista saatuja taivutusjäykkyyksien arvoja, vaan kaikki tulokset perustuvat analyyttisestä laskennasta saattuihin tuloksiin. Taulukosta 2 voidaan nähdä, että ruuvikiinnitteisissä rakenteissa y-suuntaisen taivutusjäykkyyden arvot ovat selvästi huonompia FEM-Designista saaduilla tuloksilla, jolloin ruuvikiinnitteisten rakenteiden kestävyudet ovat vieläkin huonompia. Y-suuntaisen taivutusjäykkyyden arvot vaikuttavat oleellisesti ripaseinien kantavuusominaisuuksiin. Taulukon 6 rakenteet ovat kappaleen 7 mukaisia.

Taulukko 6. *Taivutusjäykkyydet vertailussa.*

Rakenne (Ripa + levy) l = 1200 mm, k = 574,5 mm	Liimakiinnitys		Ruuvikiinnitys	
	1.) Ripa 102x51 + Levy 21 mm	3.) Ripa 85x51 + Levy 39 mm	2.) Ripa 102x51 + Levy 21 mm	4.) Ripa 85x51 + Levy 39 mm
Taivutusjäykkyys x-suunta (EI_y), (kN/m)	2620,56	4150,96	2065,77	2577,8
Siirtymän kapasiteetti, (kN/m)	13,76	21,79	10,85	13,53
Taivutusjäykkyys y-suunta (EI_x), (kN*m ²)	436,35	447,23	228,16	207,27

Taulukosta 6 huomataan, että selvästi paras kokonaistaivutusjäykkyys x-suunnassa saadaan rakenteella 3, jossa on 39 mm LVL-levy liimattuna ripoihin. Suurin syy hyvään tulokseen on levyn paksuus sekä kiinnitystavan merkitys. Levyn paksuus vaikuttaa oleellisesti rakenteen x-suuntaiseen kokonaistaivutusjäykkyyteen ja tätä kautta rakenteen kapasiteettiin siirtymän suhteen, joka on oleellinen tekijä määritettäessä rakennuksen jäykistystä. Levyn paksuuden vaikutuksen huomaa siinä, kun vertaa liima- ja ruuvikiinnitteisiä rakenteita keskenään. Tulosten erot ovat selviä käytettäessä samaa liitostyyliä ja eri levy- sekä ripakokoja. Liimakiinnitteisiä rakenteita verrattaessa rakenne 3 on noin 58 % parempi kuin rakenne 1 x-suuntaisessa kokonaistaivutusjäykkyydessä. Toisaalta ruuvikiinnitteisiä rakenteita verrattaessa, rakenne 4 on noin 25 % parempi kuin rakenne 2.

Seinärakenteiden kapasiteetit siirtymän suhteen ovat suoraan verrannollisia rakenteiden taivutusjäykkyyksiin x-suunnassa, sillä rakenteen siirtymä riippuu x-suuntaisesta taivutusjäykkyydestä. Tässä tapauksessa kapasiteetillä siirtymän suhteen tarkoitetaan sitä voimaa, minkä rakenne pystyy vastustamaan siirtymättä tasonsuunnassa siirtymärajan yli. (RIL 205-1-2017)

Y-suunnan taivutusjäykkyyksiä vertailtaessa, voidaan nähdä selvä ero liima- ja ruuviliitoksien välillä. Liimaliitoksella toteutetut rakenteet saavat jopa puolet suuremman y-suunnan taivutusjäykkyyden verrattaessa ruuviliitoksella toteutettuun rakenteeseen. Y-suunnan taivutusjäykkyyden erot johtuvat suurimmaksi osaksi liitoskerroimista. Liimaliitos on jäykkä, jolloin liitoskerroin $\gamma_l = 1$ mutta ruuviliitoksessa liitoskerroin tulee laskea kaavan (7) avulla. Tämä johtaa siihen, että ruuviliitoksen liitoskerroin pienentää rakenteen taivutusjäykkyyttä y-suunnassa. Se, että liitoskerroimilla on suurin vaikutus y-suuntaisen taivutusjäykkyyden tuloksiin, voidaan havaita verrattaessa liima- tai ruuviliitoksia rakenteita keskenään. Esimerkiksi liimaliitoksissa rakenteissa y-suuntaisen taivutusjäykkyyden ero toisiinsa nähden on vain noin 2 %, mikä merkitsee sitä, että levyn ja rivan kokojen merkitys on melko pieni. Y-suunnan taivutusjäykkyydet ovat pohjatietoa rakenteen pystykuorma- ja leikkausvoimakestävyyksille sekä liitoksen leikkausvoimaresultanttikestävyydelle levyn ja ripojen liitospinnassa.

11.2 Normaalivoima- ja leikkauskestävyys

Vertailtaessa seinärakenteita tärkeää on selvittää rakenteiden normaalivoima- sekä leikkausvoimakestävyys ja tutkia ripojen ja levyn välisessä liitospinnassa syntyvää leikkausvoimaresultanttikestävyttä. Taulukossa 7 on vertailtu tuloksia eri rakenteittain liitteessä 1 laskettujen tulosten mukaisesti. Taulukon 7 arvot ovat mitoitusarvoja ja rakenteet ovat kappaleen 7 mukaisia.

Taulukko 7. Rakenteiden kestävyksien vertailu mitoitusarvoina.

Rakenne (Ripa + levy)	Liimakiinnitys		Ruuvikiinnitys	
	1.) Ripa 102x51 + Levy 21 mm	3.) Ripa 85x51 + Levy 39 mm	2.) Ripa 102x51 + Levy 21 mm	4.) Ripa 85x51 + Levy 39 mm
Nurjahduskestävyys (Todellinen) (kN/m)	136,34	203,64	76,01	84,07
Nurjahduskestävyys (Tehollinen) (kN/m)	159,37	182,79	87,36	65,86
Leikkausvoimakestävyys (kN/m)	223,87	225,72	180,36	174,68
Liitoksen leikkausvoima- resultantti (kN/m)	202,97	310,17	83,74	81,32

Taulukon 7 tulokset pohjautuvat y-suunnan taivutusjäykkyyksiin. Kappaleen 10 mukaan esimerkikohteessa pystykuormitukset ovat yleisesti suurempia kuin vaakakuormitukset. Taulukon 7 tuloksista voidaan huomata, että määräävä on nurjahduskestävyys lähes jokaisessa rakenteessa. Varsinkin liimakiinnitteisissä rakenteissa liitoksen leikkausvoimaresultanttikestävyksiä vertailtaessa nurjahduskestävyksiin voidaan todeta, etteivät liitospintojen kestävyudet mitoiteta rakennetta, vaan ennen liitosten murtumista rakenne nurjahtaa vahvemmassa suunnassa. Ruuvikiinnitteisissä rakenteissa leikkausvoimaresultanttikestävyys on kuitenkin melko lähellä nurjahduskestävyyden arvoa ja jossain tilanteissa siitä voi tulla mitoitettava. Esimerkiksi rakenteessa 4 liitoksen leikkausvoimaresultanttikestävyys on pienempi kuin todellisen poikkileikkauksen nurjahduskestävyys. Jos tässä tilanteessa vaakakuormitus on sopivasti suurempi, kuin rakenteeseen vaikuttava pystykuorma, niin liitoksen leikkausvoimaresultanttikestävyys saattaa tulla mitoitettavaksi tilanteeksi.

Taulukon 7 mukaan rakenteilla on pienemmät kapasiteetit vahvemman suunnan nurjahdusta vastaan kuin leikkausvoimakestävyyttä vastaan. Samalla kun tiedetään, että esimerkkirakennuksessa pystykuormat ovat suurempia kuin rakennukseen vaikuttavat vaakakuormat, niin voidaan todeta, että rakenteet ehtivät nurjahtaa ennen kuin leikkausvoimakestävyysien käyttöasteet ylittyvät. Tuloksista huomataan, että liimakiinnitteisenä rakenteista saadaan parempi kapasiteetti irti. Parhaat tulokset osuvat taivutusjäykkyyksien tavoin rakenteelle 3.

Nurjahduskestävyyksien arvot on laskettu sekä tehollisen poikkileikkauksen, että todellisen poikkileikkauksen mukaisesti. Tehollinen poikkileikkaus on rakenne, joka on muutettu tehollisten mittojen mukaiseen suorakaidepoikkileikkaukseen. Tuloksista nähdään, että erot ovat melko pieniä riippumatta siitä kummalla tavalla nurjahduskestävyys määritetään. Vertailtaessa esimerkiksi rakenteen 3 arvoja on todellisen poikkileikkauksen nurjahduskestävyys noin 11 % suurempi. Toisaalta verrattaessa rakenteen 1 nurjahduskestävyyksiä on tehollisen poikkileikkauksen nurjahduskestävyys noin 17 % suurempi.

Tehollisen poikkileikkauksen nurjahduslaskentaa tarkistettiin myös FEM-Designilla. FEM-Designilla mallinnettiin analyyttisen laskennan mukaiset teholliset rakenteet ja rakenteille annettiin analyyttisen laskennan mukaiset maksimikuormitukset. FEM-tarkastelu antoi käyttöasteen hyvin lähelle analyyttisen laskennan mukaista käyttöastetta, joka todisti, että analyyttinen laskenta on laskettu kuten FEM-Designissa ja tuloksiin voidaan luottaa riittävän hyvin.

Taulukossa 8 on esitetty käyttöasteita rakenteiden kestävyyksille, kun seinää kuormittavat esimerkkirakennuksen kuormitukset. Kuormitusten laskenta on esitetty kappaleessa

10. Nurjahduskestävyyden tilanteessa seinää kuormittaa esimerkkirakennuksen märkätilan pystykuormitus. Leikkausvoimakestävyyden ja liitoksen leikkausvoimaresultantti-kestävyyden tilanteissa seinää kuormittaa suurin vaakakuormitus ensimmäisessä kerroksessa, jossa huomioidaan sekä tuulikuorma, että lisävaakavoima. Määritettäessä ripaseinärakenteen mitoittavaa tapausta, on tärkeää tutkia rakenteelle vaikuttavia kuormituksia ja niiden vaikutusta eri kestävyksiin.

Taulukko 8. *Rakenteiden mitoitusarvojen käyttöasteet esimerkkirakennuksessa.*

		Käyttöaste		
		Nurjahduskestävyys (Todellinen)	Leikkausvoima- kestävyys	Liitoksen leikkausvoima- resultanttikestävyys
Kuormitus:		Märkätila (123,18 kN/m)	1ks. Tuuli + lisä (50,21 kN/m)	1ks. Tuuli + lisä (50,21 kN/m)
Liima	1.) Ripa 102x51 + Levy 21 mm	90,4 %	22,4 %	24,7 %
	3.) Ripa 85x51 + Levy 39 mm	60,50 %	22,2 %	16,2 %
Ruuvi	2.) Ripa 102x51 + Levy 21 mm	162,1 %	27,8 %	60,0 %
	4.) Ripa 85x51 + Levy 39 mm	146,5 %	28,7 %	61,7 %

Taulukosta 8 voidaan huomata, että varsinkin liimakiinnitteiset rakenteet pysyvät hyvin sallituissa käyttöasteissa riippumatta rakenteesta. Liimakiinnitteisissä rakenteissa suurin käyttöaste tulee nurjahduskestävyydessä, kun rakennetta 1 kuormitetaan märkätilan kuormituksella. Tällöin rakenteen 1 käyttöaste on 90,4 %. Taulukon 8 kestävyksien kannalta, kumpikin liimakiinnitteinen rakenne toimisi esimerkkirakennuksessa.

Taulukon 8 ruuvikiinnitteiset rakenteet ylittävät suurimman sallitun käyttöasteen nurjahduskestävyyksissä. Tämä tarkoittaa sitä, että ruuvikiinnitteisillä rakenteilla esimerkkirakennuksen kaltainen rakennus olisi hyvin vaikeaa toteuttaa. Pahimmillaan ruuvikiinnitteisissä rakenteissa rakenteen 2 nurjahduskestävyyden käyttöasteeksi tulee noin 162,1 %, mikä on reilusti yli sallitun. Rakenteessa 4 nurjahduskestävyyden käyttöasteeksi tulee noin 146,5 %. Leikkausvoimakestävyyden ja liitoksen leikkausvoimaresultanttikestävyyden arvot pysyvät ruuvikiinnitteisissäkin rakenteissa sallituissa rajoissa. Leikkausvoimakestävyydessä käyttöasteeseen vaikuttaa oleellisesti kuitenkin elementin pituus. Taulukossa 8 ripaseinäelementin pituutena on käytetty testirakenteen mukaista pituutta, joka on 1200 mm. Pituutta kasvattaessa käyttöasteet suurenevat. Tämän takia rakennusta tarkemmin mitoittaessa on myös leikkausvoimakestävyyksien arvot huomioitava tarkemmin niin, että seinien pituudet huomioidaan todellisen tilanteen mukaisesti.

11.3 Palomitoitus

Liitteessä 2 on esitetty ripaseinärakenteen palomitoitusta. Laskennassa käytetään kantavan seinärakenteen päällä kahta 15 mm palokipsilevyä. Tavoitteena seinärakenteella on saada 90 minuutin palonkesto. Mitoituksen perusteella 90 minuutin palo tuottaisi LVL-levylle noin 22 mm tehollisen hiiltymissyvyyden. Tämä johtaisi siihen, että 21 mm LVL-levy palaisi kokonaan pois, jolloin palomitoitusta varten tulisi rakenteeseen kehittää heikomman suunnan nurjahdusta estävä rakenne. Lisäksi kaikki LVL-levyn ulkopuolinen rakenne tulisi olla hyvin palon kestävä. Tästä johtuen palon kannalta tärkeää olisi kantavissa seinissä hyödyntää 39 mm LVL-levyä, joka estäisi sekä heikomman suunnan nurjahduksen 90 minuutin palonkeston jälkeen, että palon leviämisen LVL-levyn ulkopuolelle.

Rakenteen mitoittava tapaus palotilanteessa on nurjahduskestävyys vahvemmassa suunnassa. LVL-levyn ansiosta palotilanteessa ei tarvitse huomioida heikomman suunnan nurjahdusta eikä kiepahduskestävyyttä. Näiden lisäksi palotilanteessa ei tarvitse myöskään tarkastella leikkaus- ja tukipainekestävyyttä eikä taipumaa. (Paloturvallinen puutalo, liite 2)

Vahvemman suunnan nurjahduskestävyyden määrääväksi tekijäksi tuli ripajako, joka määrää yhdelle rivalle vaikuttavan kuormituksen. Taulukossa 9 on eritelty märkä- ja kuivatilalan palotilanteen rasitukset ja kestävyudet maksimaalisella ripajaolla kuhunkin tilanteeseen nähden. Ripajaolla on oleellinen merkitys siihen kuinka paljon yksi ripa ottaa vastaan palon aikaista kuormitusta. Taulukon 9 arvot ovat mitoitettu käyttäen rakennetta 3, jossa on liimattu yhteen 39 mm LVL-levy sekä 51 * 85 mm LVL-rivat.

Taulukko 9. *Palotilanteen rasitukset ja kestävyudet.*

	Märkätila	Kuivatila
Ripajako (mm)	260	490
Kuormitus palossa (kN)	24,04	24,15
Kestävyys palossa (kN)	24,17	24,17
Käyttöaste (%)	99 %	100 %

Taulukosta 9 nähdään, että märkätilojen kohdalla kuormittavimmissa kohdissa ripajaon tulisi olla jopa 260 mm ja kuivatilojen kohdalla vastaava arvo on noin 490 mm. Tässä tilanteessa palomitoituksesta saattaisi mitoittava tekijä ripajakoa ajateltaessa. Ripajaolla on suuri merkitys siihen, kuinka suuri pystykuormitus ripoihin vaikuttaa palotilanteessa.

11.4 Valittu rakenne

Kaikki laskelmat ja mitoitukset huomioiden toimivimmaksi rakenteeksi osoittautuu rakenne 3, jossa käytetään 39 mm LVL-levyä sekä 51 * 85 mm LVL-ripoja. Rakenne toimii palotilanteessa melko hyvin ja kantavuus- sekä jäykkyysominaisuudet ovat parhaita verrattaessa muihin tutkittuihin rakenteisiin. Kestävyyksien kannalta myös 21 mm LVL-levyllä olisi voitu päästä haluttuun tulokseen mutta varsinkin palomitoituksen osalta 39 mm LVL-levy on oleellinen asia, jolla varmistetaan, ettei palo leviä seinärakenteen sisään vaaditussa palonkestossa.

Ripaseinärakenteen tärkeä ominaisuus on se, että ripajakoa voidaan muuttaa riippuen sen tarpeesta. Enemmän kapasiteettia vaativissa kohdissa voidaan käyttää tiheämpää ripajakoa ja kohdissa, joihin ei suuria kuormituksia vaikuta voidaan ripajakoa suurentaa niin, että seinärakenteesta saadaan hyvin optimoitu kapasiteetin ja kustannusten suhteen. Taulukossa 10 on esitetty, miten ripajako vaikuttaa valitun rakenteen rakenneominaisuuksiin, kun seinäelementin leveys on 1200 mm ja ripajako vaihtelee tilanteen mukaan.

Taulukko 10. Valitun rakenteen ripajaon merkitys rakenneominaisuuksiin.

Rakenne: l = 1200 mm	Valittu rakenne: 3.) Ripa 85x51 + Levy 39 mm		
	Ripajako:	k300	k600
Taivutusjäykkyys y-suunta (EI_x), ($kN \cdot m^2$)	805,17	428,22	214,11
Taivutusjäykkyys x-suunta (EI_y), (kN/m)	4396,55	4215,82	3781,86
Nurjahduskestävyys (Todellinen), (kN/m)	229,23	202,10	171,42
Leikkausvoimakestävyys, (kN/m)	274,59	222,48	176,58
Liitoksen leikkausvoimaresultantti, (kN/m)	516,54	297,04	148,52

Taulukosta 10 voidaan huomata, että ripajaolla on selvä merkitys seinärakenteen ominaisuuksiin. Pienellä ripajaolla ominaisuudet ovat paremmat kuin suurella ripajaolla. Taulukosta 10 voidaan vertailla esimerkiksi 300 mm ja 600 mm ripajakoja. Ripajaon kaksinkertaistuksessa huomataan, että y-suunnan taivutusjäykkyys kasvaa noin 88 %. Toisaalta x-suunnan taivutusjäykkyys kasvaa vain noin 4 % ripajaon kaksinkertaistuksessa. Todellisen poikkileikkauksen nurjahdus kestävyys verrattaessa 300 mm ripajaollinen rakenne on noin 13 % parempi kuin 600 mm ripajaolla tehty rakenne. Leikkausvoimakestävyyksissä 300 mm ripajaolla saadaan noin 23 % paremmat ominaisuudet kuin 600 mm ripajaolla. Liitoksessa vaikuttavissa leikkausvoimaresultantti kestävyys vertailtaessa ripajaon kaksinkertaistuksessa 300 mm ripajaolla saadaan noin 74 % parempi kestävyys. Yleisesti voidaan siis havaita, että ripajaolla on selvä vaikutus seinärakenteen ominaisuuksiin ja jakoa muuttamalla saadaan seinistä hyvin optimoituja. Tärkeänä huo-

miona taulukosta 10 voidaan havaita myös, että ripajaan ollessa 1200 mm, mitoittavimaksi kestävyudeksi voi tulla liitoksen leikkausvoimaresultanttikestävyys. Tässä vaikuttaa kuitenkin, minkä suuruisia pysty- ja vaakakuormitukset ovat.

11.5 Jäykistys ja ankkurointi

Seuraavaksi valittua rakennetta on tutkittu esimerkkirakennuksen jäykistävässä seinissä ja pyritty selvittämään voidaanko ripaseinäarakenteella tehdä vähintään kahdeksan kerroksinen tilaelementtikerrostalo. Tarkoituksena on varmistaa, onnistuuko valitulla seinärakenteella rakennuksen jäykistäminen ja etteivät ankkurointivoimat tuota ongelmia.

Jäykistysmitoitus on tehty liitteessä 3 ja taulukkoon 11 on koottuna mitoituksista saadut käyttöasteet kuvan 15 mukaisille seinälohkoille sekä siirtymän, että leikkausvoiman suhteen. Lohkot X1–X5 ovat rakennuksen lyhyemmällä sivulla olevia seinäloikkoja ja lohkot Y1.1–Y11.2 ovat rakennuksen pidemmällä sivulla olevia seinäloikkoja. Pidemmän sivun nurkka-alueilla mitoituksessa on huomioitu koko päätyseinä, jolloin vaakakuorman vaikutuksesta on huomioitu ala- ja yläpuolinen tuulen vaikutus. Muissa pidemmän sivun seinäloikoissa, mitoituksessa on huomioitu vain puolet rakennuksesta niin ettei huoneistojen välinen porraskäytävä välitä kuormia tilaelementiltä toiselle. Rakennuksen lyhyemmällä sivulla jäykistyksessä on huomioitu seinät koko rakennuksen pituudelta.

Taulukko 11. *Esimerkkirakennuksen jäykistysmitoitus rakenteella 3.*

Seinälohko	Käyttöaste	
	Siirtymä	Leikkaus
X1	44 %	11 %
X2	45 %	12 %
X3	20 %	5 %
X4	26 %	7 %
X5	24 %	6 %
Y1.1 + 1.2	48 %	13 %
Y2.1	61 %	14 %
Y3.1	39 %	11 %
Y4.1	62 %	15 %
Y5.1	56 %	15 %
Y6.1	62 %	15 %
Y7.1	39 %	11 %
Y8.2	79 %	14 %
Y9.2	33 %	9 %
Y10.2	53 %	15 %
Y11.1 + 11.2	50 %	13 %

Taulukosta 11 voidaan huomata, että siirtymä- ja leikkauskäyttöasteet pysyvät hallinnassa esimerkkirakennuksessa. Taulukosta 11 nähdään, että käyttöasteet leikkauksen suhteen ovat melko matalia eikä niiden suhteen ole suurempia ongelmia. Käyttöasteet siirtymän suhteen ovat selvästi suurempia ja ne kasvavat varsinkin leveillä seinälohkoilla. Tässä tilanteessa ongelmia ei tule käyttöasteiden kanssa, mutta mahdollisessa ongelmatilanteessa voitaisiin tilanne ratkaista esimerkiksi muuttamalla tilaelementin sisäinen väliseinä kantavaksi seinäksi tai huomioida porraskuilun seinät jäykistyksessä. Mitoittavin kohta taulukon 11 mukaan on seinälohko Y8.2, jossa siirtymän käyttöaste on noin 79 %. Tässä seinälohkossa kuormitusalueen pituus on noin 6,9 metriä, joka johtuu siitä, että esimerkkirakennuksessa reuna-alueiden tilaelementit ovat käännetty poikittain niin, että tilaelementin pidempi sivu on myös rakennuksen pidemmällä sivulla. Kun laskennassa ei huomioida tilaelementtien sisäisiä väliseiniä, niin seinälohkon Y8.2 käyttöaste nousee näinkin korkeaksi.

Analyttisen laskennan perusteella rakenne 3 toimii jäykistävänä seinärakenteena kahdeksan kerroksisessa tilaelementtikerrostalossa. Laskenta on toteutettu hyvin yksinkertaistetusti ja jäykistykselle lisäkapasiteettia voidaan tuoda huomioimalla kaikki seinät jäykistyksessä. Nyt huomioita on jätetty kaikki aukolliset seinäelementit sekä porraskäytävän seinäelementit.

Tilaelementissä vaikuttavia ankkurointi- ja puristusvoimia lähdettiin ratkaisemaan tasapainoyhtälöiden perusteella. Yksinkertaistetun analyttisen laskennan perusteella seinälohkolla Y9.2 vaikuttaa noin 56 kN vaakakuormitus. Näin pieni vaakakuormitus johtaa siihen, että seinään ei synny ankkurointivoimia, vaan elementin kummassakin päässä vaikuttaa puristusvoima. Tämä vaikuttaa positiivisesti rakenteiden suunnitteluun, sillä liitoksissa ei tarvitse huomioida näin ollen suuria ankkurointivoimia ja säästytään suurilta liitososilta. Puristusvoimat on kuitenkin huomioitava seinien mitoituksessa ja ripajakoa on säädeltävä sen mukaan. Puristusvoimien tullessa hyvinkin suuriksi saatetaan seinien nurkka-alueilla joutua käyttämään järeämpiä pilareita kuljettamaan vaadittavat puristusvoimat alas perustuksille. Laskennan perustella seinän päädyissä vaikuttavat puristusvoimat ovat noin $F_t = 226,5$ kN ja $F_c = 453,7$ kN. Ankkurointivoimien suuruuteen vaikuttaa kuitenkin oleellisesti ankkurointiliittimen joustaminen eli liitosjäykkyys. Liitoksen ollessa löysä, seinä pääsee nousemaan enemmän nurkastaan, jolloin pystyvoimaresultantti vaikuttaa lähempänä toista nurkkaa. Toisaalta jäykkä ankkurointiliitos pitää seinän paremmin paikallaan, jolloin puristusvoima jakautuu suuremmalle alueelle eli seinän sisäisen voimaparin varsi on pienempi, mikä johtaa suurempiin vetorasituksiin.

Yleisesti on hyväksyttyä, että ankkurointivoimien pienentämiseen käytetään 1/8 osaa moduulin omasta painosta. (Luntta 2021) Liitteen 3 laskennassa on ankkurointivoiman

pienentämiseen käytetty $1/4$ moduulin omasta painosta, joka on suurin mahdollinen arvo, jota tässä tarkoituksessa voidaan käyttää. Tämä oletamus perustuu siihen, että ankkurointiliittimet ovat hyvin löysiä ja seinä pääsee nousemaan nurkastaan, jolloin pystyvoimaresultantti vaikuttaa lähempänä toista nurkkaa. Todellisessa tapauksessa rakennuksen ankkurointi- ja puristusvoimat tulisi määrittää FEM-analyysillä, jotta voidaan huomioida kaikki muuttuvat tekijät esimerkiksi rakenteen geometriassa ja ulkoisten voimien jakautumisessa. Laskennassa on kuitenkin huomioitu, mitä ankkurointivoimalle tapahtuu, jos tilaelementin omasta painosta käytetäänkin $1/8$. Vaakakuormituksen ollessa 56 kN, ei ankkurointivoimia synny tässäkään tilanteessa, vaan tukipisteeseen syntyy noin 56 kN puristusvoima.

Laskennalla on tutkittu, millaisilla vaakakuormitusten arvoilla liitoksissa syntyy ankkurointivoimia. Käytettäessä tilaelementin omasta painosta $1/4$ tarvitaan vaakakuormitusta jopa 170 kN, jotta ankkurointivoimaksi tulee noin 7,6 kN vetoa. Toisaalta, jos tilaelementin omasta painosta hyödynnetään yleisesti hyväksytty $1/8$, niin vaakakuormitusta tarvitaan noin 85 kN, jotta ankkurointivoimaksi tulee 3,8 kN vetoa.

12. YHTEENVETO

Ripaseinärakenteen yleisinä hyötyinä voidaan pitää rakenteen keveyttä, mittatarkkuutta, optimaalista rakennetta, fysikaalista toimivuutta sekä toimintaa onnettomuustilanteissa. Verrattaessa riparakennetta CLT-rakenteeseen on tärkeimmät erot kustannuksissa sekä optimaalisuudessa. Rankarakenteen heikkoutena ovat esimerkiksi lujuus- ja jäykkyystekniset ominaisuudet tilaelementtikerrostalossa.

Ripaseinärakenteen materiaaliksi valikoitui LVL, sillä se on mittatarkkaa ja yleisiltä ominaisuuksiltaan toimivaa seinärakenteisiin. Optimoimalla rakenteesta saadaan melko kevyt mutta silti hyvin luja ja jäykkä. Rakennusfysikaalisten laskelmien mukaan jopa 21 mm LVL-levy paksuudella saadaan riittävästi höyrynvastusta ulkoseiniin, kunhan seinän ulkopinnassa käytetään lämmönvastukseltaan vähintään 0,5 m²K/W sekä hyvin kosteutta läpäisevää tuulensuojakerrosta. Työssä toimivana tuulensuojakerroksena käytettiin 9 mm kipsikartonkilevyä ja 30 mm mineraalivillalevyä.

Työssä kantaviksi- ja jäykistäviksi seinärakenteiksi valittiin neljä erilaista ripaseinärakennetta, joiden kokonaispaksuus sai olla 123 mm, joka mahdollisti toimivuuden Lehto Components Oy:n nykyisissä tilaelementeissä. Ripaseinävaihtoehdoiksi valittiin rakenteet, joissa LVL-X –levy on joko liimattu tai ruuvattu LVL-S –ripoihin. Levyjen paksuuksiksi valikoitui 21 mm tai 39 mm. Työssä seinien ominaisuuksia tutkittiin ja vertailtiin analyttisellä laskennalla sekä FEM-Designilla ja laskennan avulla määritettiin seinärakenteiden taivutusjäykkyydet x- ja y-suunnassa, puristusjäykkyys, leikkausvoimakestävyys, palonkestävyys, nurjahduskestävyys sekä levyn ja rivan liitoksessa vaikuttava leikkausvoimarelevanttikkestävyys. FEM-Designin avulla vahvistettiin, että analyttiseen laskentaan voidaan luottaa riittävästi työssä. FEM-Designin avulla vertailtiin rakenteiden y-suunnan taivutusjäykkyyksiä sekä puristusjäykkyyksiä. Vertailussa selvisi pieniä eroavaisuuksia tuloksissa, mitkä johtuivat tehollisten leveyksien eroavaisuuksista sekä kuormitusten epäkeskisyyksistä.

Tuloksien perusteella paras ja toimivin rakenne oli 39 mm LVL-X –levyn sisältävä rakenne, jossa on liimattuna 85 * 51 mm LVL-S –rivat. Rakenne toimi esimerkkirakennuksen kuormia vastaan ja oli ylivoimainen verrattaessa x-suuntaisia taivutusjäykkyyksiä, jotka ovat oleellisia määritettäessä rakennuksen jäykistystä. Lisäksi palonkestävyyttä määritettäessä 21 mm LVL-levyllä ei päästäisi vaadittavaan palonkestoon. Ruuviliitoksen heikkoutena on siinä esiintyvät liitossiirtymät sekä ruuvien kiinnittämisestä syntyvä tahdistava työvaihe tehdasolosuhteissa. Ruuvikiinnitteisissä rakenteissa y-suuntaiset

taivutusjäykkyydet heikkenevät myös reilusti verrattaessa liimakiinnitykseen, joka vaikuttaa laajasti rakenteen nurjahdus- ja leikkausvoimakestävyyskäyttöön sekä liitoksessa vaikuttavaan leikkausvoimaresultanttikestävyyskäyttöön.

Valitun rakenteen mitoittaviksi tekijöiksi osoittautui vahvemman suunnan nurjahduskestävyys sekä palonkestävyys. Mitoitusten perusteella märkätilassa vaikuttaa suurimmillaan 123,2 kN/m murtorajatilan kuormitus. Työssä kuorman epäkeskisyytenä käytettiin LVL-levyn painopisteen etäisyyttä neutraaliakselilta. Ripajaan ollessa 574,5 mm nurjahduskestävyyden käyttöaste oli valitulla 39 mm LVL-levyllisellä rakenteella märkätilan kohdalla noin 60,5 %. Tilanteissa, joissa kapasiteetit nousevat lähelle korkeinta mahdollista arvoa, voidaan ripajakoa tihentää. Ripajako vaikuttaa oleellisesti rakenteen kestävyyskäyttöön ja jäykkyysominaisuuksiin.

Työssä valitun seinärakenteen kestävyyskäyttöä tutkittiin kahdeksan kerroksisen esimerkkirakennuksen avulla. Esimerkkirakennuksen avulla selvitettiin rakenteessa syntyviä pysty- sekä vaakakuormituksia sekä rakennuksen jäykistämiseen vaadittavia ominaisuuksia ja liitoksissa syntyviä puristus- ja ankkurointivoimia. Esimerkkirakennuksen avulla selvitettiin myös onnettomuustilanteen kuormitustapauksia.

Työssä tutkittiin puukerrostalon palonkestävyyttä ja tarkemmin seinän vaatimuksia palonkestolle. Palonkestoa tutkittiin esimerkkirakennuksessa. Tämän tyyllisessä rakennuksessa sprinklerit ovat välttämättömät ja rungon vaatimukset ovat yleisesti vähintään R 60 vaatimustasoa. Työssä huomioon otettiin tarkemmin myös P2-luokan kahdeksankerroksisen rakennuksen suojaverhoamattomien pintojen erityisvaatimukset. Kustannusten kannalta tärkeänä erityisvaatimuksena oli se, että katto- ja seinäpintojen toteuttaessa luokka REI 90, voidaan suojaverhoamatonta katto- ja seinäpintaa hyväksyä jopa 80 %. Laskelmien mukaan 90 minuutin palonkesto vaatii rakenteellisesti 39 mm LVL-levyn lisäksi kaksi F-tyyppin palokipsilevyä rakenteen päälle. Rakenteen avulla päästiin lopputulokseen, joka kestää esimerkkirakennuksessa sekä kuiva- että märkätilan rasituksia. Ripajaosta tuli hyvin mitoittava tässä tilanteessa. Märkätila vaatii jopa 260 mm ripajaan palotilanteen kuormia vastaan ja kuivatila vastaavasti noin 490 mm ripajaan, jotta rakenteet saatiin kestävämmän halutulla tavalla.

Jäykistysmitoituksen perusteella valittu rakenne toimi hyvin esimerkkikohteessa. Kapasiteetit eivät ylittyneet siirtymän eikä leikkauksen suhteen ja rakenteissa vaikuttavat kuormitukset olivat maltillisia. Analyysisessä laskennassa huomioita on jätetty kuitenkin kaikki aukolliset seinäelementit sekä porraskuilun seinät, joiden avulla olisi mahdollista parantaa jäykistyskapasiteetteja.

Ankkurointi- ja puristusvoimien määrittämisessä esimerkkirakennuksesta valittiin yksi ehjä seinä, jota lähdettiin tutkimaan tarkemmin. Pienestä vaakakuormituksesta johtuen rakenteeseen ei syntynyt laskelmien mukaan ankkurointivoimia vaan seinän molemmissa päädyissä vaikutti puristusvoima. Tämä on positiivista liitosteknisesti, sillä tällöin ei tarvita järeitä ankkurointiliitoksia mutta puristusvoimat tulee silti huomioida. Laskennassa tilaelementeistä huomioitiin aluksi 1/4 niiden omasta painosta, joka on suurin mahdollinen voima, jota voidaan hyödyntää ankkurointivoimien laskennassa. Todellisuudessa ankkurointivoimien laskennassa hyödynnetään yleisesti noin 1/8 tilaelementtien omasta painosta, joka vaikuttaa oleellisesti ankkurointivoimiin. Työssä tutkitulla seinälohkolle ei syntynyt ankkurointivoimia, vaikka tilaelementtien omasta painosta olisi hyödynnetty 1/8. Puristusvoimat voivat kuitenkin olla melko suuria, joka tulee huomioida erikseen ripajassa sekä mahdollisissa järeämissä puupilareissa. Nurkissa olevien puupilareiden avulla voitaisiin helpottaa myös liitosteknisiä asioita sekä onnettomuustilanteen vaihtoehtoja kuormansiirtoreittiä. Puukerrostaloissa yleisesti on käytössä vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti, jossa seinien on toimittava seinämäisinä palkkeina ja nurkka-alueilla on oltava pistemäisiä pystykuormia välittäviä rakenteita.

Työn tuloksien perustella ripaseinärakenteella, jossa hyödynnetään 39 mm LVL-X –levy sekä 85 * 51 mm LVL-S –ripoja, voidaan rakentaa kahdeksan kerroksinen esimerkkikohteen mukainen tilaelementtikerrostalo. Tilaelementtien nurkka-alueille voidaan tarvita vahvistavia pilareita, joiden tarve tulee mitoittaa erikseen laajemmalla tutkimuksella. Laskelmien perustella rakennuksen tarkemmassa mitoituksessa on tutkittava tarkasti eri kestävyksiä, joista tärkeimpinä ainakin rakenteen nurjahdus- ja leikkausvoimakestävyys sekä palonkestävyys. Palonkestävyyden kannalta rakenteiden toimivuutta voidaan parantaa lisäämällä kantavan rakenteen päälle enemmän palonsuojamateriaalia tai helpottaa vaatimuksia palon suhteen. Jatkoa ajatellen on myös tärkeää mitoittaa rakennusjäykistyksen sekä ankkurointivoimien kannalta FEM-ohjelman avulla, jotta voidaan varmistua rakennuksen jäykistyksen toimivuudesta sekä rakennuksen eri osissa syntyvien ankkurointivoimien suuruuksista.

LÄHTEET

- Hytönen Joni (2021). Strusoft Finland. Haastattelu
- Jokinen Anttoni (2019). Asuinkerrostalon lisäkerrosrakentaminen puurakenteisilla tilaelementeillä. Diplomityö. Oulun Yliopisto. Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma. Saatavuus: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201906042334.pdf>
- Kerto-käsikirja (2012), Ruuviliitosten mitoitus, MetsäWood, VTT
- Kevarinmäki Aki (2017). RIL 205-1-2017 lisäohjeet: CrossLam Kuhmo CLT. VTT Expert Services Oy. 5.12.2017.
- Kimpimäki Riku (2019). Puukerrostalot – Mikä selittää puukerrostalojen suosion hurjan kasvun? Saatavuus: <https://lehto.fi/blogi/puukerrostalot-mika-selittaa-puukerrostalojen-suosion-hurjan-kasvun/>
- Koivukangas Miikka (2020). A-energiatehokkuusluokan asuinkerrostaloihin liittyvien rakennusfysikaalisten riskien kartoitus. Diplomityö. Tampereen Yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Saatavuus: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/124091/KoivukangasMiikka.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Laakkonen Pekka (2016). 4-kerroksisen CLT-tilaelementtitornin jäykistyskapasiteetti. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavuus: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/24432/laakkonen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Lahtela Tero (2018). Puuinfo. Jatkuvan sortuman estäminen. vaativien puurakenteiden suunnittelu -koulutus 2018, Moduuli 2
- Lunta Jarkko (2021). Yksikön johtaja. Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy. Haastattelu.
- Lunta Jarkko (2013). Ristiinliimattu massiivipuulevykenttä rungon vaakakuormia siirtävänä rakenteena. Diplomityö. Aalto-Yliopisto. Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma. Rakennetekniikka
- Manninen Ville (2021). Myyntijohtaja. Oy Crosslam Kuhmo Ltd. Haastattelu
- Metsä Wood (2015). Kerto kantaviin rakenteisiin. Saatavuus: <http://www.segrateproduce.it/sites/default/files/mw-kerto-fi-2012.pdf>
- Metsä Wood (2020). Puuelementit. Saatavuus: <https://www.metsawood.com/fi/tuotteet/kerto/kerto-kayttokohteet/Pages/puuelementit.aspx>
- Mäkelä Mikko, Soininen Lauri, Tuomola Seppo, Öistämö Juhani (2010). Tekniikan kaavasto (9. painos). Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.
- Puuinfo (2020). Lujuusteknisiä ominaisuuksia. Saatavuus: <https://puuinfo.fi/puu-tieto/puun-ominaisuuksia/lujuusteknisia-ominaisuuksia/>
- Puuinfo (2021), Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen, liite2, 29.1.2020, Saatavuus: <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/paloturvallinen-puutalo-asuin-ja-toimitilarakentaminen/>

- Puuinfo (2020). Rakenteet. Saatavuus: <https://puuinfofi.test.cchoosting.fi/rakenteet/>
- Puuinfo (2020). Runkojärjestelmät. Saatavuus: <https://puuinfo.fi/rakenteet/yhdistelmaraakenteet/puukerrostalon-runkojarjestelmat/>
- Puuinfo (2020). Sahatavara ja sen jalosteet. Saatavuus: <https://puuinfo.fi/puutieto/sahatavara-ja-sen-jalosteet/sahatavaran-laatu/>
- Puuinfo (2020). Vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti jatkuvan sortuman estämisessä. Saatavuus: <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/vaihtoehtoinen-kuormansiirtoreitti-jatkuvan-sortuman-estamisessa/>
- Puuinfo (2020). Viilupuu (LVL). Saatavuus: <https://puuinfo.fi/puutieto/insinööri-tuotteet/viilupuu-lvl/>
- Puulehti. 2/2020. Puuinfo
- Puulehti. 1/2020. Puuinfo
- RIL 201-1-2017. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4.
- RIL 205-1-2017. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-1.
- RIL 205-2-2019. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Puurakenteiden palomitoitus eurokoodi EN 1995-1-2.
- RIL 250-2020. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen.
- RIL 255-1-2014. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysiikkaalinen suunnittelu ja tutkimus.
- Räsänen Timo (2021). LVL Tuotepäällikkö. Puumerkki Oy. Haastattelu
- SFS-EN 1990 + A1 + AC (2006). Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry.
- SFS-EN 1991-1-1 + A1 + AC (2014). Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry.
- SFS-EN 1991-1-7 + AC (2002). Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry.
- SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC (2014). Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry.
- Sorri Senni (2016). CLT-tilaelementtikerrostalon rakennussuunnitteluohjeistus. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Stora Enso (2020). LVL by Stora Enso Tekninen esite. Saatavuus: https://www.puumerkki.fi/files/7413/Tekninen_esite.pdf
- Strusoft (2021). Saatavuus: <https://strusoft.com/products/fem-design>

Säyriö Jere (2016). Tilaelementtirakentamisen vertaaminen paikalla rakentamiseen. Opinnäytetyö. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Saatavuus: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/107594/Sayrio_Jere.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vinha Juha, Laukkarinen Anssi, Mäkitalo Mikael, Nurmi Sakari, Huttunen Petteri, Pakkanen Tomi, Kero Paavo, Manelius Elina, Lahdensivu Jukka, Köliö Arto, Lähdesmäki Kimmo, Piironen Jarkko, Kuhno Vesa, Pirinen Matti, Aaltonen Anu, Suonketo Jommi, Jokisalo Juha, Teriö Olli, Koskenvesa Anssi ja Palolahti Tuomas (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Saatavuus: https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/128222/vinha_ilmastonmuutoksen_ja_lammoneristyksen_lisayksen_vaikutukset.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vänttilä Ville-Matti (2021). Lehto Asunnot Oy. Haastattelu

10/16 Ympäristöministeriön asetus (2016). Rakenteiden onnettomuuskuormia koskevista kansallisista valinnoista sovellettaessa standardia SFS-EN 1991-1-7.

LIITE 1: RAKENTEIDEN MITOITUS

Rakenteen mitoitus:

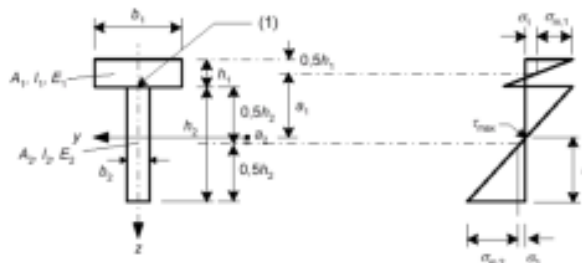
(EN 1995-1-1; RIL 205-1-2017; Luntta 2021; Hytönen 2021; RIL 255-1-2014)

Elementin leveys:	$l := 1200 \text{ mm}$
Elementin korkeus:	$h_{\text{elementti}} := 3150 \text{ mm}$
Ripajako:	$kk := 574.5 \text{ mm}$
Liukumoduuli LVL:	$G_{0,LVL} := 600 \text{ MPa}$
Kimmokerroin LVL-X:	$E_{X,LVL} := 10500 \text{ MPa}$
Kimmokerroin LVL-S:	$E_{S,LVL} := 13800 \text{ MPa}$

Ratkaistaan taivutusjäykkyys y-suunnassa + puristusjäykkyys.

Taivutusjäykkyys: (EN 1995-1-1)

Ripa 102x51 + LVL-levy 21mm liimakiinnitys, Jäykkä liitos



(EN 1995-1-1, s. 103, B.1.4)

$$h_1 := 21 \text{ mm}$$

$$b_1 = b_{\text{ef}}$$

Tehollinen leveys b_{ef} :

(RIL 205-1-2017, s. 144)

Enimmäisarvo b_{cef} :

Tehollinen leveys:

$$A_1 := b_1 \cdot h_1$$

$$A_2 := b_2 \cdot h_{2,1}$$

Jäykkäliitos, joten:

-Neutraaliakselin etäisyys rivan painopisteakselista:

-Levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta:

-Rivan alapinnan ja

neutraaliakselin välinen etäisyys:

Tarkistus:

$$h_{2,1} := 102 \text{ mm}$$

$$b_2 := 51 \text{ mm}$$

$$b_{\text{ef}} = \min(b_{\text{cef}} + b_w, kk)$$

$$b_{\text{cef}} = \min(0.1 \cdot h_{\text{elementti}}, 20 \cdot h_1) = 315 \text{ mm}$$

$$b_{\text{ef}} = \min(b_{\text{cef}} + b_2, kk) = 366 \text{ mm}$$

$$b_1 := b_{\text{ef}}$$

$$I_1 := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$$

$$I_2 := \frac{b_2 \cdot h_{2,1}^3}{12}$$

$$\gamma_1 := 1 \quad \gamma_2 := 1$$

$$a_2 := \frac{\gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_{2,1})}{2 \cdot (\gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 + \gamma_2 \cdot E_{S,LVL} \cdot A_2)} = 32.55 \text{ mm}$$

$$a_1 := \frac{1}{2} \cdot (h_1 + h_{2,1}) - a_2 = 28.95 \text{ mm}$$

$$h := a_2 + \frac{1}{2} \cdot h_{2,1} = 83.55 \text{ mm}$$

$$h_{2,1} + h_1 = 123 \text{ mm}$$

$$a_{1,21} := a_1 = 28.95 \text{ mm}$$

$$t := h_1 + h_{2,1} = 123 \text{ mm}$$

$$A_i := l \cdot h_1 = 25200 \text{ mm}^2$$

$$EI_1 := I_1 \cdot E_{X,LVL}$$

$$EI_2 := I_2 \cdot E_{S,LVL}$$

$$h + a_1 + \frac{h_1}{2} = 123 \text{ mm}$$

$$a_{2,21} := a_2 = 32.55 \text{ mm}$$

Taivutusjäykkyys: (Liimakiinnitys 21 mm)

(testirakenteen leveydelle)

$$EI_{of.1x} := \frac{\left((EI_1 + \gamma_1 \cdot E_{XLVL} \cdot A_1 \cdot a_1^2) + (EI_2 + \gamma_2 \cdot E_{SLVL} \cdot A_2 \cdot a_2^2) \right)}{kk} \cdot I = 436.35 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Taivutusjäykkyys: (T-poikkileikkaus)

$$EI_{of.1x.2} := (EI_1 + \gamma_1 \cdot E_{XLVL} \cdot A_1 \cdot a_1^2) + (EI_2 + \gamma_2 \cdot E_{SLVL} \cdot A_2 \cdot a_2^2) = 208.9 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Puristusjäykkyys:

Pelkkä levy:

$$EA_{1,levy} := \frac{E_{XLVL} \cdot \left(h_1 \cdot \frac{I}{2} \right)}{h_{elementti}} = 42000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Levy + ripa:

$$EA_1 := \frac{\left(E_{XLVL} \cdot \left(h_1 \cdot \frac{I}{2} \right) + E_{SLVL} \cdot A_2 \right)}{h_{elementti}} = 64789.71 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Taivutusjäykkyys: (EN 1995-1-1)

Ripa 84x51 + LVL-levy 39mm liimakiinnitys, Jäykkä liitos

$$h_1 := 39 \text{ mm}$$

$$h_2 := 84 \text{ mm}$$

$$t := h_1 + h_2 = 123 \text{ mm}$$

$$b_1 = b_{ef}$$

$$b_2 = 51 \text{ mm}$$

$$A_1 := I \cdot h_1 = 46800 \text{ mm}^2$$

$$A_1 := b_1 \cdot h_1$$

$$I_1 := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$$

$$EI_1 := I_1 \cdot E_{XLVL}$$

$$A_2 := b_2 \cdot h_2$$

$$I_2 := \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12}$$

$$EI_2 := I_2 \cdot E_{SLVL}$$

Jäykkäliitos, joten:

$$\gamma_1 := 1 \quad \gamma_2 := 1$$

-Neutraaliakselin etäisyys rivan painopisteakselista:

$$a_2 := \frac{\gamma_1 \cdot E_{XLVL} \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2)}{2 \cdot (\gamma_1 \cdot E_{XLVL} \cdot A_1 + \gamma_2 \cdot E_{SLVL} \cdot A_2)} = 44.1 \text{ mm}$$

-Levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta:

$$a_1 := \frac{1}{2} \cdot (h_1 + h_2) - a_2 = 17.4 \text{ mm}$$

-Rivan alapinnan ja neutraaliakselin välinen etäisyys:

$$h := a_2 + \frac{1}{2} \cdot h_2 = 86.1 \text{ mm}$$

Tarkistus:

$$h_2 + h_1 = 123 \text{ mm}$$

$$h + a_1 + \frac{h_1}{2} = 123 \text{ mm}$$

$$a_{1,39} := a_1 = 17.4 \text{ mm}$$

$$a_{2,39} := a_2 = 44.1 \text{ mm}$$

Taivutusjäykkyys: (Liimakiinnitys 39 mm)

(testirakenteen leveydelle)

$$EI_{of.2x} := \frac{\left((EI_1 + \gamma_1 \cdot E_{XLVL} \cdot A_1 \cdot a_1^2) + (EI_2 + \gamma_2 \cdot E_{SLVL} \cdot A_2 \cdot a_2^2) \right)}{kk} \cdot I = 447.23 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Taivutusjäykkyys: (T-poikkileikkaus)

$$EI_{of.2x.2} := (EI_1 + \gamma_1 \cdot E_{XLVL} \cdot A_1 \cdot a_1^2) + (EI_2 + \gamma_2 \cdot E_{SLVL} \cdot A_2 \cdot a_2^2) = 214.11 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Puristusjäykkyys:

Pelkkä levy:

$$EA_{2,levy} := \frac{E_{XLVL} \cdot \left(h_1 \cdot \frac{I}{2} \right)}{h_{elementti}} = 78000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Levy + ripa:

$$EA_2 := \frac{\left(E_{XLVL} \cdot \left(h_1 \cdot \frac{I}{2} \right) + E_{SLVL} \cdot A_2 \right)}{h_{elementti}} = 96768 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Mekaanisen liitoksen jäykkyys: (EN 1995-1-1)

Toisessa tapauksessa rivat liitetään LVL-levyyn mekaanisin liittimin.

$$\text{LVL keskimääräinen tiheys: } \rho_m := 510 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

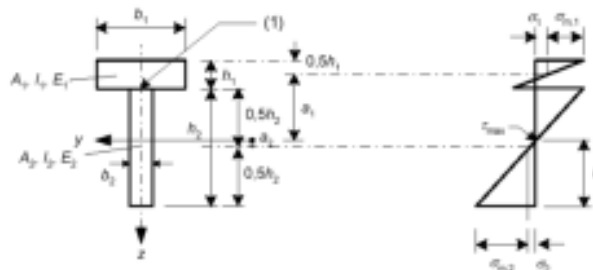
$$\text{Ruuvien halkaisija: } d := 5 \text{ mm}$$

$$\text{Liitin väli: } s := 150 \text{ mm}$$

$$\text{Esiporaamattoman liittimen siirtymäkerroin: } K_{ser} := \frac{\left(\frac{\rho_m}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}\right)^{1.5}}{23} \cdot \frac{d}{\text{mm}} \cdot \frac{N}{\text{mm}} = 2503.79 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Taivutusjäykkyys: (EN 1995-1-1, s. 50->)

Ripa 102x51 + LVL-levy 21mm ruuvikiinnitys, Joustava liitos



(EN 1995-1-1, s. 103, B.1.4)

$$h_1 := 21 \text{ mm}$$

$$b_1 := 366 \text{ mm}$$

$$A_1 := b_1 \cdot h_1$$

$$A_2 := b_2 \cdot h_{2,1}$$

Joustavaliitos, joten:

$$h_{2,1} := 102 \text{ mm}$$

$$b_2 := 51 \text{ mm}$$

$$I_1 := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$$

$$I_2 := \frac{b_2 \cdot h_{2,1}^3}{12}$$

$$\gamma_1 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 \cdot s}{K_{ser} \cdot h_{elementti}^2}} = 0.172$$

$$\gamma_2 := 1$$

-Neutraaliakselin etäisyys rivin painopisteakselista:

$$a_2 := \frac{\gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_{2,1})}{2 \cdot (\gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 + \gamma_2 \cdot E_{S,LVL} \cdot A_2)} = 9.97 \text{ mm}$$

-Levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta:

$$a_1 := \frac{1}{2} \cdot (h_1 + h_{2,1}) - a_2 = 51.53 \text{ mm}$$

-Rivan alapinnan ja neutraaliakselin välinen etäisyys:

$$h := a_2 + \frac{1}{2} \cdot h_{2,1} = 60.97 \text{ mm}$$

Tarkistus:

$$h_{2,1} + h_1 = 123 \text{ mm}$$

$$h + a_1 + \frac{h_1}{2} = 123 \text{ mm}$$

$$a_{1,21r} := a_1 = 51.53 \text{ mm}$$

$$a_{2,21r} := a_2 = 9.97 \text{ mm}$$

Taivutusjäykkyys: (Ruuvikiinnitys 21 mm)

(testirakenteen leveydelle)

$$EI_{ef,3x} := \frac{\left((EI_1 + \gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 \cdot a_1^2) + (EI_2 + \gamma_2 \cdot E_{S,LVL} \cdot A_2 \cdot a_2^2) \right)}{kk} \cdot I = 228.16 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Taivutusjäykkyys: (T-poikkileikkaus)

$$EI_{of.3x.2} := \left((EI_1 + \gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 \cdot a_1^2) + (EI_2 + \gamma_2 \cdot E_{S,LVL} \cdot A_2 \cdot a_2^2) \right) = 109.23 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Puristusjäykkyys:

Pelkkä levy:

$$EA_{3,levy} := \frac{E_{X,LVL} \cdot \left(h_1 \cdot \frac{I}{2} \right)}{h_{elementti}} = 42000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Levy + ripa:

$$EA_3 := \frac{\left(E_{X,LVL} \cdot \left(h_1 \cdot \frac{I}{2} \right) + E_{S,LVL} \cdot A_2 \right)}{h_{elementti}} = 64789.71 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Taivutusjäykkyys: (EN 1995-1-1)

Ripa 84x51 + LVL-levy 39mm ruuvikiinnitys, Joustava liitos

$$h_1 := 39 \text{ mm}$$

$$h_2 := 84 \text{ mm}$$

$$t := h_1 + h_2 = 123 \text{ mm}$$

$$b_1 := 366 \text{ mm}$$

$$b_2 := 51 \text{ mm}$$

$$A_f := I \cdot h_1 = 46800 \text{ mm}^2$$

$$A_1 := b_1 \cdot h_1$$

$$I_1 := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$$

$$EI_1 := I_1 \cdot E_{X,LVL}$$

$$A_2 := b_2 \cdot h_2$$

$$I_2 := \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12}$$

$$EI_2 := I_2 \cdot E_{S,LVL}$$

Joustavaliitos, joten:

$$\gamma_1 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 \cdot s}{K_{ser} \cdot h_{elementti}^2}} = 0.101 \quad \gamma_2 := 1$$

-Neutraaliakselin etäisyys rivan painopisteakselista:

$$a_2 := \frac{\gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2)}{2 \cdot (\gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 + \gamma_2 \cdot E_{S,LVL} \cdot A_2)} = 12.51 \text{ mm}$$

-Levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta:

$$a_1 := \frac{1}{2} \cdot (h_1 + h_2) - a_2 = 48.99 \text{ mm}$$

-Rivan alapinnan ja neutraaliakselin välinen etäisyys:

$$h := a_2 + \frac{1}{2} \cdot h_2 = 54.51 \text{ mm}$$

Tarkistus:

$$h_2 + h_1 = 123 \text{ mm}$$

$$h + a_1 + \frac{h_1}{2} = 123 \text{ mm}$$

$$a_{1,39r} := a_1 = 48.99 \text{ mm}$$

$$a_{2,39r} := a_2 = 12.51 \text{ mm}$$

Taivutusjäykkyys: (Ruuvikiinnitys 39 mm)

testirakenteen leveydelle levyn suunnassa.

$$EI_{of.4x} := \frac{\left((EI_1 + \gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 \cdot a_1^2) + (EI_2 + \gamma_2 \cdot E_{S,LVL} \cdot A_2 \cdot a_2^2) \right)}{kk} \cdot I = 207.27 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Taivutusjäykkyys: (T-poikkileikkaus)

$$EI_{of.4x.2} := \left(EI_1 + \gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot A_1 \cdot a_1^2 \right) + \left(EI_2 + \gamma_2 \cdot E_{S,LVL} \cdot A_2 \cdot a_2^2 \right) = 99.23 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Puristusjäykkyys:

Pelkkä levy:

$$EA_{4,levy} := \frac{E_{X,LVL} \cdot \left(h_1 \cdot \frac{I}{2} \right)}{h_{elementti}} = 78000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

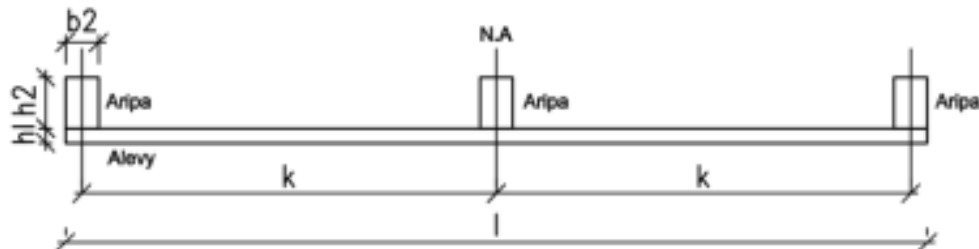
Levy + ripa:

$$EA_4 := \frac{\left(E_{X,LVL} \cdot \left(h_1 \cdot \frac{I}{2} \right) + E_{S,LVL} \cdot A_2 \right)}{h_{elementti}} = 96768 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Ratkaistaan taivutusjäykkyys x-suunnassa.

Tason suuntainen jäykkyys:

Ripa 102x51 + LVL-levy 21mm liimakiinnitys, Jäykkä liitos



Elementin leveys:	$l = 1200 \text{ mm}$
Elementin jänneväli (korkeus):	$h_{\text{elementti}} = 3150 \text{ mm}$
Levyn paksuus:	$h_1 = 21 \text{ mm}$
Rivan korkeus:	$h_{2,1} = 102 \text{ mm}$
Rivan paksuus:	$b_2 = 51 \text{ mm}$
Levy pinta-ala:	$A_l := l \cdot h_1 = 25200 \text{ mm}^2$
Rivan pinta-ala:	$A_r := b_2 \cdot h_{2,1} = 5202 \text{ mm}^2$

$$I_{\text{levy}} := \frac{h_1 \cdot l^3}{12} = (3.02 \cdot 10^9) \text{ mm}^4 \quad I_{\text{ripa}} := \frac{h_{2,1} \cdot b_2^3}{12} = (1.13 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

Taivutusjäykkyys: (Liimakiinnitys 21 mm)

$$EI_{\text{ripa,1y}} := E_{\text{LVL}} \cdot I_{\text{levy}} + 2 \cdot E_{\text{S,LVL}} \cdot (I_{\text{ripa}} + A_r \cdot k^2) = 79170.15 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

kokonaisjäykkyys
tasonsuunnassa:
(Liimakiinnitys 21 mm)

$$C_{\text{ripa,1y}} := \frac{1}{\frac{h_{\text{elementti}}^3}{3 \cdot EI_{\text{ripa,1y}}} + \frac{6 \cdot h_{\text{elementti}}}{5 \cdot G_{0,\text{LVL}} \cdot A_l}} = 2620.56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kapasiteetti siirtymän
suhteen:

$$F_{u,1y} := 16.51 \text{ kN}$$

Yläreunan siirtymä
tasonsuunnassa:

$$u := \frac{F_{u,1y}}{C_{\text{ripa,1y}}} = 6.3 \text{ mm}$$

Siirtymäraja:

$$u_{\text{raja}} := \frac{h_{\text{elementti}}}{500} = 6.3 \text{ mm} \quad \frac{u}{u_{\text{raja}}} = 100\%$$

Kapasiteetti leikkauksen
suhteen:

$$F_{q,1} := 75.6 \text{ kN}$$

Leikkausvuo:

$$\tau := 1.5 \cdot \frac{F_{q,1}}{h_1 \cdot l} = 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkauslujuus syrjällään:

$$f_{\text{vk}} := 4.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkauskapasiteetti tason
suuntaiselle kuormalle:

$$\frac{\tau}{f_{\text{vk}}} = 100\%$$

Tason suuntainen jäykkyys:

Ripa 84x51 + LVL-levy 39mm liimakiinnitys, Jäykkä liitos

Levyn paksuus:	$h_1 := 39 \text{ mm}$
Rivan korkeus:	$h_2 := 84 \text{ mm}$
Levy pinta-ala:	$A_f := l \cdot h_1 = 46800 \text{ mm}^2$
Rivan pinta-ala:	$A_r := b_2 \cdot h_2 = 4284 \text{ mm}^2$

$$I_{\text{levy}} := \frac{h_1 \cdot l^3}{12} = 5616000000 \text{ mm}^4 \quad I_{\text{ripa}} := \frac{h_2 \cdot b_2^3}{12} = 928557 \text{ mm}^4$$

Taivutusjäykkyys: (Liimakiinnitys 39 mm)

$$EI_{\text{ripa.2y}} := E_{\text{XLVL}} \cdot I_{\text{levy}} + 2 \cdot E_{\text{SLVL}} \cdot (I_{\text{ripa}} + A_r \cdot kk^2) = 98018.24 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

kokonaisjäykkyys
tasonsuunnassa:
(Liimakiinnitys 39 mm)

$$C_{\text{ripa.2y}} := \frac{1}{\frac{h_{\text{elementti}}^3}{3 \cdot EI_{\text{ripa.2y}}} + \frac{6 \cdot h_{\text{elementti}}}{5 \cdot G_{\text{0.LVL}} \cdot A_f}} = 4150.96 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kapasiteetti siirtymän
suhteen:

$$F_{u.2y} := 26.15 \text{ kN}$$

Yläreunan siirtymä
tasonsuunnassa:

$$u := \frac{F_{u.2y}}{C_{\text{ripa.2y}}} = 6.3 \text{ mm}$$

Siirtymäraja:

$$u_{\text{raja}} := \frac{h_{\text{elementti}}}{500} = 6.3 \text{ mm}$$

$$\frac{u}{u_{\text{raja}}} = 100\%$$

Kapasiteetti leikkauksen
suhteen:

$$F_{q.2} := 140.4 \text{ kN}$$

Leikkausvuo:

$$\tau := 1.5 \cdot \frac{F_{q.2}}{h_1 \cdot l} = 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkauslujuus syrjällään:

$$f_{\text{vk}} := 4.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkauskapasiteetti tason
suuntaiselle kuormalle:

$$\frac{\tau}{f_{\text{vk}}} = 100\%$$

Tason suuntainen jäykkyys: (RIL 205-1-2017, s. 159->)
Ripa 102x51 + LVL-levy 21mm ruuvikiinnitys, Joustava liitos

Nro	Kiinnitystapa	γ -kerroin	β -kerroin	Diagrammi	Formula	Formula
1		$\sqrt{\frac{9}{(2+\frac{h}{l})^2} + \frac{9}{(\frac{l}{h_{elementti}}+3)^2}}$	$\frac{6}{2(\frac{h}{l}) + (\frac{l}{h_{elementti}}) + 1 + 3(\frac{l}{h_{elementti}})}$		$\sqrt{\frac{4}{(\frac{l}{h_{elementti}})^2} + \frac{9}{(\frac{l}{h_{elementti}}+3)^2}}$	$\frac{2}{(\frac{l}{h_{elementti}})+4}$
2		$\sqrt{\frac{9}{(2+\frac{h}{l})^2} + \frac{9}{(\frac{l}{h_{elementti}}+3)^2}}$	$\frac{4}{2(\frac{h}{l}) + (\frac{l}{h_{elementti}}) + 1 + 3(\frac{l}{h_{elementti}})}$		$\sqrt{\frac{4}{(\frac{l}{h_{elementti}})^2} + \frac{9}{(\frac{l}{h_{elementti}}+3)^2}}$	$\frac{9}{\sqrt{(\frac{l}{h_{elementti}})^2} + 9}$
3		$\sqrt{\frac{9}{(2+\frac{h}{l})^2} + \frac{9}{(\frac{l}{h_{elementti}}+3)^2}}$	$\frac{6}{2(\frac{h}{l}) + (\frac{l}{h_{elementti}}) + 1 + 3(\frac{l}{h_{elementti}})}$		$\sqrt{\frac{36}{(2(\frac{l}{h_{elementti}})^2 + \frac{9}{(\frac{l}{h_{elementti}}+3)^2})} + \frac{9}{(\frac{l}{h_{elementti}}+3)^2}}$	$\frac{9}{\sqrt{(\frac{l}{h_{elementti}})^2} + 9}$
4		$\sqrt{\frac{36}{(2+\frac{h}{l})^2} + \frac{36}{(\frac{l}{h_{elementti}}+3)^2}}$	$\frac{12}{2(\frac{h}{l}) + (\frac{l}{h_{elementti}}) + 1 + 3(\frac{l}{h_{elementti}})}$		$\sqrt{\frac{36}{(2(\frac{l}{h_{elementti}})^2 + \frac{9}{(\frac{l}{h_{elementti}}+3)^2})} + \frac{9}{(\frac{l}{h_{elementti}}+3)^2}}$	$\frac{9}{\sqrt{(\frac{l}{h_{elementti}})^2} + 9}$

(RIL 205-1-2017, s. 161, Kuva 9.13S)

 Levyn paksuus: $h_l := 21 \text{ mm}$ $k_{mod} := 0.8$ $\gamma_M := 1.2$

 Naulan halkaisija: $d = 5 \text{ mm}$

 Naulan pituus: $t_p := 60 \text{ mm}$

 LVL tiheys: $\rho_{k,LVL} := 510 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

 Kimmokertoimen 5% ominaisarvo: (LVL-X) $E_{0.05,LVL} := 8800 \text{ MPa}$

ominaisarvo: (LVL-X)

$$k_p := \sqrt{\frac{\rho_{k,LVL}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \cdot \frac{1}{350}$$

$$R_{k,1} := 120 \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}}\right)^{1.7} \text{ N} = 1.85 \text{ kN}$$

$$k_t := \max\left(1 + 0.3 \cdot \frac{h_l - 8 \cdot d}{8 \cdot d}, 1 + 0.3 \cdot \frac{(t_p - h_l - 12 \cdot d)}{6 \cdot d}\right) = 0.86$$

$$R_{d,1} := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_t \cdot R_{k,1} \cdot k_p = 1.28 \text{ kN}$$

Yläpuolen kuvan mukaan käytössä on kiinnitystapa 2.

$$\gamma_1 := \sqrt{\frac{4}{\left(2 + \frac{h_{elementti}}{l}\right)^2} + \frac{9}{\left(\frac{l}{h_{elementti}} + 3\right)^2}} = 0.99$$

$$\beta_1 := \frac{4}{2 \cdot \left(\frac{h_{elementti}}{l}\right)^2 + \left(\frac{h_{elementti}}{l}\right)^3} + \frac{6}{1 + 3 \cdot \left(\frac{h_{elementti}}{l}\right)} = 0.8$$

$$F_{v,Rd,3y} := \frac{(R_{d,1} \cdot l)}{\gamma_1 \cdot s} = 10.35 \text{ kN}$$

 kokonaisjäykkyys
 tasonsuunnassa:
 (Ruuvikiinnitys 21 mm)

$$C_{ripa,3y} := \frac{1}{\beta_1 \cdot \frac{(s \cdot h_{elementti})^2}{K_{ser} \cdot \bar{I}} + \frac{h_{elementti}}{l \cdot G_{0,LVL} \cdot h_l}} = 2065.768 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

 Kapasiteetti siirtymän
 suhteen:

$$F_{u,3y} := 13.014 \text{ kN}$$

 Yläreunan siirtymä
 tasonsuunnassa:

$$u := \frac{F_{u,3y}}{C_{ripa,3y}} = 6.3 \text{ mm}$$

Siirtymäraja:

$$u_{raja} := \frac{h_{elementti}}{500} = 6.3 \text{ mm} \quad \frac{u}{u_{raja}} = 100\%$$

Kapasiteetti leikkauksen suhteen:

$$F_{q,3} := 75.6 \text{ kN}$$

Leikkausvuo:

$$\tau := 1.5 \cdot \frac{F_{q,3}}{h_j \cdot l} = 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkauslujuus syrjällään:

$$f_{vk} := 4.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkaukskapasiteetti tason suuntaiselle kuormalle:

$$\frac{\tau}{f_{vk}} = 100\%$$

Tason suuntainen jäykkyys: (RIL 205-1-2009, s. 151->)

Ripa 84x51 + LVL-levy 39mm ruuvikiinnitys, Joustava liitos

Levyn paksuus:

$$h_j := 39 \text{ mm}$$

$$k_t := \max\left(1 + 0.3 \cdot \frac{h_j - 8 \cdot d}{8 \cdot d}, 1 + 0.3 \cdot \frac{(t_p - h_j - 12 \cdot d)}{6 \cdot d}\right) = 0.99$$

$$R_{d,1} := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_t \cdot R_{k,1} \cdot k_p = 1.48 \text{ kN}$$

Yläpuolen kuvan mukaan käytössä on kiinnitystapa 2.

$$\gamma_1 := \sqrt{\frac{4}{\left(2 + \frac{h_{elementti}}{l}\right)^2} + \frac{9}{\left(\frac{l}{h_{elementti}} + 3\right)^2}} = 0.99$$

$$\beta_1 := \frac{4}{2 \cdot \left(\frac{h_{elementti}}{l}\right)^2 + \left(\frac{h_{elementti}}{l}\right)^3} + \frac{6}{1 + 3 \cdot \left(\frac{h_{elementti}}{l}\right)} = 0.8$$

$$F_{v,Rd,4y} := \frac{(R_{d,1} \cdot l)}{\gamma_1 \cdot s} = 11.98 \text{ kN}$$

kokonaisjäykkyys tasonsuunnassa:
(Ruuvikiinnitys 39 mm)

$$C_{ripa,4y} := \frac{1}{\beta_1 \cdot \frac{(s \cdot h_{elementti}^2)}{K_{ser} \cdot I^3} + \frac{h_{elementti}}{l \cdot G_{0,LVL} \cdot h_j}} = 2577.801 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kapasiteetti siirtymän suhteen:

$$F_{u,4y} := 16.24 \text{ kN}$$

Yläreunan siirtymä tasonsuunnassa:

$$u := \frac{F_{u,4y}}{C_{ripa,4y}} = 6.3 \text{ mm}$$

Siirtymäraja:

$$u_{raja} := \frac{h_{elementti}}{500} = 6.3 \text{ mm}$$

$$\frac{u}{u_{raja}} = 100\%$$

Kapasiteetti leikkauksen suhteen:

$$F_{q,4} := 140.4 \text{ kN}$$

Leikkausvuo:

$$\tau := 1.5 \cdot \frac{F_{q,4}}{h_j \cdot l} = 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkauslujuus syrjällään:

$$f_{vk} := 4.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkaukskapasiteetti tason suuntaiselle kuormalle:

$$\frac{\tau}{f_{vk}} = 100\%$$

Ratkaistaan leikkausvoimakestävyys rakenteelle

Yksinkertaistettu malli jossa rakenne ratkaistaan levynä. Rivat ovat mukana levyn jäykkyydessä ja levyn paksuutena on rakenteen tehokaspaksuus.

Leikkausvoimakestävyys: (RIL 205-2009, s. 156->)

Ripa 102x51 + LVL-levy **21mm liimakiinnitys**, Jäykkä liitos

Kriittinen leikkausjännitys: $f_{\text{verrit}} = 3.3 \cdot k \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_x}{EI_z} \cdot \frac{EI_z}{I} \cdot \left(\frac{t_{\text{ef}}}{a}\right)^2}$

Elementin leveys: $a := l = 1200 \text{ mm}$

Elementin korkeus: $c := h_{\text{elementti}} = 3150 \text{ mm}$

Liikumoduuli: $G_{0,LVL} = 600 \text{ MPa}$ $G_{0,05,LVL} := 400 \text{ MPa}$

Kimmokerroin: $E_{X,LVL} = 10.5 \text{ GPa}$

syynsuunnassa: $E_{90} := 2.4 \text{ GPa}$

Kimmokerroin syynsuuntaa vastaan: $EI_x := \frac{EI_{\text{ef},IX}}{I} = 363.62 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Taivutus y-suunnassa:

Levyn tehokas paksuus: $t_{\text{ef}} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot EI_x}{E_{X,LVL}}} = 74.62 \text{ mm}$

Levyn paksuus: $t := 21 \text{ mm}$

Taivutus z-suunnassa: $EI_z := E_{X,LVL} \cdot \frac{t^3}{12} = 8.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Levyn vääntöjäykkyys: $GI_v := \frac{1}{3} \cdot G_{0,LVL} \cdot t_{\text{ef}}^3 = 83.11 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Jäyhyysmomentti: $I := \frac{EI_x}{E_{X,LVL}} = 34630.89 \text{ mm}^3$

Lomahduskertoimet: $k_1 := \frac{c}{a} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_z}{EI_x}} = 1.01$

$k_2 := \frac{1}{2} \cdot \frac{GI_v}{\sqrt{EI_z \cdot EI_x}} = 0.77$

Lomahduskerroin: $k := 2$

(taulukko 9.14eS, s. 166)

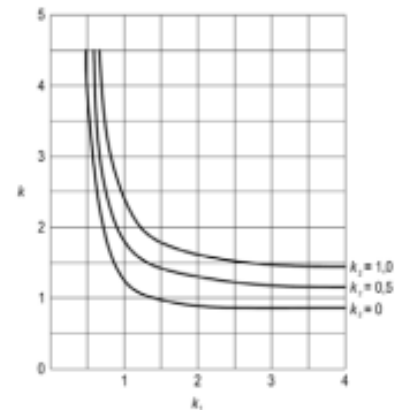
Kriittinen leikkausjännitys lomahduksen suhteen: $f_{\text{verrit},1} := 3.3 \cdot k \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_x}{EI_z} \cdot \frac{EI_z}{I} \cdot \left(\frac{t_{\text{ef}}}{a}\right)^2} = 15.46 \text{ MPa}$

Levyn leikkauslujuus: $f_{\text{vd},1} := 4.5 \text{ MPa}$

Leikkausjännitys: $\tau_d := \min(f_{\text{verrit},1}, f_{\text{vd},1}) = 4.5 \text{ MPa}$

Kriittinen leikkausvoima: $F_{\text{v,Ed},1} := \frac{\tau_d \cdot t_{\text{ef}} \cdot a}{1.5} = 268.65 \text{ kN}$

21mm liimakiinnitys: $\frac{F_{\text{v,Ed},1}}{l} = 223.87 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$



(RIL 205-1-2017, s.166, Kuva 9.14eS)

Leikkausvoimakestävyys: (RIL 205-2009, s. 156->)Ripa 84x51 + LVL-levy **39mm liimakiinnitys**, Jäykkä liitos

Kriittinen leikkausjännitys: $f_{v,cr1} = 3.3 \cdot k \cdot \sqrt{\frac{EI_x}{EI_z} \cdot \frac{EI_z}{I} \cdot \left(\frac{t_{ef}}{a}\right)^2}$

Taivutus y-suunnassa: $EI_x := \frac{EI_{ef,2x}}{I} = 372.69 \frac{kN \cdot m^2}{m}$

Levyn tehokas paksuus: $t_{ef} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot EI_x}{E_{X,LVL}}} = 75.24 \text{ mm}$

Levyn paksuus: $t := 39 \text{ mm}$

Taivutus z-suunnassa: $EI_z := E_{X,LVL} \cdot \frac{t^3}{12} = 51.9 \text{ kN} \cdot m$

Levyn vääntöjäykkyys: $GI_v := \frac{1}{3} \cdot G_{R,LVL} \cdot t_{ef}^3 = 85.19 \text{ kN} \cdot m$

Jäyhyysmomentti: $I := \frac{EI_x}{E_{X,LVL}} = 35494.45 \text{ mm}^3$

Lomahduskertoimet: $k_1 := \frac{c}{a} \cdot \sqrt{\frac{EI_z}{EI_x}} = 1.6$

$k_2 := \frac{1}{2} \cdot \frac{GI_v}{\sqrt{EI_z \cdot EI_x}} = 0.31$

$k := 1.25$

Lomahduskerroin:
(taulukko 9.14eS)

Kriittinen leikkausjännitys lommahduksen suhteen: $f_{v,cr1,2} := 3.3 \cdot k \cdot \sqrt{\frac{EI_x}{EI_z} \cdot \frac{EI_z}{I} \cdot \left(\frac{t_{ef}}{a}\right)^2} = 38.82 \text{ MPa}$

Levyn leikkauslujuus: $f_{v,d,1} := 4.5 \text{ MPa}$

Leikkausjännitys: $\tau_d := \min(f_{v,cr1,2}, f_{v,d,1}) = 4.5 \text{ MPa}$

Kriittinen leikkausvoima: $F_{v,Ed,2} := \frac{(\tau_d \cdot t_{ef} \cdot a)}{1.5} = 270.86 \text{ kN}$

39mm liimakiinnitys $\frac{F_{v,Ed,2}}{I} = 225.72 \frac{kN}{m}$

Leikkausvoimakestävyys: (RIL 205-2009, s. 156->)Ripa 102x51 + LVL-levy **21mm ruuvikiinnitys**, Joustava liitos

Kriittinen leikkausjännitys: $f_{v,cr1} = 3.3 \cdot k \cdot \sqrt{\frac{EI_x}{EI_z} \cdot \frac{EI_z}{I} \cdot \left(\frac{t_{ef}}{a}\right)^2}$

Taivutus y-suunnassa: $EI_x := \frac{EI_{ef,3x}}{I} = 190.13 \text{ kN} \cdot m$

Levyn tehokas paksuus: $t_{ef} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot EI_x}{E_{X,LVL}}} = 60.12 \text{ mm}$

Levyn paksuus: $t := 21 \text{ mm}$

Taivutus z-suunnassa: $EI_z := E_{X,LVL} \cdot \frac{t^3}{12} = 8.1 \text{ kN} \cdot m$

Levyn vääntöjäykkyys: $GI_v := \frac{1}{3} \cdot G_{R,LVL} \cdot t_{ef}^3 = 43.46 \text{ kN} \cdot m$

Jäyhyysmomentti: $I := \frac{EI_x}{E_{X,LVL}} = 18107.82 \text{ mm}^3$

Lomahduskertoimet:

$$k_1 := \frac{c}{a} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_z}{EI_x}} = 1.19$$

$$k_2 := \frac{1}{2} \cdot \frac{GI_v}{\sqrt{EI_z \cdot EI_x}} = 0.55$$

Lomahduskerroin:
(taulukko 9.14eS)

$$k := 1.5$$

Kriittinen leikkausjännitys lommahduksen suhteen:

$$f_{v,cr3} := 3.3 \cdot k \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_x}{EI_z} \cdot \frac{EI_z}{I} \cdot \left(\frac{t_{ef}}{a}\right)^2} = 12.24 \text{ MPa}$$

Levyn leikkauslujuus:

$$f_{v,d1} := 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys:

$$\tau_d := \min(f_{v,cr3}, f_{v,d1}) = 4.5 \text{ MPa}$$

Kriittinen leikkausvoima:
21mm ruuvi kiinnitys

$$F_{v,Ed3} := \frac{(\tau_d \cdot t_{ef} \cdot a)}{1.5} = 216.43 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed3}}{l} = 180.36 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoimakkestävyys: (RIL 205-2009, s. 156->)
Ripa 84x51 + LVL-levy 39mm ruuvi kiinnitys, Joustava liitos

Kriittinen leikkausjännitys:

$$f_{v,cr4} := 3.3 \cdot k \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_x}{EI_z} \cdot \frac{EI_z}{I} \cdot \left(\frac{t_{ef}}{a}\right)^2}$$

Taivutus y-suunnassa:

$$EI_x := \frac{EI_{ef,4x}}{I} = 172.73 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Levyn tehokas paksuus:

$$t_{ef} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot EI_x}{E_{X,LVL}}} = 58.23 \text{ mm}$$

Levyn paksuus:

$$t := 39 \text{ mm}$$

Taivutus z-suunnassa:

$$EI_z := E_{X,LVL} \cdot \frac{t^3}{12} = 51.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Levyn vääntöjäykkyys:

$$GI_v := \frac{1}{3} \cdot G_{0,LVL} \cdot t_{ef}^3 = 39.48 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Jäyhyysmomentti:

$$I := \frac{EI_x}{E_{X,LVL}} = 16450.13 \text{ mm}^3$$

Lomahduskertoimet:

$$k_1 := \frac{c}{a} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_z}{EI_x}} = 1.94$$

$$k_2 := \frac{1}{2} \cdot \frac{GI_v}{\sqrt{EI_z \cdot EI_x}} = 0.21$$

Lomahduskerroin:
(taulukko 9.14eS)

$$k := 1.2$$

Kriittinen leikkausjännitys lommahduksen suhteen:

$$f_{v,cr4} := 3.3 \cdot k \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_x}{EI_z} \cdot \frac{EI_z}{I} \cdot \left(\frac{t_{ef}}{a}\right)^2} = 39.73 \text{ MPa}$$

Levyn leikkauslujuus:

$$f_{v,d1} := 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys:

$$\tau_d := \min(f_{v,cr4}, f_{v,d1}) = 4.5 \text{ MPa}$$

Kriittinen leikkausvoima:
39mm ruuvi kiinnitys

$$F_{v,Ed4} := \frac{(\tau_d \cdot t_{ef} \cdot a)}{1.5} = 209.61 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed4}}{l} = 174.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ratkaistaan nurjahduskestävyys rakenteille

(RIL 205-1-2017 s. 79->)

Mitointi vahvemmassa suunnassa. Heikomman suunnan nurjahdus estetty levytyksellä.

T-poikkileikkaus, LVL 21mm, liimakiinnitys

Tehollinen leveys:	$b_{ef} = 366 \text{ mm}$	
Levyn paksuus:	$h_f = 21 \text{ mm}$	
Rivan korkeus:	$h_w = 102 \text{ mm}$	
Rivan leveys:	$b_w = b_2 = 51 \text{ mm}$	
Rakenteen korkeus:	$L := h_{elementti} - 200 \text{ mm} = 2950 \text{ mm}$	Kattorungon puolivälistä välipohjapalkin keskiakselille.
Kimmokertoimen 5% ominaisarvo: (LVL-X)	$E_{0,05} = 8800 \text{ MPa}$	
Tehollinen korkeus (kaavan johtaminen):	$I_{pf} = \frac{EI_x}{E_f} = \frac{b \cdot h_{ef}^3}{12}$	
Tehollinen korkeus:	$h_{ef} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot EI_{ef,1x,2}}{b_{ef} \cdot E_{x,LVL}}} = 86.73 \text{ mm}$	$EI_{ef,1x,2} = 208.9 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$
Osavarmuusluku: (LVL)	$\gamma_{M,LVL} = 1.2$	
Alkukäyryyskerroin: (LVL)	$\beta_{c,LVL} = 0.1$	
Nurjahduspituus:	$L_{cz} = 1 \cdot L = 2950 \text{ mm}$	
Puristuslujuus: (LVL-X)	$f_{c,0,k} = 26 \text{ MPa}$	$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_{M,LVL}} = 17.33 \text{ MPa}$
Taivutuslujuus: (LVL-X)	$f_{m,k} = 32 \text{ MPa}$	$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,LVL}} = 21.33 \text{ MPa}$
Pinta-aloja:	$A_{levy} = h_f \cdot b_{ef} = 7686 \text{ mm}^2$	$A_{ripa} = h_w \cdot b_w = 5202 \text{ mm}^2$
Levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta:	$a_{1,21} = 28.95 \text{ mm}$	
Neutraaliakselin etäisyys rivan painopisteakselista:	$a_{2,21} = 32.55 \text{ mm}$	

Tehollinen poikkileikkaus:

Mitointikuorma pilarille:	$N_{d,211,teb} = 91.56 \text{ kN}$	$N_{211,teb} = \frac{N_{d,211,teb}}{kk} = 159.37 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Epäkeskisyys:	$e = a_{1,21} = 28.95 \text{ mm}$	
Mitoittava momentti:	$M_{y,d} = N_{d,211,teb} \cdot e = 2.65 \text{ kN} \cdot \text{m}$	
Poikkileikkauksen pinta-ala: (Tehollinen)	$A_{ef} = b_{ef} \cdot h_{ef} = 31741.86 \text{ mm}^2$	
Jäyhyysmomentti:	$I_y = \frac{EI_{ef,1x,2}}{E_{x,LVL}} = (1.99 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$	
Jäyhyyssäde:	$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_{ef}}} = 25.04 \text{ mm}$	
Hoikkuusluku:	$\lambda_y = \frac{L_{cz}}{i_y} = 117.83$	
Muunnettu hoikkuus:	$\lambda_{y,rel} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 2.04$	
	$k_y = 0.5 \cdot (1 + \beta_{c,LVL} \cdot (\lambda_{y,rel} - 0.3) + \lambda_{y,rel}^2) = 2.67$	
	$k_{c,y,21,1} = \min\left(\frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{y,rel}^2}}, 1\right) = 0.23$	

Puristusjännitys: $\sigma_{c,0,d} := \frac{N_{d,211,teh}}{A_{ef}} = 2.88 \text{ MPa}$

Taivutusjännitys: $\sigma_{m,y,d} := \frac{6 \cdot M_{y,d}}{b_{ef} \cdot h_{ef}^2} = 5.78 \text{ MPa}$

Käyttöaste:
LVL 21mm, liimakiinnitys $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y,21,l} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 100\%$

Tehollisen poikkileikkaus, nurjahduslaskennan todistus FEM-Designilla.

Buckling - 6.3.2

Panel: 'TP.2.1', LC: 'puristus', $k_{mod} = 0.80$, Coordinates [m]: { 4.11; 2.41; 3.15}

$\beta_c = 0.1$ (6.29)

$\lambda = \frac{l_0}{\sqrt{I^2 / 12}} = \frac{3150}{\sqrt{87^2 / 12}} = 119.15$

$E_{\alpha,0.05} = r \cdot E_{0,mean} \cdot \cos^4(\alpha) + r \cdot E_{90,mean} \cdot \sin^4(\alpha) + r \cdot G_{mean} \cdot 4 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \sin^2(\alpha) =$
 $= 0.84 \cdot 10500.00 \cdot \cos^4(0.00) + 0.84 \cdot 2400.00 \cdot \sin^4(0.00) + 0.84 \cdot 400.00 \cdot 4 \cdot \cos^2(0.00) \cdot \sin^2(0.00) =$
 $= 8820.0 \text{ N/mm}^2$

$f_{c,0,k} = \frac{f_{c,0,k}}{\frac{f_{c,0,k}}{f_{c,0,k}} \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)} = \frac{26.00}{\frac{26.00}{9.00} \cdot \sin^2(0.00) + \cos^2(0.00)} = 26.0 \text{ N/mm}^2$ (6.16)

$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{\alpha,0.05}}} = \frac{119.15}{\pi} \sqrt{\frac{26.0}{8820.0}} = 2.059$ (6.21)

$k = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2) = 0.5 \cdot (1 + 0.1 \cdot (2.059 - 0.3) + 2.059^2) = 2.708$ (6.27)

$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{2.708 + \sqrt{2.708^2 - 2.059^2}} = 0.224$ (6.25)

$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,0,d}} = \frac{2.88}{0.224 \cdot 17.33} + \frac{5.75}{21.33} = 1.01 > 1.00$ (6.23) - Not OK

Todellinen poikkileikkaus:

Mitotuskuorma pilarille:

$N_{d,211,tod} := 78.33 \text{ kN}$

$N_{211,tod} := \frac{N_{d,211,tod}}{kk} = 136.34 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Epäkeskisyys:

$e := a_{L,211} = 28.95 \text{ mm}$

Mitoitettava momentti:

$M_{y,d} := N_{d,211,tod} \cdot e = 2.27 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Poikkileikkauksen pinta-ala:
(Todellinen)

$A_{tod} := b_{ef} \cdot h_f + h_w \cdot b_w = 12888 \text{ mm}^2$ $\gamma_1 := 1$ $\gamma_2 := 1$

Jäyhyyshmomentti:

$I_y := \frac{EI_{ef,1x2}}{E_{S,LVL} \cdot A_{ripa} + E_{X,LVL} \cdot A_{levy}} = (1.77 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$

Jäyhyyssäde:

$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_{tod}}} = 37.01 \text{ mm}$

Hoikkuusluku:

$\lambda_y := \frac{L_{cz}}{i_y} = 79.7$

Muunnettu hoikkuus:

$\lambda_{y,rel} := \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0.05}}} = 1.38$

$k_y := 0.5 \cdot (1 + \beta_{c,LVL} \cdot (\lambda_{y,rel} - 0.3) + \lambda_{y,rel}^2) = 1.5$

$k_{c,y,21,l} := \min\left(\frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{y,rel}^2}}, 1\right) = 0.47$

Puristusjännitys: $\sigma_c := \frac{N_{d,211,tod}}{kk \cdot h_f} = 6.49 \text{ MPa}$

Levyn jännitys:
(Sisäpinta) $\sigma_m := \frac{E_{XLVL}}{EI_{ef,1x,2}} \cdot (\gamma_1 \cdot a_{1,211} - 0.5 \cdot h_f) \cdot M_{y,d} = 2.1 \text{ MPa}$

Levyn jännitys:
(Ulkopinta) $\sigma_m := \frac{E_{XLVL}}{EI_{ef,1x,2}} \cdot (\gamma_1 \cdot a_{1,211} + 0.5 \cdot h_f) \cdot M_{y,d} = 4.5 \text{ MPa}$

Käyttöaste:
LVL 21mm, liimakiinnitys $\frac{\sigma_c}{k_{c,y,211} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_m}{f_{m,d}} = 100\%$

Taivutuslujuus: (LVL-S) $f_{m,k,S} := 44 \text{ MPa}$ $f_{m,d,S} := k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,LVL}} = 21.33 \text{ MPa}$

Rivan jännitys:
(Sisäpinta) $\sigma_m := \frac{E_{S,LVL}}{EI_{ef,1x,2}} \cdot (-\gamma_2 \cdot a_{2,211} + 0.5 \cdot h_w) \cdot M_{y,d} = 2.76 \text{ MPa}$

Rivan jännitys:
(Ulkopinta) $\sigma_m := \frac{E_{S,LVL}}{EI_{ef,1x,2}} \cdot (-\gamma_2 \cdot a_{2,211} - 0.5 \cdot h_w) \cdot M_{y,d} = -12.52 \text{ MPa}$

Rivan käyttöaste: $\left| \frac{\sigma_m}{f_{m,d,S}} \right| = 58.7\%$

T-poikkileikkaus, LVL 21mm, ruuvikiinnitys

Tehollinen korkeus: $h_{ef} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot EI_{ef,3x}}{b_{ef} \cdot E_{XLVL}}} = 89.31 \text{ mm}$ $EI_{ef,3x,2} = 109.23 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$

Levyn painopisteen
etäisyys neutraaliakselilta: $a_{1,21r} = 51.53 \text{ mm}$

Neutraaliakselin etäisyys
rivan painopisteakselista: $a_{2,21r} = 9.97 \text{ mm}$

Tehollinen poikkileikkaus:

Mitoituskuorma pilarille: $N_{d,21r,tob} := 50.19 \text{ kN}$ $N_{21r,tob} := \frac{N_{d,21r,tob}}{kk} = 87.36 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Epäkeskisyyden etäisyys: $e := a_{1,21r} = 51.53 \text{ mm}$

Mitoitava momentti: $M_{y,d} := N_{d,21r,tob} \cdot e = 2.59 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Poikkileikkauksen pinta-ala:
(Tehollinen) $A_{ef} := b_{ef} \cdot h_{ef} = 32688.65 \text{ mm}^2$

Jäyhyysmomentti: $I_y := \frac{EI_{ef,3x,2}}{E_{XLVL}} = (1.04 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$

Jäyhyyssäde: $i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_{ef}}} = 17.84 \text{ mm}$

Hoikkuusluku: $\lambda_y := \frac{L_{c,z}}{i_y} = 165.36$

Muunnettu hoikkuus: $\lambda_{y,rel} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 2.86$

$k_y := 0.5 \cdot (1 + \beta_{c,LVL} \cdot (\lambda_{y,rel} - 0.3) + \lambda_{y,rel}^2) = 4.72$

$k_{c,y,21r} := \min\left(\frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{y,rel}^2}}, 1\right) = 0.12$

Puristusjännitys: $\sigma_{c,0,d} := \frac{N_{d,21r,tob}}{A_{ef}} = 1.54 \text{ MPa}$

Taivutusjännitys: $\sigma_{m,y,d} := \frac{6 \cdot M_{y,d}}{b_{ef} \cdot h_{ef}^2} = 5.31 \text{ MPa}$

Käyttöaste:
LVL 21mm, ruuvikiinnitys

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y,21,r} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 100\% < 100\%$$

Todellinen poikkileikkaus:

Mitoituskuorma pilarille: $N_{d,21r,tod} := 43.666 \text{ kN}$ $N_{21r,tod} := \frac{N_{d,21r,tod}}{kk} = 76.01 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Epäkeskisyys: $e := a_{1,21r} = 51.53 \text{ mm}$

Mitoittava momentti: $M_{y,d} := N_{d,21r,tod} \cdot e = 2.25 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Poikkileikkauksen pinta-ala: $A_{tod} := b_{ef} \cdot h_f + h_w \cdot b_w = 12888 \text{ mm}^2$ $\gamma_1 := 0.17 \quad \gamma_2 := 1$

(Todellinen)

Jäyhyysmomentti: $I_y := \frac{EI_{ef,3x,2}}{E_{S,LVL} \cdot A_{riipa} + E_{X,LVL} \cdot A_{levy}} = (9.23 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$

Jäyhyyssäde: $i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_{tod}}} = 26.76 \text{ mm}$

Hoikkuusluku: $\lambda_y := \frac{L_{c,x}}{i_y} = 110.22$

Muunnettu hoikkuus: $\lambda_{y,rel} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0.05}}} = 1.91$

$$k_y := 0.5 \cdot (1 + \beta_{c,LVL} \cdot (\lambda_{y,rel} - 0.3) + \lambda_{y,rel}^2) = 2.4$$

$$k_{c,y,21,r} := \min\left(\frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{y,rel}^2}}, 1\right) = 0.26$$

Puristusjännitys: $\sigma_c := \frac{N_{d,21r,tod}}{kk \cdot h_f} = 3.62 \text{ MPa}$

Levyn jännitys: (Sisäpinta) $\sigma_m := \frac{E_{X,LVL}}{EI_{ef,3x,2}} \cdot (\gamma_1 \cdot a_{1,21r} - 0.5 \cdot h_f) \cdot M_{y,d} = -0.38 \text{ MPa}$

Levyn jännitys: (Ulkopinta) $\sigma_m := \frac{E_{X,LVL}}{EI_{ef,3x,2}} \cdot (\gamma_1 \cdot a_{1,21r} + 0.5 \cdot h_f) \cdot M_{y,d} = 4.17 \text{ MPa}$

Käyttöaste:
LVL 21mm, liimakiinnitys

$$\frac{\sigma_c}{k_{c,y,21,r} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_m}{f_{m,d}} = 100\%$$

Rivan jännitys: (Sisäpinta) $\sigma_m := \frac{E_{S,LVL}}{EI_{ef,3x,2}} \cdot (-\gamma_2 \cdot a_{2,21r} + 0.5 \cdot h_w) \cdot M_{y,d} = 11.66 \text{ MPa}$

Rivan jännitys: (Ulkopinta) $\sigma_m := \frac{E_{S,LVL}}{EI_{ef,3x,2}} \cdot (-\gamma_2 \cdot a_{2,21r} - 0.5 \cdot h_w) \cdot M_{y,d} = -17.33 \text{ MPa}$

Rivan käyttöaste: $\left| \frac{\sigma_m}{f_{m,d,S}} \right| = 81.2\%$

T-poikkileikkaus, LVL 39mm, liimakiinnitys

Levyn paksuus: $h_f := 39 \text{ mm}$

Rangan korkeus: $h_w := 84 \text{ mm}$

Tehollinen korkeus: $h_{ef} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot EI_{ef,2x,2}}{b_{ef} \cdot E_{X,LVL}}} = 87.44 \text{ mm}$ $EI_{ef,2x,2} = 214.11 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$

Pinta-aloja: $A_{levy} := h_f \cdot b_{ef} = 14274 \text{ mm}^2$ $A_{riipa} := h_w \cdot b_w = 4284 \text{ mm}^2$

Levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta: $a_{1,39l} = 17.4 \text{ mm}$

Neutraaliakselin etäisyys
rivän painopisteakselista:

$$a_{2,39l} = 44.1 \text{ mm}$$

Tehollinen poikkileikkaus:

Mitoituskuorma pilarille:

$$N_{d,39l,teb} := 105.01 \text{ kN}$$

$$N_{39l,teb} := \frac{N_{d,39l,teb}}{kk} = 182.79 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Epäkeskisyyt:

$$e := a_{1,39l} = 17.4 \text{ mm}$$

Mitoitava momentti:

$$M_{y,d} := N_{d,39l,teb} \cdot e = 1.83 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Poikkileikkauksen pinta-ala:
(Tehollinen)

$$A_{ef} := b_{ef} \cdot h_{ef} = 32003.53 \text{ mm}^2$$

Jäyhyysmomentti:

$$I_y := \frac{EI_{ef,2 \times 2}}{E_{eff}} = (2.04 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

Jäyhyyssäde:

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_{ef}}} = 25.24 \text{ mm}$$

Hoikkuusluku:

$$\lambda_y := \frac{L_{cz}}{i_y} = 116.87$$

Muunnettu hoikkuus:

$$\lambda_{y,rel} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 2.02$$

$$k_y := 0.5 \cdot (1 + \beta_{c,LVL} \cdot (\lambda_{y,rel} - 0.3) + \lambda_{y,rel}^2) = 2.63$$

$$k_{c,y,39l} := \min\left(\frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{y,rel}^2}}, 1\right) = 0.23$$

Puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} := \frac{N_{d,39l,teb}}{A_{ef}} = 3.28 \text{ MPa}$$

Taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,y,d} := \frac{6 \cdot M_{y,d}}{b_{ef} \cdot h_{ef}^2} = 3.92 \text{ MPa}$$

Käyttöaste:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y,39l} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 100\%$$

LVL 39mm, liimakiinnitys

Tehollisen poikkileikkaus nurjahduslaskennan todistus FEM-Designilla.

Buckling - 6.3.2

Panel: 'TP.1.1', LC: 'puristus', $k_{mod} = 0.80$, Coordinates [m]: { 6.33; 2.40; 3.15}

$$\beta_c = 0.1 \quad (6.29)$$

$$\lambda = \frac{l_0}{\sqrt{r^2 / 12}} = \frac{3150}{\sqrt{87^2 / 12}} = 119.15$$

$$\begin{aligned} E_{\alpha,0.05} &= r \cdot E_{0,mean} \cdot \cos^4(\alpha) + r \cdot E_{90,mean} \cdot \sin^4(\alpha) + r \cdot G_{mean} \cdot 4 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \sin^2(\alpha) = \\ &= 0.84 \cdot 10500.00 \cdot \cos^4(0.00) + 0.84 \cdot 2400.00 \cdot \sin^4(0.00) + 0.84 \cdot 400.00 \cdot 4 \cdot \cos^2(0.00) \cdot \sin^2(0.00) = \\ &= 8820.0 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$f_{c,0,k} = \frac{f_{c,0,k}}{f_{90,k}} = \frac{26.00}{9.00} = 26.0 \text{ N/mm}^2 \quad (6.16)$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{\alpha,0.05}}} = \frac{119.15}{\pi} \sqrt{\frac{26.0}{8820.0}} = 2.059 \quad (6.21)$$

$$k = 0.5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2) = 0.5 (1 + 0.1 (2.059 - 0.3) + 2.059^2) = 2.708 \quad (6.27)$$

$$k_0 = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{2.708 + \sqrt{2.708^2 - 2.059^2}} = 0.224 \quad (6.25)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_0 \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,0,d}} = \frac{3.30}{0.224 \cdot 17.33} + \frac{3.87}{21.33} = 1.03 > 1.00 \quad (6.23) - \text{Not OK}$$

Todellinen poikkileikkaus:

Mitoituskuorma pilarille:	$N_{d,39l,tod} := 116.99 \text{ kN}$	$N_{39l,tod} := \frac{N_{d,39l,tod}}{kk} = 203.64 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Epäkeskisyyt:	$e := a_{1,39l} = 17.4 \text{ mm}$	
Mitoitava momentti:	$M_{y,d} := N_{d,39l,tod} \cdot e = 2.04 \text{ kN} \cdot \text{m}$	
Poikkileikkauksen pinta-ala: (Todellinen)	$A_{tod} := b_{ef} \cdot h_f + h_w \cdot b_w = 18558 \text{ mm}^2$	$\gamma_1 := 1 \quad \gamma_2 = 1$
Jäyhyysmomentti:	$I_y := \frac{EI_{ef,2 \times 2}}{E_{S,LVL} \cdot A_{riipa} + E_{\chi,LVL} \cdot A_{levy}} = (1.9 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$	
Jäyhyys säde:	$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_{tod}}} = 32.01 \text{ mm}$	
Hoikkuusluku:	$\lambda_y := \frac{L_{cz}}{i_y} = 92.17$	
Muunnettu hoikkuus:	$\lambda_{y,rel} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 1.59$	
	$k_y := 0.5 \cdot (1 + \beta_{c,LVL} \cdot (\lambda_{y,rel} - 0.3) + \lambda_{y,rel}^2) = 1.84$	
	$k_{c,y,39l} := \min\left(\frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{y,rel}^2}}, 1\right) = 0.36$	
Puristusjäännitys:	$\sigma_c := \frac{N_{d,39l,tod}}{kk \cdot h_f} = 5.22 \text{ MPa}$	
Levyn jäännitys: (Sisäpinta)	$\sigma_m := \frac{E_{\chi,LVL}}{EI_{ef,2 \times 2}} \cdot (\gamma_1 \cdot a_{1,39l} - 0.5 \cdot h_f) \cdot M_{y,d} = -0.21 \text{ MPa}$	
Levyn jäännitys: (Ulkopinta)	$\sigma_m := \frac{E_{\chi,LVL}}{EI_{ef,2 \times 2}} \cdot (\gamma_1 \cdot a_{1,39l} + 0.5 \cdot h_f) \cdot M_{y,d} = 3.68 \text{ MPa}$	
Käyttöaste: LVL 21mm, liimakiinnitys	$\frac{\sigma_c}{k_{c,y,39l} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_m}{f_{m,d}} = 100\%$	
Rivan jäännitys: (Sisäpinta)	$\sigma_m := \frac{E_{S,LVL}}{EI_{ef,2 \times 2}} \cdot (-\gamma_2 \cdot a_{2,39l} + 0.5 \cdot h_w) \cdot M_{y,d} = -0.28 \text{ MPa}$	
Rivan jäännitys: (Ulkopinta)	$\sigma_m := \frac{E_{S,LVL}}{EI_{ef,2 \times 2}} \cdot (-\gamma_2 \cdot a_{2,39l} - 0.5 \cdot h_w) \cdot M_{y,d} = -11.29 \text{ MPa}$	
Rivan käyttöaste:	$\left \frac{\sigma_m}{f_{m,dS}} \right = 52.9\%$	

T-poikkileikkaus, LVL 39mm, ruuvikiinnitys

Tehollinen korkeus: $h_{ef} := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot EI_{ef,4x,2}}{b_{ef} \cdot E_{S,LVL}}} = 61.78 \text{ mm}$ $EI_{ef,4x,2} = 99.23 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$

Levyn painopisteen $a_{1,39r} = 48.99 \text{ mm}$

etäisyys neutraaliakselilta:

Neutraaliakselin etäisyys $a_{2,39r} = 12.51 \text{ mm}$

rivan painopisteakselista:

Tehollinen poikkileikkaus:

Mitoituskuorma pilarille: $N_{d,39r,tob} := 37.836 \text{ kN}$

$$N_{39r,tob} := \frac{N_{d,39r,tob}}{kk} = 65.86 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Epäkeskisyys: $e := a_{1,39r} = 48.99 \text{ mm}$

Mitoittava momentti: $M_{y,d} := N_{d,39r,tob} \cdot e = 1.85 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Poikkileikkauksen pinta-ala: $A_{ef} := b_{ef} \cdot h_{ef} = 22610.2 \text{ mm}^2$

(Tehollinen)

Jäyhyysmomentti: $I_y := \frac{EI_{ef,4x,2}}{E_{S,LVL}} = (9.45 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$

Jäyhyyssäde: $i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_{ef}}} = 20.44 \text{ mm}$

Hoikkuusluku: $\lambda_y := \frac{L_{cz}}{i_y} = 144.29$

Muunnettu hoikkuus: $\lambda_{y,rel} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 2.5$

$$k_y := 0.5 \cdot (1 + \beta_{c,LVL} \cdot (\lambda_{y,rel} - 0.3) + \lambda_{y,rel}^2) = 3.73$$

$$k_{c,y,39r} := \min\left(\frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{y,rel}^2}}, 1\right) = 0.15$$

Puristusjäännitys: $\sigma_{c,0,d} := \frac{N_{d,39r,tob}}{A_{ef}} = 1.67 \text{ MPa}$

Taivutusjäännitys: $\sigma_{m,y,d} := \frac{6 \cdot M_{y,d}}{b_{ef} \cdot h_{ef}^2} = 7.96 \text{ MPa}$

Käyttöaste: $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y,39r} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 100\%$

LVL 39mm, ruuvikiinnitys

Todellinen poikkileikkaus:

Mitoituskuorma pilarille: $N_{d,39r,tod} := 48.296 \text{ kN}$

$$N_{39r,tod} := \frac{N_{d,39r,tod}}{kk} = 84.07 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Epäkeskisyys: $e := a_{1,39r} = 48.99 \text{ mm}$

Mitoittava momentti: $M_{y,d} := N_{d,39r,tod} \cdot e = 2.37 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Poikkileikkauksen pinta-ala: $A_{tod} := b_{ef} \cdot h_f + h_w \cdot b_w = 18558 \text{ mm}^2$ $\gamma_f := 0.101$ $\gamma_2 = 1$

(Todellinen)

Jäyhyysmomentti: $I_y := \frac{EI_{ef,4x,2}}{E_{S,LVL} \cdot A_{ripa} + E_{X,LVL} \cdot A_{levy}} = (8.81 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$

Jäyhyyssäde: $i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_{tod}}} = 21.79 \text{ mm}$

Hoikkuusluku: $\lambda_y := \frac{L_{cz}}{i_y} = 135.38$

Muunnettu hoikkuus: $\lambda_{y,rel} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 2.34$

$$k_y := 0.5 \cdot (1 + \beta_{c,LVL} \cdot (\lambda_{y,rel} - 0.3) + \lambda_{y,rel}^2) = 3.35$$

$$k_{c,y,39,r} := \min\left(\frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{y,rel}^2}}, 1\right) = 0.17$$

Puristusjännitys:

$$\sigma_c := \frac{N_{d,39,tot}}{kk \cdot h_f} = 2.16 \text{ MPa}$$

Levyn jännitys:
(Sisäpinta)

$$\sigma_m := \frac{E_{XLVL}}{EI_{ef,4x,2}} \cdot (\gamma_1 \cdot a_{1,39r} - 0.5 \cdot h) \cdot M_{y,d} = -3.64 \text{ MPa}$$

Levyn jännitys:
(Ulkopinta)

$$\sigma_m := \frac{E_{XLVL}}{EI_{ef,4x,2}} \cdot (\gamma_1 \cdot a_{1,39r} + 0.5 \cdot h) \cdot M_{y,d} = 6.12 \text{ MPa}$$

Käyttöaste:
LVL 21mm, liimakiinnitys

$$\frac{\sigma_c}{k_{c,y,39,r} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_m}{f_{m,d}} = 100\%$$

Rivan jännitys:
(Sisäpinta)

$$\sigma_m := \frac{E_{SLVL}}{EI_{ef,4x,2}} \cdot (-\gamma_2 \cdot a_{2,39r} + 0.5 \cdot h_w) \cdot M_{y,d} = 9.71 \text{ MPa}$$

Rivan jännitys:
(Ulkopinta)

$$\sigma_m := \frac{E_{SLVL}}{EI_{ef,4x,2}} \cdot (-\gamma_2 \cdot a_{2,39r} - 0.5 \cdot h_w) \cdot M_{y,d} = -17.94 \text{ MPa}$$

Rivan käyttöaste:

$$\left| \frac{\sigma_m}{f_{m,d,S}} \right| = 84.1\%$$

Leikkausvoimaresultantti liitospinnassa:

Ripojen suuntainen leikkausvoimaresultantti ripojen ja levyn välillä. Määritetään rakenteen T-poikkileikkausta hyväksikäyttäen.

Ripa 102x51 + LVL-levy 21mm liimakiinnitys, Jäykkä liitos:

Keskipitkä aikaluokka:	$k_{mod} := 0.8$		
Osavarmuusluku: (LVL)	$\gamma_M := 1.2$		
Levyn tehollinen leveys:	$b_{ef} = 366 \text{ mm}$	Rangan paksuus:	$b_w := 51 \text{ mm}$
Levyn paksuus:	$h_f = 21 \text{ mm}$	Rangan korkeus:	$h_w := 102 \text{ mm}$
Levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta:	$a_1 = 28.95 \text{ mm}$	Liitoskerroin:	$\gamma_1 := 1$
Levyn pinta-ala:	$A_{levy} := h_f \cdot b_{ef} = 7686 \text{ mm}^2$		
Taivutusjäykkyys:	$EI_{ef,1x,2} = 208.9 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$		
Kuorma seinälle:	$F_{21,1} = 202.97 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$		
Epäkeskisyyys:	$e := a_{1,21} = 28.95 \text{ mm}$		
Momentti:	$M := F_{21,1} \cdot e = 5.88 \text{ kN}$		
Ekvivalentti vaakakuorma:	$q_d := \frac{8 \cdot M}{h_{elementti}^2} = 4.74 \text{ kPa}$		
Leikkausvoiman mitoitusarvo:	$V_d := \frac{1}{2} \cdot q_d \cdot kk \cdot h_{elementti} = 4.29 \text{ kN}$		
Leikkausvoima tuella:	$V_{d,tuki} := V_d \cdot \left(1 - \frac{h_f + h_w}{0.5 \cdot h_{elementti}}\right) = 3.95 \text{ kN}$		
Leikkausjännitys liitospinnassa	$\tau_d := \frac{\gamma_1 \cdot E_{X,LVL} \cdot a_1 \cdot A_{levy}}{b_w \cdot EI_{ef,1x,2}} \cdot V_{d,tuki} = 0.87 \text{ MPa}$		
Leikkauslujuus lappeellaan syidensuuntaan:	$f_{v,0,k,N} = 1.3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$f_{v,0,k,S} = 2.3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
Mitoitusarvo:	$f_{v,0,d} := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot \min(f_{v,0,k,N}, f_{v,0,k,S}) = 0.87 \text{ MPa}$		
Käyttöaste:	$\frac{\tau_d}{f_{v,0,d}} = 100\%$		

Ripa 84x51 + LVL-levy 39mm liimakiinnitys, Jäykkä liitos:

Levyn paksuus:	$h_f = 39 \text{ mm}$		
Rangan paksuus:	$b_w = 51 \text{ mm}$	Rangan korkeus:	$h_w = 84 \text{ mm}$
Levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta:	$a_1 = 17.4 \text{ mm}$	Liitoskerroin:	$\gamma_1 = 1$
Pinta-aloja:	$A_{levy} := h_f \cdot b_{ef} = 14274 \text{ mm}^2$		
Taivutusjäykkyys:	$EI_{ef,2x,2} = 214.11 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$		
Kuorma seinälle:	$F_{39,1} = 310.17 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$		
Epäkeskisyyys:	$e := a_{1,39} = 17.4 \text{ mm}$		
Momentti:	$M := F_{39,1} \cdot e = 5.4 \text{ kN}$		
Ekvivalentti vaakakuorma:	$q_d := \frac{8 \cdot M}{h_{elementti}^2} = 4.35 \text{ kPa}$		

Leikkausvoiman mitoitusarvo:	$V_d := \frac{1}{2} \cdot q_d \cdot kk \cdot h_{elementti} = 3.94 \text{ kN}$
Leikkausvoima tuella:	$V_{d,tuki} := V_d \cdot \left(1 - \frac{h_f + h_w}{0.5 \cdot h_{elementti}}\right) = 3.63 \text{ kN}$
Leikkausjännitys työsaumassa:	$\tau_d := \frac{\gamma_1 \cdot E_{\chi,LVL} \cdot a_1 \cdot A_{levy}}{b_w \cdot EI_{ef,2x2}} \cdot V_{d,tuki} = 0.87 \text{ MPa}$
Leikkajännitys syidensuuntaan:	$f_{v,0,kX} := 1.3 \frac{N}{mm^2} \quad f_{v,0,kS} := 2.3 \frac{N}{mm^2}$
Mitoitusarvo:	$f_{v,0,d} := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot \min(f_{v,0,kX}, f_{v,0,kS}) = 0.87 \text{ MPa}$
Käyttöaste:	$\frac{\tau_d}{f_{v,0,d}} = 100\%$

Ripa 102x51 + LVL-levy 21mm ruuvikiinnitys, Joustava liitos:

Liittimien jako:	$s = 150 \text{ mm}$	Levyn paksuus:	$h_f = 21 \text{ mm}$
Rangan korkeus:	$h_w = 102 \text{ mm}$	Rangan paksuus:	$b_w = 51 \text{ mm}$
Levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta:	$a_1 = 51.53 \text{ mm}$	Liitoskerroin:	$\gamma_1 = 0.17$

Pinta-aloja:	$A_{levy} := h_f \cdot b_{ef} = 7686 \text{ mm}^2$
Taivutusjäykkyys:	$EI_{ef,3x2} = 109.23 \text{ kN} \cdot m^2$

Normaalivoima seinälle:	$F_{21,r} := 83.74 \frac{kN}{m}$
-------------------------	----------------------------------

Epäkeskisyyks:	$e := a_{1,21r} = 51.53 \text{ mm}$
Momentti:	$M := F_{21,r} \cdot e = 4.31 \text{ kN}$

Ekvivalentti vaakakuorma:	$q_d := \frac{8 \cdot M}{h_{elementti}^2} = 3.48 \text{ kPa}$
---------------------------	---

Leikkausvoiman mitoitusarvo:	$V_d := \frac{1}{2} \cdot q_d \cdot kk \cdot h_{elementti} = 3.15 \text{ kN}$
Leikkausvoima tuella:	$V_{d,tuki} := V_d \cdot \left(1 - \frac{h_f + h_w}{0.5 \cdot h_{elementti}}\right) = 2.9 \text{ kN}$

Leikkausjännitys liitospinnassa:	$\tau_d := \frac{\gamma_1 \cdot E_{\chi,LVL} \cdot a_1 \cdot A_{levy}}{b_w \cdot EI_{ef,3x2}} \cdot V_{d,tuki} = 0.37 \text{ MPa}$
-------------------------------------	--

Liittimeen kohdistuva leikkausvoima:	$\tau_j := \tau_d \cdot b_w \cdot s = 2.82 \text{ kN}$
---	--

Ruuvien paksuus:	$d = 5 \text{ mm}$	Puuntiheys:	$p_{k,LVL} = 510 \frac{kg}{m^3}$
Ruuvien tehollinen paksuus:	$d_{ef} = 1.1 \cdot d = 5.5 \text{ mm}$	Liittimien suunta:	$\alpha = 90^\circ$

Kärkiosan tunkeuma liitoksessa:	$t_2 := 50 \text{ mm} - h_f = 29 \text{ mm}$
------------------------------------	--

$$f_{h,0,k} := 0.082 \cdot \left(1 - 0.01 \cdot \frac{d_{ef}}{mm}\right) \cdot \frac{p_{k,LVL}}{kg} = 39.52$$

$$k_{90} := 1.30 + 0.015 \cdot \frac{d_{ef}}{mm} = 1.38 \frac{m^3}{m^3}$$

Reunapuristuslujuus:	$f_{h,k} := \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} \cdot \frac{N}{mm^2} = 39.52 \frac{N}{mm^2}$
----------------------	---

Liittimen vetomurtolujuuden ominaisarvo: (Lujuus 6.8)

$$f_{u,k} := 600 \frac{N}{mm^2}$$

Liittimen myötömomentti:

$$M_y := \left(0.3 \cdot \frac{f_{u,k}}{N} \cdot \left(\frac{d_{ef}}{mm} \right)^{2.6} \right) N \cdot mm = 0.02 \text{ kN} \cdot m$$

$$t_u := \frac{t_2 \cdot f_{h,k}}{f_{h,k}} = 29 \text{ mm}$$

Liittimen leikkauskestävyyden ominaisarvo:

$$R_k := \min \left(0.4 \cdot f_{h,k} \cdot t_u \cdot d_{ef} \cdot \sqrt{1 + \frac{(3 \cdot M_y)}{f_{h,k} \cdot d_{ef} \cdot t_u^2}}, 2 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_{h,k} \cdot d_{ef}} \right) = 2.82 \text{ kN}$$

Käyttöaste:

$$\frac{\tau_f}{R_k} = 100\%$$

Ripa 102x51 + LVL-levy 39mm ruuvikiinnitys, Joustava liitos:

Levyn paksuus: $h_f := 39 \text{ mm}$

Rangan paksuus: $b_w := 51 \text{ mm}$

Levyn painopisteen etäisyys neutraaliakselilta: $a_1 := 48.99 \text{ mm}$

Pinta-aloja: $A_{levy} := h_f \cdot b_{ef} = 14274 \text{ mm}^2$

Taivutusjäykkyys: $EI_{ef,4x2} = 99.23 \text{ kN} \cdot m^2$

Rangan korkeus: $h_w := 84 \text{ mm}$

Liitoskerroin: $\gamma_f := 0.1$

Kuorma seinälle: $F_{39,1} := 81.32 \frac{kN}{m}$

Epäkeskisyyden Momentti: $e := a_{1,39} = 48.99 \text{ mm}$
 $M := F_{39,1} \cdot e = 3.98 \text{ kN}$

Ekvivalentti vaakakuorma: $q_d := \frac{8 \cdot M}{h_{elementti}^2} = 3.21 \text{ kPa}$

Leikkausvoiman mitoitusrvo: $V_d := \frac{1}{2} \cdot q_d \cdot k_k \cdot h_{elementti} = 2.91 \text{ kN}$

Leikkausvoima tuella: $V_{d,tuki} := V_d \cdot \left(1 - \frac{h_f + h_w}{0.5 \cdot h_{elementti}} \right) = 2.68 \text{ kN}$

Leikkausjännitys liitospinnassa: $\tau_d := \frac{\gamma_f \cdot E_{X,LVL} \cdot a_1 \cdot A_{levy}}{b_w \cdot EI_{ef,4x2}} \cdot V_{d,tuki} = 0.39 \text{ MPa}$

Liittimeen kohdistuva leikkausvoima: $\tau_f := \tau_d \cdot b_w \cdot s = 2.97 \text{ kN}$

Kärkiosan tunkeuma liitoksessa: $t_2 := 70 \text{ mm} - h_f = 31 \text{ mm}$

$$t_u := \frac{t_2 \cdot f_{h,k}}{f_{h,k}} = 31 \text{ mm}$$

Liittimen leikkauskestävyyden ominaisarvo:

$$R_k := \min \left(0.4 \cdot f_{h,k} \cdot t_u \cdot d_{ef} \cdot \sqrt{1 + \frac{(3 \cdot M_y)}{f_{h,k} \cdot d_{ef} \cdot t_u^2}}, 2 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_{h,k} \cdot d_{ef}} \right) = 2.97 \text{ kN}$$

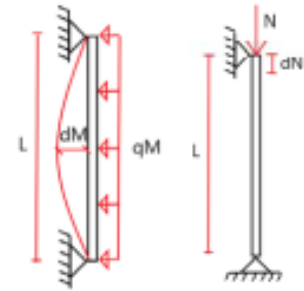
Käyttöaste: $\frac{\tau_f}{R_k} = 100\%$

FEM-tarkastelu ja vertailu yksinkertaistettuun laskentaan:

Taivutusjäykkyys:

Elementin korkeus ja leveys: $L := h_{\text{elementti}} = 3.15 \text{ m}$ $h := l = 1.2 \text{ m}$

Taivutuskuorma: $F := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot h = 12 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$



(Siirtymien mitat saatu FEM-Design ohjelmasta)

102x51 + LVL-levy 21mm liimakiinnitys

Taivutusjäykkyys: $EI_{21,l} := \frac{5 \cdot F \cdot L^4}{384 \cdot 36.33 \text{ mm}} = 423.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$
(21 LVL, liima)

Analyttinen käsinlaskenta:

$EI_{ef,1x} = 436.35 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$

$$\frac{EI_{ef,1x} - EI_{21,l}}{EI_{ef,1x}} = 3\%$$

84x51 + LVL-levy 39mm liimakiinnitys

Taivutusjäykkyys: $EI_{39,l} := \frac{5 \cdot F \cdot L^4}{384 \cdot 34.86 \text{ mm}} = 441.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$
(39 LVL, liima)

$EI_{ef,2x} = 447.23 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$

$$\frac{EI_{ef,2x} - EI_{39,l}}{EI_{ef,2x}} = 1.3\%$$

102x51 + LVL-levy 21mm ruuvikiinnitys

Taivutusjäykkyys: $EI_{21,r} := \frac{5 \cdot F \cdot L^4}{384 \cdot 97.04 \text{ mm}} = 158.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$
(21 LVL, ruuvi)

$EI_{ef,3x} = 228.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$

$$\frac{EI_{ef,3x} - EI_{21,r}}{EI_{ef,3x}} = 30.5\%$$

84x51 + LVL-levy 39mm ruuvikiinnitys

Taivutusjäykkyys: $EI_{39,r} := \frac{5 \cdot F \cdot L^4}{384 \cdot 96.09 \text{ mm}} = 160.1 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$
(39 LVL, ruuvi)

$EI_{ef,4x} = 207.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$

$$\frac{EI_{ef,4x} - EI_{39,r}}{EI_{ef,4x}} = 22.8\%$$

Puristusjäykkyys:

Normaalivoima: $N := 100 \frac{kN}{m} \cdot \frac{h}{2} = 60 \text{ kN}$

Puristusjäykkyys:
(21 LVL + ripa) $EA_{21} := \frac{N}{\frac{1.32 \text{ mm} + 0.79 \text{ mm}}{2}} = 56.87 \frac{kN}{mm}$

Puristusjäykkyys:
(39 LVL + ripa) $EA_{39} := \frac{N}{\frac{0.74 \text{ mm} + 0.49 \text{ mm}}{2}} = 97.56 \frac{kN}{mm}$

Puristusjäykkyys:
(21 LVL) $EA_{21,levy} := \frac{N}{1.45 \text{ mm}} = 41.38 \frac{kN}{mm}$

Puristusjäykkyys:
(39 LVL) $EA_{39,levy} := \frac{N}{0.79 \text{ mm}} = 75.95 \frac{kN}{mm}$

Analyttinen käsinlaskenta:

$$EA_1 = 64.79 \frac{kN}{mm}$$

$$\frac{EA_1 - EA_{21}}{EA_1} = 12.2\%$$

$$EA_2 = 96.77 \frac{kN}{mm}$$

$$\frac{EA_2 - EA_{39}}{EA_2} = -0.8\%$$

$$EA_{1,levy} = 42 \frac{kN}{mm}$$

$$\frac{EA_{1,levy} - EA_{21,levy}}{EA_{1,levy}} = 1.5\%$$

$$EA_{2,levy} = 78 \frac{kN}{mm}$$

$$\frac{EA_{2,levy} - EA_{39,levy}}{EA_{2,levy}} = 2.6\%$$

Yhteenveto: Taivutusjäykkyys y-suunta:

$$\begin{aligned} \text{LVL-levy 21 liima: } & EI_{eL1x} = 436.35 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \\ \text{LVL-levy 39 liima: } & EI_{eL2x} = 447.23 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \\ \text{LVL-levy 21 ruuvi: } & EI_{eL3x} = 228.16 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \\ \text{LVL-levy 39 ruuvi: } & EI_{eL4x} = 207.27 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

Puristusjäykkyys:

$$\begin{aligned} \text{LVL-levy 21 liima: } & EA_1 = 64789.71 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{LVL-levy 39 liima: } & EA_2 = 96768 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{Pelkkä LVL-levy 21: } & EA_{1,\text{levy}} = 42000 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{Pelkkä LVL-levy 39: } & EA_{2,\text{levy}} = 78000 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Leikkausvoimakestävyys:

$$\begin{aligned} \text{LVL-levy 21 liima: } & \frac{F_{v.Ed1}}{l} = 223.87 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{LVL-levy 39 liima: } & \frac{F_{v.Ed2}}{l} = 225.72 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{LVL-levy 21 ruuvi: } & \frac{F_{v.Ed3}}{l} = 180.36 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{LVL-levy 39 ruuvi: } & \frac{F_{v.Ed4}}{l} = 174.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Taivutusjäykkyys x-suunta:

$$\begin{aligned} \text{LVL-levy 21 liima: } & C_{ripa,1y} = 2620.56 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{LVL-levy 39 liima: } & C_{ripa,2y} = 4150.96 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{LVL-levy 21 ruuvi: } & C_{ripa,3y} = 2065.77 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{LVL-levy 39 ruuvi: } & C_{ripa,4y} = 2577.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Nurjahduskestävyys:

Tehollinen poikkileikkaus:

$$\begin{aligned} \text{LVL-levy 21 liima: } & N_{21L\text{teb}} = 159.37 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{LVL-levy 39 liima: } & N_{39L\text{teb}} = 182.79 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{LVL-levy 21 ruuvi: } & N_{21r\text{teb}} = 87.36 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \text{LVL-levy 39 ruuvi: } & N_{39r\text{teb}} = 65.86 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Taivutusjäykkyys y-suunta FEM-Design:

$$\begin{aligned} EI_{21,l} &= 423.44 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \\ EI_{39,l} &= 441.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \\ EI_{21,r} &= 158.53 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \\ EI_{39,r} &= 160.1 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

Puristusjäykkyys FEM-Design

$$\begin{aligned} EA_{21} &= 56872.04 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ EA_{39} &= 97560.98 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ EA_{21,\text{levy}} &= 41379.31 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ EA_{39,\text{levy}} &= 75949.37 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Leikkausvoimaresultantti kestävyys liitospinnassa:

$$\begin{aligned} F_{21,l} &= 202.97 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ F_{39,l} &= 310.17 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ F_{21,r} &= 83.74 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ F_{39,r} &= 81.32 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Kapasiteetti siirtymän suhteen:

$$\begin{aligned} \frac{F_{u,1y}}{l} &= 13.76 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \frac{F_{u,2y}}{l} &= 21.79 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \frac{F_{u,3y}}{l} &= 10.85 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ \frac{F_{u,4y}}{l} &= 13.53 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Todellinen poikkileikkaus:

$$\begin{aligned} N_{21L\text{tod}} &= 136.34 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ N_{39L\text{tod}} &= 203.64 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ N_{21r\text{tod}} &= 76.01 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ N_{39r\text{tod}} &= 84.07 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

LIITE 2: PALOMITOITUS

Palomitoitus

(RIL 205-2-2019 ja Paloturvallinen puutalo liite 2)
Jos REI90, niin katossa ja seinissä voidaan hyväksyä d-luokan pintaa jopa 80%.

Palolle altis rakenne:	
15+15 mm	Palokipsilevy
39 mm	LVL-levy
51 x 84mm	LVL-riipa

Rakenteen palonkesto:	$t := 90 \text{ min}$
Palokipsi paksuus: (2*F)	$h_p := 27 \text{ mm}$
LVL paksuus:	$h_{lvl} := 39 \text{ mm}$
Hiiltymänopeus LVL: (ril s. 24)	$\beta_0 := 0.65 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$
Hiiltymisen alkamisaika: (ril s. 29)	$t_{ch} := 65 \text{ min}$
Murtumishetki: (ril s. 39)	$t_f := 90 \text{ min}$
Sauman kohdalla: (ril s. 38-39)	$k_n := 1.5 \quad k_s := 1 \quad k_2 := 0.6$

Hiiltymisnopeus:

VAIHE 1: (0- t_{ch})	LVL-levy ei hiilly.
VAIHE 2: (t_{ch} - t_f)	$\beta_n := k_s \cdot k_2 \cdot k_n \cdot \beta_0 = 0.59 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$
(Ennen kipsilevyjen murtumista.)	
Nimellinen hiiltymissyvyys:	$d_{char,n} := \beta_n \cdot (t_f - t_{ch}) = 14.63 \text{ mm}$
	$d_0 := 7 \text{ mm} \quad k_0 := 1$
Tehollinen hiiltymissyvyys:	$d_{ef} := d_{char,n} + d_0 \cdot k_0 = 21.63 \text{ mm}$
(ril s. 31)	
hiiltymän aiheuttama epäkeskisyyys:	$e_{ch} := \frac{d_{ef}}{2} = 10.81 \text{ mm}$
Palotilanteen rasitus z-suunnassa:	$N_{d,z,\bar{n}} := 24.167 \text{ kN}$

Momentti rasituksesta:	$M_{d,x,\bar{n}} := e_{ch} \cdot N_{d,z,\bar{n}} = 0.26 \text{ kN} \cdot \text{m}$
Rakenteen kokonais korkeus:	$h := 84 \text{ mm} + h_{lvl} = 123 \text{ mm}$
Rivan leveys:	$b_{\bar{n}} := 51 \text{ mm}$
Rakenteen korkeus palon jälkeen:	$h_{\bar{n}} := h - d_{ef} = 101.38 \text{ mm}$

Materiaaliominaisuudet palotilanteessa:

Kerroin LVL: (ril s. 17)	$k_{\bar{n}} := 1.1 \quad \gamma_{M,\bar{n}} := 1$
Puristuslujuus syiden suuntaan: (Kerto-S)	$f_{c,0,k} := 35 \text{ MPa}$ $f_{c,0,20} := k_{\bar{n}} \cdot f_{c,0,k} = 38.5 \text{ MPa}$
Interpolointi a0: (ril s. 42)	$a_0 := \frac{0.46 - 0.55}{95 - 145} \cdot \left(\frac{h}{\text{mm}} - 95 \right) + 0.46 = 0.51$
Interpolointi a1: (ril s.42)	$a_1 := \frac{0.37 - 0.40}{95 - 145} \cdot \left(\frac{h}{\text{mm}} - 95 \right) + 0.37 = 0.39$
Muunnoskerroin: (ril s. 42)	$k_{mod,\bar{n}} := a_0 - a_1 \cdot \frac{d_{char,n}}{h} = 0.46$
Palotilanteen puristuslujuus:	$f_{c,0,d,\bar{n}} := \frac{k_{mod,\bar{n}}}{\gamma_{M,\bar{n}}} \cdot f_{c,0,20} = 17.88 \text{ MPa}$
Taivutuslujuus syrjällään: (Kerto-S)	$f_{m,k} := 44 \text{ MPa}$ $f_{m,20} := k_{\bar{n}} \cdot f_{m,k} = 48.4 \text{ MPa}$
Palotilanteen taivutuslujuus:	$f_{m,d,\bar{n}} := \frac{k_{mod,\bar{n}}}{\gamma_{M,\bar{n}}} \cdot f_{m,20} = 22.48 \text{ MPa}$
Kimmokertoimen 5% ominaisarvo: (Kerto-S)	$E_{0,05} := 11600 \text{ MPa}$

Nurjahduskestävyys y-suunnassa:Elementin jänneväli (korkeus): $h_{elementti} := 3150 \text{ mm} - 200 \text{ mm} = 2950 \text{ mm}$ Nurjahduspituus: $L_{c,y.fi} := 1 \cdot h_{elementti} = 2950 \text{ mm}$ Jäyhyysmomentti: $I_{x.fi} := \frac{b_{fi} \cdot h_{fi}^3}{12} = 4427734.1 \text{ mm}^4$ Poikkileikkauksen pinta-ala: $A_{fi} := b_{fi} \cdot h_{fi} = 5170.13 \text{ mm}^2$ Jäyhyyssäde: $i_{x.fi} := \sqrt{\frac{I_{x.fi}}{A_{fi}}} = 29.26 \text{ mm}$ Hoikkuusluku: $\lambda_{x.fi} := \frac{L_{c,y.fi}}{i_{x.fi}} = 100.8$ Muunnettu hoikkuus: $\lambda_{x,rel.fi} := \frac{\lambda_{x.fi}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 1.76$

Alkukäyryskerroin: (LVL)

$$\beta_c := 0.1$$

$$k_{x.fi} := 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{x,rel.fi} - 0.3) + \lambda_{x,rel.fi}^2) = 2.13$$

$$k_{c,x.fi} := \min\left(\frac{1}{k_{x.fi} + \sqrt{k_{x.fi}^2 - \lambda_{x,rel.fi}^2}}, 1\right) = 0.3$$

$$\sigma_{c,0,d.fi} := \frac{N_{d,x.fi}}{A_{fi}} = 4.67 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,x,d.fi} := \frac{6 \cdot M_{d,x.fi}}{b_{fi} \cdot h_{fi}^2} = 2.99 \text{ MPa}$$

Käyttöaste:

$$\frac{\sigma_{c,0,d.fi}}{k_{c,x.fi} \cdot f_{c,0,d.fi}} + \frac{\sigma_{m,x,d.fi}}{f_{m,d.fi}} = 100\%$$

Normaalivoiman osuus:

$$\frac{\sigma_{c,0,d.fi}}{k_{c,x.fi} \cdot f_{c,0,d.fi}} = 86.69\%$$

Taivutuksen osuus:

$$\frac{\sigma_{m,x,d.fi}}{f_{m,d.fi}} = 13.31\%$$

Kestävyys 8-kerrosta märkätila:

Ripajako:

$$kk := 260 \text{ mm}$$

Palotilanteen kuormitus:

$$E_{d,märkä.fi.4} := 92.45 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad N_{fi} := E_{d,märkä.fi.4} \cdot kk = 24.04 \text{ kN}$$

Kestävyys:

$$\frac{N_{fi}}{N_{d,x.fi}} = 99.5\%$$

Kestävyys 8-kerrosta kuivatila:

Ripajako:

$$kk := 490 \text{ mm}$$

Palotilanteen kuormitus:

$$E_{d,kuiva.fi.4} := 49.29 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad N_{fi} := E_{d,kuiva.fi.4} \cdot kk = 24.15 \text{ kN}$$

Kestävyys:

$$\frac{N_{fi}}{N_{d,x.fi}} = 99.9\%$$

LIITE 3: KUORMITUKSET JA JÄYKISTYS

Jäykistys + kuormat

8-kerroksisen tilaelementtikerrostalon jäykistykseen ja kuormitusten laskenta. (RIL 201-1-2017; Vänntilä 2021; Luntta 2021)

Viimeisenä ankkurointi- ja puristusvoimien määrittäminen.

Vaakakuormat:

Tuulikuorma voimakertoimilla:
(RIL 201-1-2017)

Maastoluokka II

Rakennuksen korkeus: $h := 27.95 \text{ m}$

Korkeus ilman kattokolmiota: $h_1 := 26.43 \text{ m}$

Nopeuspaine käyrä: $q_k := 0.83 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Rakennuksen syvyys: $d := 16.27 \text{ m}$

Rakennuksen leveys: $b := 27.39 \text{ m}$

Rakennekerroin: $c_c := 1 \quad c_d := 1$

Tehollinen hoikkuus sivussa: $\lambda_{sivu} := \left(\frac{1.4 - 2}{50 - 15} \cdot \left(\frac{h}{m} - 15 \right) + 2 \right) \cdot \frac{h}{b} = 1.8$

Kerroin: $db_{sivu} := \frac{d}{b} = 0.6$

Voimakerroin: $c_{f1} := \frac{1.44 - 1.37}{0.7 - 0.5} \cdot \left(\frac{d}{b} - 0.7 \right) + 1.44 = 1.4$

(T5.2S, RIL 201-1-2017) $c_{f2} := \frac{1.55 - 1.48}{0.7 - 0.5} \cdot \left(\frac{d}{b} - 0.7 \right) + 1.55 = 1.51$

$$c_{Lsivu} := \frac{c_{f1} - c_{f2}}{1 - 3} \cdot (\lambda_{sivu} - 1) + c_{f2} = 1.56$$

Tehollinen hoikkuus päädysssä: $\lambda_{pääty} := \left(\frac{1.4 - 2}{50 - 15} \cdot \left(\frac{h}{m} - 15 \right) + 2 \right) \cdot \frac{h}{d} = 3.1$

Kerroin: $db_{pääty} := \frac{b}{d} = 1.7$

Voimakerroin: $c_{f1} := \frac{1.07 - 1.38}{2 - 1} \cdot \left(\frac{b}{d} - 1 \right) + 1.38 = 1.17$

(T5.2S, RIL 201-1-2017) $c_{f2} := \frac{1.15 - 1.49}{2 - 1} \cdot \left(\frac{b}{d} - 1 \right) + 1.55 = 1.32$

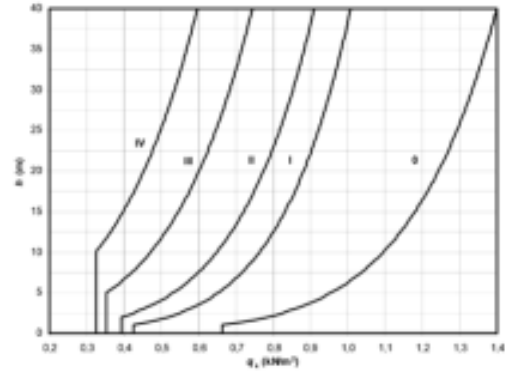
$$c_{Lpääty} := \frac{c_{f1} - c_{f2}}{3 - 10} \cdot (\lambda_{pääty} - 1) + c_{f1} = 1.21$$

Tuulikuorma (Sivu):

$$q_{wk,sivu} := q_k \cdot c_{Lsivu} \cdot c_c \cdot c_d = 1.293 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tuulikuorma (Pääty):

$$q_{wk,pääty} := q_k \cdot c_{Lpääty} \cdot c_c \cdot c_d = 1.006 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$



(RIL 205-1-2017, s. 42, kuva 2.6S)

Tuulikuorma painekertoimilla

(RIL 201-1-2011)

Tuuli sivulle (pidempi):

Rakennuksen leveys: $b = 27.39 \text{ m}$
 Rakennuksen syvyys: $d = 16.27 \text{ m}$
 $e := \min(b, 2 \cdot h) = 27.39 \text{ m} \quad e > d = 1$
 Rakennuksen korkeus: $h = 27.95 \text{ m}$

Ulkopuolisen paineen kertoimet: (RIL201-1-2017, taulukko 7.1)

$$\frac{h}{d} = 1.72$$

$$c_{pe,A} := -1.2$$

$$c_{pe,B} := -0.8$$

$$c_{pe,C} := -0.5$$

$$c_{pe,D} := 0.8$$

$$c_{pe,E} := \frac{-0.7 + 0.5}{5 - 1} \cdot \left(\frac{h}{d} - 1 \right) - 0.5 = -0.54$$

A vyöhykkeen pituus: $B_A := \frac{e}{5} = 5.48 \text{ m}$

B vyöhykkeen pituus: $B_B := d - \frac{e}{5} = 10.79 \text{ m}$

Aukkosuhde: $\frac{2 \cdot d + b}{2 \cdot d + 2 \cdot b} = 0.69$

Sisäisen paineen kerroin: (RIL201-1-2017, kuva 7.13S) $c_{pi} := -0.15$

Nettopaineet:

A	$q_{wA,p} := q_k \cdot (c_{pe,A} - c_{pi}) = -0.87 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
B	$q_{wB,p} := q_k \cdot (c_{pe,B} - c_{pi}) = -0.54 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
D	$q_{wD,p} := q_k \cdot (c_{pe,D} - c_{pi}) = 0.79 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
E	$q_{wE,p} := q_k \cdot (c_{pe,E} - c_{pi}) = -0.32 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Pidemmälle sivulle kohdistuva tuulen nettopaine: $q_{wk,sivu2} := q_{wD,p} - q_{wE,p} = 1.109 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Voimakerroin vs painekerroin: $\frac{q_{wk,sivu} - q_{wk,sivu2}}{q_{wk,sivu2}} = 16.6\%$ Paine kertoimella tulos 16.6% pienempi kuin voimakertoimella.

$D_{pros} := \frac{q_{wD,p}}{q_{wk,sivu2}} = 71\%$ $E_{pros} := \frac{-q_{wE,p}}{q_{wk,sivu2}} = 29\%$

Tuuli päädyille (Lyhyempi):

Rakennuksen leveys:	$b = 27.39 \text{ m}$	
Rakennuksen syvyys:	$d = 16.27 \text{ m}$	
	$e := \min(d, 2 \cdot h) = 16.27 \text{ m}$	$e < b = 1$
Rakennuksen korkeus:	$h = 27.95 \text{ m}$	
Ulkopuolisen paineen kertoimet: (RIL201-1-2017, taulukko 7.1)	$\frac{h}{b} = 1.02$	$c_{pe,A} := -1.2$ $c_{pe,B} := -0.8$ $c_{pe,C} := -0.5$ $c_{pe,D} := 0.8$ $c_{pe,E} := \frac{-0.7 + 0.5}{5 - 1} \cdot \left(\frac{h}{b} - 1\right) - 0.5 = -0.5$
A vyöhykkeen pituus:	$D_A := \frac{e}{5} = 3.25 \text{ m}$	
B vyöhykkeen pituus:	$D_B := d - \frac{e}{5} = 13.02 \text{ m}$	
Aukkosuhde:	$\frac{2 \cdot b + d}{2 \cdot b + 2 \cdot d} = 0.81$	
Sisäisen paineen kerroin: (RIL201-1-2017, kuva 7.13S)	$c_{pi} := -0.32$	
Nettopaineet:	$A \quad q_{wA} := q_k \cdot (c_{pe,A} - c_{pi}) = -0.73 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ $B \quad q_{wB} := q_k \cdot (c_{pe,B} - c_{pi}) = -0.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ $D \quad q_{wD} := q_k \cdot (c_{pe,D} - c_{pi}) = 0.93 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ $E \quad q_{wE} := q_k \cdot (c_{pe,E} - c_{pi}) = -0.15 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Pidemmälle sivulle kohdistuva tuulen nettopaine:	$q_{wk,pääty2} := q_{wD} - q_{wE} = 1.08 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Voimakerroin vs paine kerroin:	$\frac{q_{wk,pääty2} - q_{wk,pääty}}{q_{wk,pääty}} = 7.3\%$	Painekertoimella tulos 7.3% suurempi kuin voimakertoimella.

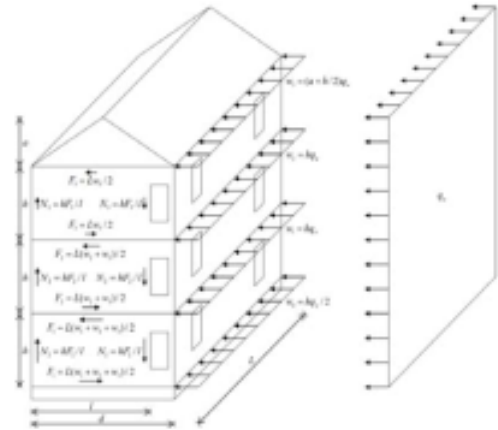
Tuulikuorma kerroksittain:

Yhdistelykerroin:
Päätykolmio
keskimääräinen korkeus:
Kerroskorkeus:

$$\psi := 1.5$$

$$a := 1.6 \text{ m}$$

$$h_{\text{kerros}} := 3.15 \text{ m}$$



Tuulikuorma kerroksittain (Sivu):

$$q_{wd,s} := q_{wk,sivu} \cdot \psi = 1.94 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$W_{yp,s} := \frac{a}{2} \cdot q_{wd,s} = 1.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{8,s} := \left(\frac{h_{\text{kerros}}}{2} + \frac{a}{2} \right) \cdot q_{wd,s} + W_{yp,s} = 6.16 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{7,s} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,s} + W_{8,s} = 12.27 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{6,s} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,s} + W_{7,s} = 18.38 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{5,s} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,s} + W_{6,s} = 24.48 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{4,s} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,s} + W_{5,s} = 30.59 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{3,s} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,s} + W_{4,s} = 36.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{2,s} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,s} + W_{3,s} = 42.81 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{1,s} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,s} + W_{2,s} = 48.92 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tuulikuorma kerroksittain (Pääty):

$$q_{wd,p} := q_{wk,pääty2} \cdot \psi = 1.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$W_{yp,p} := \frac{a}{2} \cdot q_{wd,p} = 1.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{8,p} := \left(\frac{h_{\text{kerros}}}{2} + \frac{a}{2} \right) \cdot q_{wd,p} + W_{yp,p} = 5.14 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{7,p} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,p} + W_{8,p} = 10.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{6,p} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,p} + W_{7,p} = 15.35 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{5,p} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,p} + W_{6,p} = 20.45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{4,p} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,p} + W_{5,p} = 25.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{3,p} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,p} + W_{4,p} = 30.65 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{2,p} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,p} + W_{3,p} = 35.76 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$W_{1,p} := h_{\text{kerros}} \cdot q_{wd,p} + W_{2,p} = 40.86 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Lisävaakavoima:

Tilaelementti omapaino:

$$G_{\text{tila}} := 12000 \text{ kg} \cdot g = 117.68 \text{ kN} \quad \phi_1 := 1.15 \quad \phi_2 := 1.05$$

Hyötykuorma:

$$q_{\text{hyöty}} := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad Q_{\text{tila}} := q_{\text{hyöty}} \cdot 8 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} = 64 \text{ kN}$$

Lisävaakavoima/seinä/
tilaelementti:

$$w_{\text{lisa}} := \frac{Q_{\text{tila}} \cdot \phi_2 + G_{\text{tila}} \cdot \phi_1}{200} \cdot 0.5 = 0.51 \text{ kN}$$

Vaakakuormitus:

$$w := \frac{w_{\text{lisa}}}{h_{\text{kerros}}} = 0.16 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad W_{1,s} + 8 \cdot w = 50.21 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pystykuormat:

Esimerkkirakennuksena on 8-kerroksinen tilaelementeistä valmistettu puukerrostalo. Laskennan tarkoituksena on määrittää kuormituksia ja jäykistävien voimien jakautumista seinärakenteille. (Vänttilä 2021)

Lasketut kuormitukset laskettu kuvan 15. C-linjan tilaelementtien mukaan.

Lumikuorma:

Ominais Lumikuorma maassa: $s_k := 2.5 \frac{kN}{m^2}$

Katon kaltevuus: $\alpha < 30^\circ$

Muotokerroin: $\mu := 0.8$

Ominaislumikuorma katolla: $q_k := s_k \cdot \mu = 2 \frac{kN}{m^2}$

Kuormitusala lumikuormalle: $l_{vk} := \frac{4.106}{2} m = 2.05 m$

Viivakuorma seinälle lumikuormasta: $q_{k,s} := q_k \cdot l_{vk} = 4.11 \frac{kN}{m}$

Katon omat kuormat:

Katon omapaino: $g_k := 0.7 \frac{kN}{m^2}$

Kuormitusala kattorakenteelle: $l_{yp,ala} := l_{vk} = 2.05 m$

Viivakuorma seinälle katon omapainosta: $g_{k,yp,yht} := g_k \cdot l_{yp,ala} = 1.44 \frac{kN}{m}$

HVS omat painot:

HVS omapaino: $g_{k,hvs,m} := 0.5 \frac{kN}{m^2}$

Kuormitusala HVS: $l_{HVS} := 2.84 m$

Viivakuorma seinälle HVS omapainosta: $g_{k,HVS} := g_{k,hvs,m} \cdot l_{HVS} = 1.42 \frac{kN}{m}$

US omat painot:

US omapaino: $g_{k,us,m} := 0.7 \frac{kN}{m^2}$

Kuormitusala US: $l_{US} := 2.84 m$

Viivakuorma seinälle US omapainosta: $g_{k,US} := g_{k,us,m} \cdot l_{US} = 1.99 \frac{kN}{m}$

Välipohjan omat painot: (Märkätila)

Välipohjan omapaino: $g_{k,vp,m} := 4.53 \frac{kN}{m^2}$

Kuormitusala välipohjalle: $I_{vp} := I_{vk} = 2.05 \text{ m}$

Viivakuorma seinälle
välipohjan omapainosta: $g_{k,vp,m} := g_{k,vp,m} \cdot I_{vp} = 9.3 \frac{kN}{m}$

Välipohjan omat painot: (Kuivatila)

Välipohjan omapaino: $g_{k,vp,k} := 1.25 \frac{kN}{m^2}$

Kuormitusala välipohjalle: $I_{vp} := I_{vk} = 2.05 \text{ m}$

Viivakuorma seinälle
välipohjan omapainosta: $g_{k,vp,k} := g_{k,vp,k} \cdot I_{vp} = 2.57 \frac{kN}{m}$

Hvötykuorma:

Lattian hvötykuorma: $q_{k,hvö} := 2 \frac{kN}{m^2}$

Kuormitusala hvötykuormalle: $I_{hvöty} := 1.9 \text{ m}$

Viivakuorma seinälle
hvötykuormasta: $q_{k,hvö} := q_{k,hvö} \cdot I_{hvöty} = 3.8 \frac{kN}{m}$

Hvötykuorman pienennyskerroin:

Yhdistelykerroin: $\psi_0 := 0.7$

$n_3 := 3$ $n_4 := 4$ $n_5 := 5$

$\alpha_{n3} := \frac{2 + (n_3 - 2) \cdot \psi_0}{n_3} = 0.9$

$\alpha_{n4} := \frac{2 + (n_4 - 2) \cdot \psi_0}{n_4} = 0.85$

$\alpha_{n5} := \frac{2 + (n_5 - 2) \cdot \psi_0}{n_5} = 0.82$

$n_6 := 6$ $n_7 := 7$ $n_8 := 8$

$\alpha_{n6} := \frac{2 + (n_6 - 2) \cdot \psi_0}{n_6} = 0.8$

$\alpha_{n7} := \frac{2 + (n_7 - 2) \cdot \psi_0}{n_7} = 0.79$

$\alpha_{n8} := \frac{2 + (n_8 - 2) \cdot \psi_0}{n_8} = 0.78$

Kuormitus:**(Märkätila)**

K8: $F_{8krs,M} := 1.15 \cdot g_{k,yp,yht} + 1.5 \cdot q_{ks} = 7.81 \frac{kN}{m}$

K7: $F_{7krs,M} := 1.15 \cdot (g_{k,yp,yht} + g_{k,HVS} + g_{k,vp,m}) + 1.5 \cdot (q_{k,hvö} + \psi_0 \cdot q_{ks}) = 23.99 \frac{kN}{m}$

K1: $F_{1krs,M} := 1.15 \cdot (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,HVS} + g_{k,vp,m})) + 1.5 \cdot (7 \cdot \alpha_{n8} \cdot q_{k,hvö} + \psi_0 \cdot q_{ks}) = 123.18 \frac{kN}{m}$

$F_{1krs,M2} := 1.35 \cdot (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,HVS} + g_{k,vp,m})) = 103.24 \frac{kN}{m}$

Kuormitus:

(Kuivatila)

$$K8: F_{8krs.k'} := 1.15 \cdot g_{k,yp,yht} + 1.5 \cdot q_{k,s} = 7.81 \frac{kN}{m}$$

$$K7: F_{7krs.k'} := 1.15 (g_{k,yp,yht} + g_{k,US} + g_{k,VPK}) + 1.5 \cdot (q_{k,hyö} + \psi_0 \cdot q_{k,s}) = 16.9 \frac{kN}{m}$$

$$K1: F_{1krs.k'} := 1.15 (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,US} + g_{k,VPK})) + 1.5 \cdot (7 \cdot \alpha_{ns} \cdot q_{k,hyö} + \psi_0 \cdot q_{k,s}) = 73.55 \frac{kN}{m}$$

$$F_{1krs.k2} := 1.35 \cdot (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,US} + g_{k,VPK})) = 44.98 \frac{kN}{m}$$

Kuormitus:

(Tilaelementin pidempi ja lyhyempi sivu)

Pidempi sivu:

$$K1: F_{1krs.Pitka} := 1.15 (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,US} + g_{k,VPK})) + 1.5 \cdot (7 \cdot \alpha_{ns} \cdot q_{k,hyö} + \psi_0 \cdot q_{k,s}) = 73.55 \frac{kN}{m}$$

Lyhyempi sivu:

$$K1: F_{1krs.Lyhyt} := 1.15 \cdot 7 \cdot g_{k,US} = 16 \frac{kN}{m} \quad F_{1krs.Lyhyt} := 1.35 \cdot 7 \cdot g_{k,US} = 18.79 \frac{kN}{m}$$

Kuormitus: (Palotilanne)

(Märkätila 1.krs)

	Lumi1:	Lumi2:	Tuuli1:	Tuuli2:	Hyöty:
Yhdistelykertoimet:	$\psi_{1.1,t} := 0.4$	$\psi_{2.1,t} := 0.2$	$\psi_{1.1,t} := 0.2$	$\psi_{2.1,t} := 0$	$\psi_{2,t} := 0.3$

Märkätila 1-kerros:

$$E_{d.märkä.t.1} := (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,HVS} + g_{k,VPK})) + (\psi_{2,t} \cdot 7 \cdot \alpha_{ns} \cdot q_{k,hyö}) + (\psi_{1.1,t} \cdot q_{k,s}) = 84.3 \frac{kN}{m}$$

(Lumi määräävä)

$$E_{d.märkä.t.2} := (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,HVS} + g_{k,VPK})) + (\psi_{2,t} \cdot 7 \cdot \alpha_{ns} \cdot q_{k,hyö}) + (\psi_{2.1,t} \cdot q_{k,s}) = 83.48 \frac{kN}{m}$$

(Hyöty määräävä)

$$E_{d.märkä.t.3} := (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,HVS} + g_{k,VPK})) + (\psi_{2,t} \cdot 7 \cdot \alpha_{ns} \cdot q_{k,hyö}) + (\psi_{2.1,t} \cdot W_{1,s}) = 82.66 \frac{kN}{m}$$

(Hyöty määräävä)

$$E_{d.märkä.t.4} := (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,HVS} + g_{k,VPK})) + (\psi_{2,t} \cdot 7 \cdot \alpha_{ns} \cdot q_{k,hyö}) + (\psi_{1.1,t} \cdot W_{1,s}) = 92.45 \frac{kN}{m}$$

(Tuuli määräävä)

Kuivatila 1-kerros:

$$E_{d.kuiva.t.1} := (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,US} + g_{k,VPK})) + (\psi_{2,t} \cdot 7 \cdot \alpha_{ns} \cdot q_{k,hyö}) + (\psi_{1.1,t} \cdot q_{k,s}) = 41.14 \frac{kN}{m}$$

(Lumi määräävä)

$$E_{d.kuiva.t.2} := (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,US} + g_{k,VPK})) + (\psi_{2,t} \cdot 7 \cdot \alpha_{ns} \cdot q_{k,hyö}) + (\psi_{2.1,t} \cdot q_{k,s}) = 40.32 \frac{kN}{m}$$

(Hyöty määräävä)

$$E_{d.kuiva.t.3} := (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,US} + g_{k,VPK})) + (\psi_{2,t} \cdot 7 \cdot \alpha_{ns} \cdot q_{k,hyö}) + (\psi_{2.1,t} \cdot W_{1,s}) = 39.5 \frac{kN}{m}$$

(Hyöty määräävä)

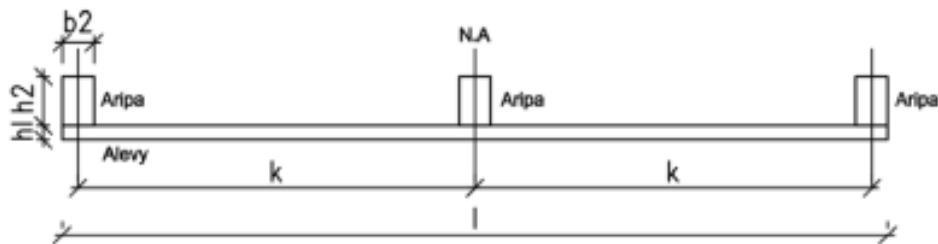
$$E_{d.kuiva.t.4} := (g_{k,yp,yht} + 7 \cdot (g_{k,US} + g_{k,VPK})) + (\psi_{2,t} \cdot 7 \cdot \alpha_{ns} \cdot q_{k,hyö}) + (\psi_{1.1,t} \cdot W_{1,s}) = 49.29 \frac{kN}{m}$$

(Tuuli määräävä)

Ratkaistaan taivutusjäykkyys testirakenteelle x-suunnassa + kapasiteetit

Tason suuntainen jäykkyys:

Ripa 84x48 + LVL-levy 39mm liimakiinnitys, Jäykkä liitos



Elementin jänneväli (korkeus): $h_{elementti} := 3150 \text{ mm}$

Levyn paksuus: $h_f := 39 \text{ mm}$

Rivan paksuus: $h_r := 84 \text{ mm}$

Rivan leveys: $b_r := 51 \text{ mm}$

Rivan pinta-ala: $A_{ranka} := b_r \cdot h_r = 4284 \text{ mm}^2$

$$I_{ranka} := \frac{h_r \cdot b_r^3}{12} = 928557 \text{ mm}^4$$

$$E_{kertos} := 13800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$E_{LVL} := 10500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$G_{LVL} := 600 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Seinä 1200 mm:

Elementin leveys:

$$l_{1,2} := 1200 \text{ mm}$$

LVL pinta-ala:

$$A_{levy} := l_{1,2} \cdot h_f = 46800 \text{ mm}^2$$

$$k := \frac{l_{1,2} - b_r}{2} = 574.5 \text{ mm}$$

$$I_{levy} := \frac{h_f \cdot l_{1,2}^3}{12} = 561600000 \text{ mm}^4$$

Taivutusjäykkyys:

$$EI_{ripa.1200} := E_{LVL} \cdot I_{levy} + 2 \cdot E_{kertos} \cdot (I_{ranka} + A_{ranka} \cdot k^2) = 98.02 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$$

kokonaisjäykkyys
tasonsuunnassa:

$$C_{1,2} := \frac{1}{\frac{h_{elementti}^3}{3 \cdot EI_{ripa.1200}} + \frac{6 \cdot h_{elementti}}{5 \cdot G_{LVL} \cdot A_{levy}}} = 4150.96 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Kapasiteetti siirtymän
suhteen:

$$F_{1,2,s} := 26.15 \text{ kN}$$

Yläreunan siirtymä
tasonsuunnassa:

$$u := \frac{F_{1,2,s}}{C_{1,2}} = 6.3 \text{ mm}$$

Siirtymäraja:
(RIL 205-1-2017, s. 172)

$$u_{raja} := \frac{h_{elementti}}{500} = 6.3 \text{ mm}$$

$$\frac{u}{u_{raja}} = 100\%$$

Kapasiteetti leikkauksen
suhteen:

$$F_{1,2} := 140.4 \text{ kN}$$

Leikkausvuo:

$$\tau := 1.5 \cdot \frac{F_{1,2}}{h_f \cdot l_{1,2}} = 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkauslujuus syrjällään:

$$f_{vk} := 4.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkaukskapasiteetti tason
suuntaiselle kuormalle:

$$\frac{\tau}{f_{vk}} = 100\%$$

Seinä 1000 mm:

Elementin leveys:

$$l_{1,0} := 1000 \text{ mm}$$

$$k := \frac{l_{1,0} - b_f}{2} = 474.5 \text{ mm}$$

LVL pinta-ala:

$$A_{levy} := l_{1,0} \cdot h_f = 39000 \text{ mm}^2$$

$$I_{levy} := \frac{h_f \cdot l_{1,0}^3}{12} = 3250000000 \text{ mm}^4$$

Taivutusjäykkyys:

$$EI_{ripa.1000} := E_{LVL} \cdot I_{levy} + 2 \cdot E_{Kertos} \cdot (I_{ranka} + A_{ranka} \cdot k^2) = 60.77 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$$

kokonaisjäykkyys
tasonsuunnassa:

$$C_{1,0} := \frac{1}{\frac{h_{elementti}^3}{3 \cdot EI_{ripa.1000}} + \frac{6 \cdot h_{elementti}}{5 \cdot G_{LVL} \cdot A_{levy}}} = 3003.22 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Kapasiteetti siirtymän
suhteen:

$$F_{1,0s} := 18.92 \text{ kN}$$

Yläreunan siirtymä
tasonsuunnassa:

$$u := \frac{F_{1,0s}}{C_{1,0}} = 6.3 \text{ mm}$$

Siirtymäraja:
(RIL 205-1-2017, s. 172)

$$u_{raja} := \frac{h_{elementti}}{500} = 6.3 \text{ mm}$$

$$\frac{u}{u_{raja}} = 100\%$$

Kapasiteetti leikkauksen
suhteen:

$$F_{1,0} := 117 \text{ kN}$$

Leikkausvuo:

$$\tau := 1.5 \cdot \frac{F_{1,0}}{h_f \cdot l_{1,0}} = 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkaukskapasiteetti tason
suuntaiselle kuormalle:

$$\frac{\tau}{f_{vk}} = 100\%$$

Seinä 800 mm:

Elementin leveys:

$$l_{0,8} := 800 \text{ mm}$$

$$k := \frac{l_{0,8} - b_f}{2} = 374.5 \text{ mm}$$

LVL pinta-ala:

$$A_{levy} := l_{0,8} \cdot h_f = 31200 \text{ mm}^2$$

$$I_{levy} := \frac{h_f \cdot l_{0,8}^3}{12} = 1664000000 \text{ mm}^4$$

Taivutusjäykkyys:

$$EI_{ripa.800} := E_{LVL} \cdot I_{levy} + E_{Kertos} \cdot (I_{ranka} + A_{ranka} \cdot k^2) = 25.78 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$$

kokonaisjäykkyys
tasonsuunnassa:

$$C_{0,8} := \frac{1}{\frac{h_{elementti}^3}{3 \cdot EI_{ripa.800}} + \frac{6 \cdot h_{elementti}}{5 \cdot G_{LVL} \cdot A_{levy}}} = 1649.85 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Vaakavoima:

$$F_{0,8s} := 10.394 \text{ kN}$$

Yläreunan siirtymä
tasonsuunnassa:

$$u := \frac{F_{0,8s}}{C_{0,8}} = 6.3 \text{ mm}$$

Siirtymäraja:
(RIL 205-1-2017, s. 172)

$$u_{raja} := \frac{h_{elementti}}{500} = 6.3 \text{ mm}$$

$$\frac{u}{u_{raja}} = 100\%$$

Kapasiteetti leikkauksen
suhteen:

$$F_{0,8} := 93.6 \text{ kN}$$

Leikkausvuo:

$$\tau := 1.5 \cdot \frac{F_{0,8}}{h_f \cdot l_{0,8}} = 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkaukskapasiteetti tason
suuntaiselle kuormalle:

$$\frac{\tau}{f_{vk}} = 100\%$$

Seinä 700 mm:

Elementin leveys:

$$l_{0,7} := 700 \text{ mm}$$

$$k := \frac{l_{0,7} - b_c}{2} = 324.5 \text{ mm}$$

LVL pinta-ala:

$$A_{levy} := l_{0,7} \cdot h_f = 27300 \text{ mm}^2$$

$$I_{levy} := \frac{h_f \cdot l_{0,7}^3}{12} = 1114750000 \text{ mm}^4$$

Taivutusjäykkyys:

$$EI_{ripa,700} := E_{LVL} \cdot I_{levy} + E_{KertoS} \cdot (I_{ranka} + A_{ranka} \cdot k^2) = 17.94 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$$

kokonaisjäykkyys
tasonsuunnassa:

$$C_{0,7} := \frac{1}{\frac{h_{elementti}^3}{3 \cdot EI_{ripa,700}} + \frac{6 \cdot h_{elementti}}{5 \cdot G_{LVL} \cdot A_{levy}}} = 1232.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Vaakavoima:

$$F_{0,7,s} := 7.764 \text{ kN}$$

Yläreunan siirtymä
tasonsuunnassa:

$$u := \frac{F_{0,7,s}}{C_{0,7}} = 6.3 \text{ mm}$$

Siirtymäraja:
(RIL 205-1-2017, s. 172)

$$u_{raja} := \frac{h_{elementti}}{500} = 6.3 \text{ mm}$$

$$\frac{u}{u_{raja}} = 100\%$$

Kapasiteetti leikkauksen
suhteen:

$$F_{0,7} := 81.9 \text{ kN}$$

Leikkausvuo:

$$\tau := 1.5 \cdot \frac{F_{0,7}}{h_f \cdot l_{0,7}} = 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkaukskapasiteetti tason
suuntaiselle kuormalle:

$$\frac{\tau}{f_{vk}} = 100\%$$

Seinä 600 mm:

Elementin leveys:

$$l_{0,6} := 600 \text{ mm}$$

$$k := \frac{l_{0,6} - b_c}{2} = 274.5 \text{ mm}$$

LVL pinta-ala:

$$A_{levy} := l_{0,6} \cdot h_f = 23400 \text{ mm}^2$$

$$I_{levy} := \frac{h_f \cdot l_{0,6}^3}{12} = 702000000 \text{ mm}^4$$

Taivutusjäykkyys:

$$EI_{ripa,600} := E_{LVL} \cdot I_{levy} + E_{KertoS} \cdot (I_{ranka} + A_{ranka} \cdot k^2) = 11.84 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$$

kokonaisjäykkyys
tasonsuunnassa:

$$C_{0,6} := \frac{1}{\frac{h_{elementti}^3}{3 \cdot EI_{ripa,600}} + \frac{6 \cdot h_{elementti}}{5 \cdot G_{LVL} \cdot A_{levy}}} = 870.1 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Kapasiteetti siirtymän
suhteen:

$$F_{0,6,s} := 5.481 \text{ kN}$$

Yläreunan siirtymä
tasonsuunnassa:

$$u := \frac{F_{0,6,s}}{C_{0,6}} = 6.3 \text{ mm}$$

Siirtymäraja:
(RIL 205-1-2017, s. 172)

$$u_{raja} := \frac{h_{elementti}}{500} = 6.3 \text{ mm}$$

$$\frac{u}{u_{raja}} = 99.99\%$$

Kapasiteetti leikkauksen
suhteen:

$$F_{0,6} := 70.2 \text{ kN}$$

Leikkausvuo:

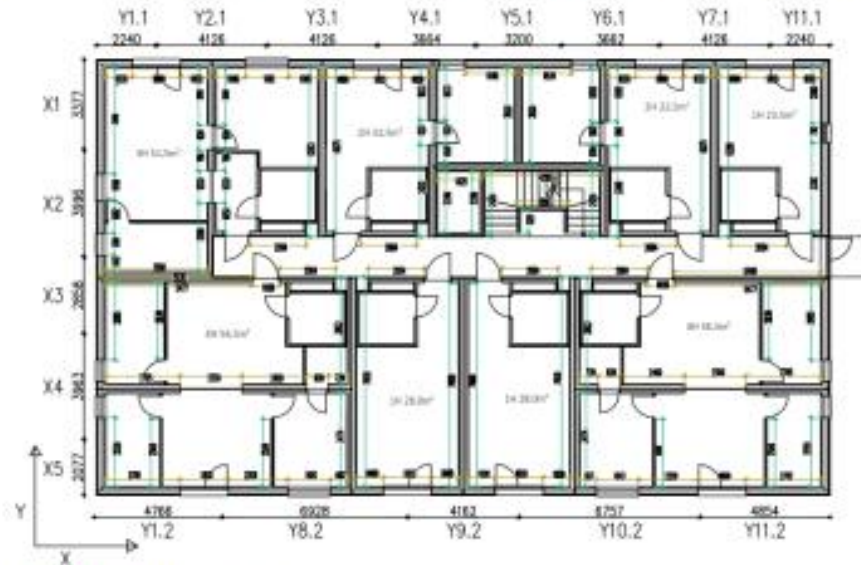
$$\tau := 1.5 \cdot \frac{F_{0,6}}{h_f \cdot l_{0,6}} = 4.5 \text{ MPa}$$

Leikkaukskapasiteetti tason
suuntaiselle kuormalle:

$$\frac{\tau}{f_{vk}} = 100\%$$

Jäykistys: 1.krs

(Laskennassa ei ole huomioitu portaikon eikä hissikuilun seinä.)



Huomioidaan kuormien vähennys
käyttörajoitilassa kertoimella:

$$\beta := \frac{1}{1.5} = 0.67$$

X-suunta:

$x_1 := 3377 \text{ mm}$ Kuormitus: $F_{x1} := x_1 \cdot W_{1,p} + w_{lisa} \cdot 7 \cdot 8 = 166.33 \text{ kN}$

Siirtymä:

$$v_{x1} := \frac{F_{x1} \cdot \beta}{2 \cdot C_{1,2} + 2 \cdot C_{0,6} + 10 \cdot C_{1,0}} = 2.77 \text{ mm}$$

$$ka_{vx1} := \frac{v_{x1}}{u_{rajo}} = 43.9\%$$

Leikkaus:

$$ka_{vx1} := \frac{F_{x1}}{2 \cdot F_{1,2} + 2 \cdot F_{0,6} + 10 \cdot F_{1,0}} = 10.5\%$$

$x_2 := 3996 \text{ mm}$ Kuormitus: $F_{x2} := x_2 \cdot W_{1,p} + w_{lisa} \cdot 6 \cdot 8 = 187.58 \text{ kN}$

Siirtymä:

$$v_{x2} := \frac{F_{x2} \cdot \beta}{9 \cdot C_{1,2} + 4 \cdot C_{0,8}} = 2.84 \text{ mm}$$

$$ka_{vx2} := \frac{v_{x2}}{u_{rajo}} = 45.2\%$$

Leikkaus:

$$ka_{vx2} := \frac{F_{x2}}{9 \cdot F_{1,2} + 4 \cdot F_{0,8}} = 11.5\%$$

$x_3 := 2858 \text{ mm}$ Kuormitus: $F_{x3} := x_3 \cdot W_{1,p} + w_{lisa} \cdot 5 \cdot 8 = 137.03 \text{ kN}$

Siirtymä:

$$v_{x3} := \frac{F_{x3} \cdot \beta}{15 \cdot C_{1,2} + 6 \cdot C_{0,8}} = 1.27 \text{ mm}$$

$$ka_{vx3} := \frac{v_{x3}}{u_{rajo}} = 20.1\%$$

Leikkaus:

$$ka_{vx3} := \frac{F_{x3}}{15 \cdot F_{1,2} + 6 \cdot F_{0,8}} = 5.1\%$$

$$x_4 := 3963 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{x4} := x_4 \cdot W_{1,p} + w_{lisa} \cdot 4 \cdot 8 = 178.13 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{x4} := \frac{F_{x4} \cdot \beta}{16 \cdot C_{1,2} + 4 \cdot C_{0,7}} = 1.66 \text{ mm}$$

$$ka_{v_{x4}} := \frac{v_{x4}}{u_{raja}} = 26.4\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{x4}} := \frac{F_{x4}}{16 \cdot F_{1,2} + 4 \cdot F_{0,7}} = 6.9\%$$

$$x_5 := 2077 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{x5} := x_5 \cdot W_{1,p} + w_{lisa} \cdot 4 \cdot 8 = 101.07 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{x5} := \frac{F_{x5} \cdot \beta}{6 \cdot C_{1,2} + 6 \cdot C_{1,0} + 2 \cdot C_{0,6}} = 1.51 \text{ mm}$$

$$ka_{v_{x5}} := \frac{v_{x5}}{u_{raja}} = 23.9\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{x5}} := \frac{F_{x5}}{6 \cdot F_{1,2} + 6 \cdot F_{1,0} + 2 \cdot F_{0,6}} = 6\%$$

Y-suunta:

$$\text{Tuuli ylhäältä:} \quad z_1 := D_{pros} = 71.1\%$$

$$\text{Tuuli alhaalta:} \quad z_2 := E_{pros} = 28.9\%$$

(Painekertoimien avulla saadut painekertoimet prosentuaalisesti.)

$$y_{1,1} := 2240 \text{ mm} \quad y_{1,2} := 4766 \text{ mm}$$

$$\text{Kuormitus:} \quad F_{y1} := y_{1,1} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + y_{1,2} \cdot W_{1,5} \cdot z_2 + w_{lisa} \cdot 3 \cdot 8 = 157.43 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y1} := \frac{F_{y1} \cdot \beta}{8 \cdot C_{1,2} + C_{0,7}} = 3.05 \text{ mm}$$

$$ka_{v_{y1}} := \frac{v_{y1}}{u_{raja}} = 48.4\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y1}} := \frac{F_{y1}}{8 \cdot F_{1,2} + F_{0,7}} = 13.1\%$$

$$y_{2,1} := 4126 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{y2} := y_{2,1} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + w_{lisa} \cdot 2 \cdot 8 = 151.64 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y2} := \frac{F_{y2} \cdot \beta}{4 \cdot C_{1,2} + C_{1,0} + 4 \cdot C_{0,8}} = 3.86 \text{ mm}$$

$$ka_{v_{y2}} := \frac{v_{y2}}{u_{raja}} = 61.2\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y2}} := \frac{F_{y2}}{4 \cdot F_{1,2} + F_{1,0} + 4 \cdot F_{0,8}} = 14.4\%$$

$$y_{3,1} := 4126 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{y3} := y_{3,1} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + w_{\text{lisa}} \cdot 2 \cdot 8 = 151.64 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y3} := \frac{F_{y3} \cdot \beta}{10 \cdot C_{1,2}} = 2.44 \text{ mm}$$

$$ka_{y3} := \frac{v_{y3}}{u_{\text{raja}}} = 38.7\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y3}} := \frac{F_{y3}}{10 \cdot F_{1,2}} = 10.8\%$$

$$y_{4,1} := 3664 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{y4} := y_{4,1} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + w_{\text{lisa}} \cdot 2 \cdot 8 = 135.57 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y4} := \frac{F_{y4} \cdot \beta}{4 \cdot C_{1,2} + C_{1,0} + 3 \cdot C_{0,7}} = 3.88 \text{ mm}$$

$$ka_{y4} := \frac{v_{y4}}{u_{\text{raja}}} = 61.6\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y4}} := \frac{F_{y4}}{4 \cdot F_{1,2} + F_{1,0} + 3 \cdot F_{0,7}} = 14.7\%$$

$$y_{5,1} := 3200 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{y5} := y_{5,1} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + w_{\text{lisa}} \cdot 2 \cdot 8 = 119.42 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y5} := \frac{F_{y5} \cdot \beta}{4 \cdot C_{1,2} + 2 \cdot C_{1,0}} = 3.52 \text{ mm}$$

$$ka_{y5} := \frac{v_{y5}}{u_{\text{raja}}} = 55.9\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y5}} := \frac{F_{y5}}{4 \cdot F_{1,2} + 2 \cdot F_{1,0}} = 15\%$$

$$y_{6,1} := 3662 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{y6} := y_{6,1} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + w_{\text{lisa}} \cdot 2 \cdot 8 = 135.5 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y6} := \frac{F_{y6} \cdot \beta}{4 \cdot C_{1,2} + C_{1,0} + 3 \cdot C_{0,7}} = 3.88 \text{ mm}$$

$$ka_{y6} := \frac{v_{y6}}{u_{\text{raja}}} = 61.5\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y6}} := \frac{F_{y6}}{4 \cdot F_{1,2} + F_{1,0} + 3 \cdot F_{0,7}} = 14.7\%$$

$$y_{7,1} := 4126 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{y7} := y_{7,1} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + w_{\text{lisa}} \cdot 2 \cdot 8 = 151.64 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y7} := \frac{F_{y7} \cdot \beta}{10 \cdot C_{1,2}} = 2.44 \text{ mm}$$

$$ka_{y7} := \frac{v_{y7}}{u_{\text{raja}}} = 38.7\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y7}} := \frac{F_{y7}}{10 \cdot F_{1,2}} = 10.8\%$$

$$y_{8,2} := 6928 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{y8} := y_{8,2} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + w_{lisa} \cdot 3 \cdot 8 = 253.17 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y8} := \frac{F_{y8}}{12 \cdot C_{1,2} + C_{0,6}} = 5 \text{ mm}$$

$$ka_{y8} := \frac{v_{y8}}{u_{raja}} = 79.3\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y8}} := \frac{F_{y8}}{12 \cdot F_{1,2} + F_{0,6}} = 14.4\%$$

$$y_{9,2} := 4162 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{y9} := y_{9,2} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + w_{lisa} \cdot 2 \cdot 8 = 152.89 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y9} := \frac{F_{y9} \cdot \beta}{12 \cdot C_{1,2}} = 2.05 \text{ mm}$$

$$ka_{y9} := \frac{v_{y9}}{u_{raja}} = 32.5\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y9}} := \frac{F_{y9}}{12 \cdot F_{1,2}} = 9.1\%$$

$$y_{10,2} := 6757 \text{ mm} \quad \text{Kuormitus:} \quad F_{y10} := y_{10,2} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + w_{lisa} \cdot 3 \cdot 8 = 247.22 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y10} := \frac{F_{y10} \cdot \beta}{12 \cdot C_{1,2}} = 3.31 \text{ mm}$$

$$ka_{y10} := \frac{v_{y10}}{u_{raja}} = 52.5\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y10}} := \frac{F_{y10}}{12 \cdot F_{1,2}} = 14.7\%$$

$$y_{11,1} := 2240 \text{ mm} \quad y_{11,2} := 4854 \text{ mm}$$

$$\text{Kuormitus:} \quad F_{y11} := y_{11,1} \cdot W_{1,5} \cdot z_1 + y_{11,2} \cdot W_{1,5} \cdot z_2 + w_{lisa} \cdot 3 \cdot 8 = 158.67 \text{ kN}$$

$$\text{Siirtymä:} \quad v_{y11} := \frac{F_{y11} \cdot \beta}{7 \cdot C_{1,2} + C_{1,0} + C_{0,8}} = 3.14 \text{ mm}$$

$$ka_{y11} := \frac{v_{y11}}{u_{raja}} = 49.8\%$$

$$\text{Leikkaus:} \quad ka_{v_{y11}} := \frac{F_{y11}}{7 \cdot F_{1,2} + F_{1,0} + F_{0,8}} = 13.3\%$$

Ankkurointi + puristus:

$$y_{9,2} := 4162 \text{ mm}$$

Nopeuspaine käyrä:

$$\phi_1 := 1.5$$

$$q_k := 0.83 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot z_1 = 0.59 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Rakennuksen korkeus:

$$h = 27.95 \text{ m}$$

Tuulikuorman ala:

$$A_{\text{ref,sivu}} := h \cdot y_{9,2} = 116.33 \text{ m}^2$$

Tuulikuorma:

$$R_{w,\text{sivu}} := A_{\text{ref,sivu}} \cdot q_k = 68.66 \text{ kN}$$

Tuulikuorman mitoitusarvo:

$$R_{w,\text{sivu,d}} := \phi_1 \cdot R_{w,\text{sivu}} = 102.99 \text{ kN}$$

Korkeuden resultantti:

$$h_{\text{res}} := h \cdot 0.6 = 16.77 \text{ m}$$

Tilaelementin mitat:

$$d_1 := 8.2 \text{ m} \quad b_1 := 4.1 \text{ m}$$

Pitkän sivun pystykuorma:

$$G_{k,\text{pitkä}} := F_{1\text{krs},\text{pitkä}} = 73.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Lyhyen sivun pystykuorma:

$$G_{k,\text{lyhyt}} := F_{1\text{krs},\text{lyhyt}} = 18.79 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kuorma poikittain G1:

Pitkälle sivulle:

$$G_{1,p} := G_{k,\text{lyhyt}} \cdot \frac{b_1}{2} = 38.51 \text{ kN}$$

Kuorma pitkittäin G2:

$$G_{2,p} := G_{k,\text{pitkä}} \cdot d_1 = 603.1 \text{ kN}$$

Vaakakuormitus:

$$F_{y^g} := \frac{R_{w,\text{sivu,d}} + w_{\text{lisä}} \cdot 2 \cdot 8}{2} = 55.55 \text{ kN}$$

Ankkurointivoima tukipisteessä:

$$F_{y^g,T} := \frac{-F_{y^g} \cdot h_{\text{res}} + G_{1,p} \cdot d_1 + G_{2,p} \cdot \frac{d_1}{2}}{d_1} = 226.46 \text{ kN} \quad (\text{Puristus})$$

Puristusvoima tukipisteessä:

$$F_{y^g,C} := 2 \cdot G_{1,p} + G_{2,p} - F_{y^g,T} = 453.66 \text{ kN} \quad (\text{Puristus})$$

Tarkastus:

$$t := -F_{y^g,T} - F_{y^g,C} + 2 \cdot G_{1,p} + G_{2,p} = 0 \text{ kN} = 0 \text{ kN} = \text{OK!}$$

1/8 moduulin omapainosta:

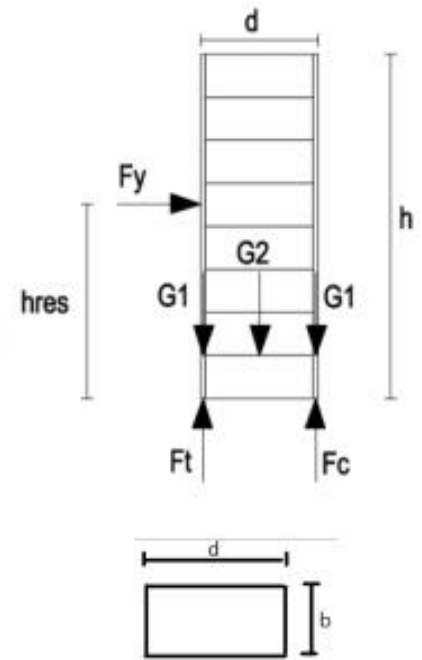
$$G_{\text{tot}} := \frac{2 \cdot (2 \cdot G_{1,p} + G_{2,p})}{8} = 170.03 \text{ kN}$$

Ankkurointivoimaa pienentävä arvo:

$$F := \frac{(-F_{y^g} \cdot h_{\text{res}})}{d_1} = -113.6 \text{ kN}$$

Ankkurointivoima tukipisteessä, kun moduulin omapainosta käytetään 1/8:

$$F_{y^g,T} := F + G_{\text{tot}} = 56.43 \text{ kN} \quad (\text{Puristus})$$



Kuormitustesti: (Testivaakakuorma, jolla ankkurointitarvetta seinässä.
1/4 moduulin painosta)

Vaakakuormitus testi: $F_y := 170 \text{ kN}$

Ankkurointivoima tukipisteessä: $F_{y,T} := \frac{-F_y \cdot h_{res} + G_{1,p} \cdot d_1 + G_{2,p} \cdot \frac{d_1}{2}}{d_1} = -7.61 \text{ kN}$ (Veto)

Puristusvoima tukipisteessä: $F_{y,C} := 2 \cdot G_{1,p} + G_{2,p} - F_{y,T} = 687.73 \text{ kN}$ (Puristus)

1/4 moduulin omapainosta: $G_{tot} := \frac{2 \cdot (2 \cdot G_{1,p} + G_{2,p})}{4} = 340.06 \text{ kN}$

Ankkurointivoimaa pienentävä arvo: $F := \frac{(-F_y \cdot h_{res})}{d_1} = -347.67 \text{ kN}$

Ankkurointivoima tukipisteessä: $F_{y,t} := F + G_{tot} = -7.61 \text{ kN}$ (Veto)

Tarkastus: $F_{y,T} = F_{y,t}$

Kuormitustesti: (Testivaakakuorma, jolla ankkurointitarvetta seinässä.
1/8 moduulin painosta)

Vaakakuormitus testi: $F_y := 85 \text{ kN}$

1/8 moduulin omapainosta: $G_{tot} := \frac{2 \cdot (2 \cdot G_{1,p} + G_{2,p})}{8} = 170.03 \text{ kN}$

Ankkurointivoimaa pienentävä arvo: $F := \frac{(-F_y \cdot h_{res})}{d_1} = -173.84 \text{ kN}$

Ankkurointivoima tukipisteessä: $F_{y,t} := F + G_{tot} = -3.81 \text{ kN}$

Laskennan perusteella siis moduulin omapainosta käytetään 1/4 mutta normaalitilanteessa sallittua on käyttää maksimissaan 1/8 omastapainosta. Tämän takia vertailutuloksena on tilanne, jossa omastapainosta hyödynnetään 1/8.

LIITE 4: LVL-LEVYN RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMIVUUS

LVL-levyn rakennusfysikaalinen toimivuus

Rakennekerrokset:

- Pintakäsittely
- Palokipsilevytyks 2 x 15 mm
- LVL-levy 21 mm
- Rivat 51 x 102 mm + mineraalivilla lämmöneriste
- Tuulensuojakerros (9 mm kipsikartonkilevy + 30 mm mineraalivillalevy)
- Koolaus
- Panelointi

LVL-levyn vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron suhteen syysuuntaan vastaan kohtisuorasti: (RIL 255-1-2014)

$$\delta_{v,LVL} := 0.5 \cdot 10^{-6} \quad \frac{m^2}{s}$$

Yleinen kaasuvakio: $R := 8314.3 \quad \frac{J}{kg \cdot K}$

Veden molekyylimassa: $M_w := 18.02 \quad \frac{kg}{kmol}$

Lämpötila: $t := 0 \quad ^\circ C$

Veden jäätymispiste: $T := 273.15 \quad K$

LVL-levyn vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron suhteen syysuuntaan vastaan kohtisuorasti: (RIL 255-1-2014)

$$\delta_{v,LVL} := 0.5 \cdot 10^{-6} \quad \frac{m^2}{s}$$

LVL-levyn Vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron suhteen: (RIL 255-1-2014)

$$\delta_{p,LVL} := \frac{\delta_{v,LVL}}{\left(\frac{R}{M_w}\right) \cdot (T + t)} = 3.97 \cdot 10^{-12} \quad \frac{kg}{msPa}$$

Rakenne paksuus: $h_1 := 0.021 \quad mm$

LVL-levyn vesihöyrynvastus vesihöyryn osapaineen suhteen:

$$Z_{p,LVL} := \frac{h_1}{\delta_{p,LVL}} = 5.29 \cdot 10^9 \quad m^2 \cdot s \cdot \frac{Pa}{kg}$$

Tampereen teknillisen yliopiston FRAME-tutkimusprojektin vaadittu sisäpinnan vesihöyrynvastus vesihöyrynosapaineen suhteen, kun tuulensuojana on käytössä 9 mm kipsikartonkilevyä ja 30 mm mineraalivillalevyä : (Vinha 2013, s. 173)

$$Z_{p,I} := 2.80 \cdot 10^9 \quad m^2 \cdot s \cdot \frac{Pa}{kg}$$

Tarkastus: $Z_{p,LVL} > Z_{p,I} = 1 \quad OK!$

LVL-levy ja tuulensuojakerros toimivat toistensa kanssa samassa rakenteessa.