



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**FEM-laskennan hyödyntäminen puisen
tilaelementtikerrostalon stabiliteetin laskennassa**

Jani Tervonen

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Kesäkuu 2022

TIIVISTELMÄ

FEM-laskennan hyödyntäminen puisen tilaelementtikerrostalon stabiileetin laskennassa

Jani Tervonen

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2022, 80 s. + 4 liitettä

Työn ohjaaja yliopistolla: Antti Niemi

Työn tarkoituksena ja tavoitteena on tarkastella 8-kerroksisen puisen tilaelementtikerrostalon rakenteellista toimivuutta sekä jäykistysmitoitusta FEM-laskentaa käyttäen. Työssä on lähdetty etsimään ratkaisua ongelmaan, että onko mahdollista rakentaa korkea puurankarunkoista kerrostaloa Lehto Group Oyj:n puutilaelementeillä, jossa jäykistävinä rakenteina toimivat kipsilevyt.

Tutkimusmenetelmänä työssä on käytetty FEM-laskentaa ja ohjelmistona Strusoftin FEM-design -laskentaohjelmistoa. Lähtötiedot, jotka FEM-ohjelmaan syötetään, on laskettu Eurokoodin mitoitusperusteiden mukaisesti. FEM-laskentamallin tuloksia tarkastellaan muun muassa Finnwood -laskentaohjelman avulla.

Työssä suurimmaksi sallituksi vaakasiirtymäksi on määritetty $H/300$, jonka täytyy toteutua käyttörajatilamitoituksessa. FEM-laskentamallin analysoinnin perusteella maksimivaakasiirtymä rakennuksessa ei ylity sallittua arvoa.

Murtorajatilassa tilaelementin seinärakenteisiin syntyvät puristavat viivakuormat kasvavat hallitsemattoman suuriksi. Myös nurkkapilareihin kohdistuvat puristuskuormat ylittävä liimapuupilarin kapasiteetin. Vetopuolen kuormat pysyvät puolestaan maltillisina.

Asiasanat: levyjäykistys, tilaelementti, puukerrostalo, puu, FEM

ABSTRACT

Utilizing FEM for calculating stability for wooden modular element apartment building

Jani Tervonen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2022, 80 p. + 4 Appendixes

Supervisor at the university: Antti Niemi

The purpose and goal of this thesis is to examine the structural functionality and stiffening calculations of an 8-storey wooden modular element apartment building by using FEM calculations. In this thesis it has been aimed to find a solution to the problem of whether it is possible to build a high-rise apartment building by using Lehto Group Oyj's timber modular element concept in which gypsum boards act as stiffening structures.

The research method of this thesis is FEM calculation, and the software is Strusoft's FEM-Design. The input data which are entered to the FEM program have been calculated in accordance with the Eurocode criteria. The results of the FEM model are examined using the Finnwood calculation program.

The maximum permissible horizontal displacement in the work is defined as $H/300$, which must be implemented in the dimensioning of the serviceability limit state (SLS). Based on the analysis of the FEM calculation model, the maximum horizontal displacement does not exceed the limit.

In the ultimate limit state, the compression line loads for timber walls are too much. That is also the case for compression point loads to glulam columns in the corners of the modular elements. Tensions for glulam columns on the other hand are not too much and are controllable.

Keywords: plate stiffening, modular element, timber apartment building, timber, FEM

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty yhteistyössä Insinööritoimisto Mäkeläisen sekä Lehto Groyp Oyj:n kanssa. Työn toteutuksen mahdollisuudesta kuuluu kiitos molemmille yrityksille. Aiheena tämä työ on ajankohtainen koko rakennusalalla, ja etenkin Lehdon sisällä, ja uskon, että tästä työstä on suurta hyötyä sekä Insinööritoimisto Mäkeläiselle että Lehto Group Oyj:lle.

Erityiskiitokset Lehdon puutilaelementtikonseptin tutuksi tuomiselle ja työn ohjaamiseen aluille kuuluu Jouko Parviaiselle. FEM-design -ohjelmistoon tutustumisesta sekä mallin luomisesta ja tulkitsemisesta kuuluu erityiskiitokset Lauri Kannasmaalle. Etenkin työn loppuvaiheen ja maaliin viemisestä erityiskiitokset kuuluvat Jarkko Luntalle.

Haluan myös kiittää Oulun Yliopistoa ja Antti Niemeä työn ohjaamisesta ja sen pitämistä oikeilla raiteilla tekovaiheessa.

Oulu, 15.06.2022

Jani Tervonen

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

1 Johdanto	8
1.1 Aiheen esittely ja menetelmät	8
1.2 Tavoitteet.....	8
1.3 Rajaukset	9
2 Stabiilitien laskenta tilaelementtikerrostaossa.....	10
2.1 Jäykistävät rakenteet	10
2.1.1 Kipsilevyjäykisteiset rankaseinät.....	11
2.1.2 Jäykistävät lattiarakenteet	12
2.2 Tyypikerrostaalon vaakasiirtymät.....	14
2.2.1 Taivutusmuodonmuutos	15
2.2.2 Leikkausmuodonmuutossiirtymä.....	16
2.2.3 Liitossiirtymät.....	17
2.2.4 Kiikan merkitys liitossiirtymissä	20
2.3 Murtorajatilan tarkastelu	21
2.3.1 Omapainon vaikutus puurakenteisissa rakennuksissa	22
2.3.2 Vaakavoimien aiheuttamat lisärasitukset kantavalle rungolle.....	23
3 Rakennusliikkeen tyypipuukerrostaalon rakenne- ja jäykistysjärjestelmä	24
3.1 Tyypikerrostaalon rakennejärjestelmä	24
3.1.1 Tilaelementin rakennejärjestelmä	25
3.2 Materiaalit	25
3.2.1 Sahatavara	26
3.2.2 Liimapuu.....	26
3.2.3 Viilupuu	27
3.3 Rakennetyypit.....	27
3.3.1 Seinärakenteet	28
3.3.2 Lattiarakenteet	30
3.4 Jäykistysjärjestelmä.....	34
3.4.1 Liimapuupilarit	35
3.4.2 Kertopuupalkit	36
3.4.3 Huoneiston sisäinen kevyt kipsilevyseinä	36

3.5 Liitokset.....	38
3.5.1 Tilaelementin sisäiset liitokset.....	38
3.5.2 Tilaelementtien väliset liitokset.....	41
4 Jäykistävät rakenteet FEM-mallissa.....	42
4.1 Rakenneosien laskelmat ja ominaisuudet.....	42
4.1.1 Sahatavara C24	42
4.1.2 Kipsilevytytys	42
4.2 Rakenneosien soveltaminen FEM- malliin	43
4.2.1 Seinärakenteiden ominaisuudet FEM- laskentamallissa	44
4.2.2 Lattiarakenteiden ominaisuudet FEM- laskentamallissa	46
5 Tyyppipuukerrostalon FEM- laskentamalli	47
5.1 Pohjapiirustus	48
5.2 Rakenteet ja liitokset	49
5.2.1 Seinärakenteet.....	50
5.2.2 Lattiarakenteet	51
5.2.3 Nurkkapilarit.....	52
5.2.4 Kehäpalkit.....	52
5.3 Perustukset	52
6 Tyyppipuukerrostalon kuormat.....	53
6.1 Aikaluokat ja käyttöluokat	53
6.2 Kuormitustapaukset.....	53
6.2.1 Omapaino.....	54
6.2.2 Hyötykuormat	55
6.2.3 Lumikuorma	56
6.2.4 Tuulikuorma	57
6.2.5 Lisävaakavoimat	61
6.3 Kuormitusyhdistelmät	62
6.3.1 Murtorajatila	62
6.3.2 Käyttörajatila	63
7 Tulosten tarkastelu	64
7.1 FEM- laskentamallin tulokset käyttörajatilassa	64
7.2 FEM- laskentamallin tulokset murtorajatilassa.....	67
7.2.1 Vaakasuuntaiset leikkausvoimat.....	67
7.2.2 Seinärakenteiden puristavat viivakuormat.....	67
7.2.3 Nurkkapilareihin syntyvät kuormat	69
8 Johtopäätökset ja suositukset	72
8.1 Tulosten luotettavuuden arviointi.....	72

8.2 Ulkopuolelle rajattujen muuttujien merkitys.....	72
8.3 Suositukset	73
8.4 FEM-laskentamallin hyödyntäminen ja käsittely.....	75
9 Yhteenveto	77
Lähdeluettelo	79
Liitteet:	

1 JOHDANTO

1.1 Aiheen esittely ja menetelmät

Tämän työn aiheena on FEM-laskennan hyödyntäminen puisen tilaelementtikerrostalon jäykkyyden ja stabiliteetin laskemisessa. Tarkastelun kohteena on 8-kerroksinen tilaelementtikerrostalo. FEM-laskentamalliin lisättävät kuormat määritetään analyttisesti. Tämän lisäksi seinä- ja lattiarakenteille määritetään FEM-laskentamalliin todellisten rakenteiden kanssa vastaavalla tavalla käyttäytyvät kuorielementit. Työssä tutkittavan puisen tilaelementtikerrostalon rakennejärjestelmän seinärakenteet koostuvat sahatavarasta valmistetusta rankarungosta ja kipsilevyjäykistyksestä. FEM-analyysi suoritetaan käyttämällä Strusoftin FEM-Design laskentaohjelmaa. FEM-laskentamallin analysoinnin tuloksien avulla saadaan Metsä Woodin FinnWood -laskentaohjelmalla määritettyä tarvittavien pisteiden ja kohtien käyttöasteita, ja näin ollen selvitettyä murtorajatilamitoituksen suhteen, kuinka rakennus kestää.

Puisten tilaelementtikerrostalojen rakentaminen aina neljään asuinkerrokseen asti on tällä hetkellä Lehdon tilaelementeillä helposti toteutettavaa, mutta 8-kerroksisen kerrostalon rakentaminen tuo omat haasteensa. Tämän diplomityön tarkoituksena on saada selvyys, onko korkean kerrostalon rakentaminen ylipäättään mahdollista tai kannattavaa nykyisillä tilaelementtien rakenneratkaisuilla sekä löytää ratkaisuja mahdolliselle toteutukselle.

FEM-laskentamallin ja sen tulosten tarkastelussa pääpaino on tuulikuorman vaikutuksissa. Käyttörajan mitoituksessa rajoittavana tekijänä on tuulikuorman aiheuttamat vaakasiirtymät. Murtorajan tarkastelussa keskiössä ovat etenkin tuulesta johtuvat noste- ja puristusvoimat.

1.2 Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on pyrkiä määrittämään jäykistävien rakenteiden laskentaperiaatteet, jotta nykyistä tilaelementtirakaisua hyödyntämällä saadaan rakennettua 8-kerroksinen tilaelementtikerrostalo. Tämän lisäksi pyrkimyksenä on samalla luoda FEM-laskentamallin ja ohjeet sen luomiseen, joita tulevaisuudessa voidaan hyödyntää Lehto Groupin puisten tilaelementtirakennusprojektien stabiliteetin ja jäykkyyden laskemisessa.

1.3 Rajaukset

Työ rajataan niin, että tarkastelun kohteeksi otetaan Lehdon nykyiset tilaelementtien rakenneratkaisut, ja tarkastellaan, että onko kyseisillä rakenneratkaisuilla valmistetuilla tilaelementeillä mahdollista rakentaa toimivaa 8-kerroksista puukerrostaloa. Työssä tarkasteltavat tilaelementit valmistetaan siten, että lattiarakenne liitetään tilaelementin ulkoseinien kylkeen. Laskennassa kitkaa ei huomioida. Tilaelementit ovat rankarakenteisia ja levyjäykisteisiä. Tilaelementtikerrostalon FEM-laskentamalli luodaan käyttäen StruSoftin FEM-design -ohjelmistoa. Työssä läpikäytävät ohjeet ja toimintatavat esitetään sillä periaatteella, että niiden pohjalta vastaavanlaisen laskentamallin luominen ja tarkastelu onnistuu myös muilla vastaavilla FEM-laskentaohjelmistoilla.

Diplomityössä sovelletaan Eurokoodin mukaisia suunnitteluperusteita, sekä tämän lisäksi apuna käytetään kansallisia ohjeita. Työssä sovellettavat ja käytettävät suunnitteluohjeet ovat EN 1995-1-1 Eurokoodi sekä kansalliset ohjeet, joissa esitetään perusteita sekä työssä tarkastelun kohteena olevia materiaaleja ja niiden ominaisuuksia.

2 STABILITEETIN LASKENTA TILAELEMENTTIKERROSTALOSSA

Tässä kappaleessa esitetään työn keskeisimmässä roolissa olevat laskentaan liittyvät periaatteet. Puisten rankarunkoisten, kipsilevyjäykisteisten tilaelementtikerrostalon suurimmat haasteet ovat käyttörajatilassa vaakakuormista aiheutuvat vaakasiirtymät ja niiden hallinta. Murtorajatilassa puolestaan haasteita aiheuttaa noste- ja puristusvoimien aiheuttamat kuormitukset puurakenteisiin.

Vaakakuormat koostuvat ulkoisista vaakakuormista ja pystykuormien aiheuttamista vaakakuormista. (VTT 2006) Niitä vastaan jäykistämistä tässä työssä tarkastellaan kipsilevyjäykisteisten rankaseinien avulla. Mitä korkeammalle ja mitä runkosyvyydeltään kapeampaa rakennusta rakennetaan, sitä haasteellisempaa rakennuksen jäykistäminen on. Yli 2-kerroksisten rakennusten kohdalla vaakakuormat aiheuttavat huomattavasti suurempia kuormituksia jäykistäviin rakenteisiin ja niiden välisiin liitoksiin.

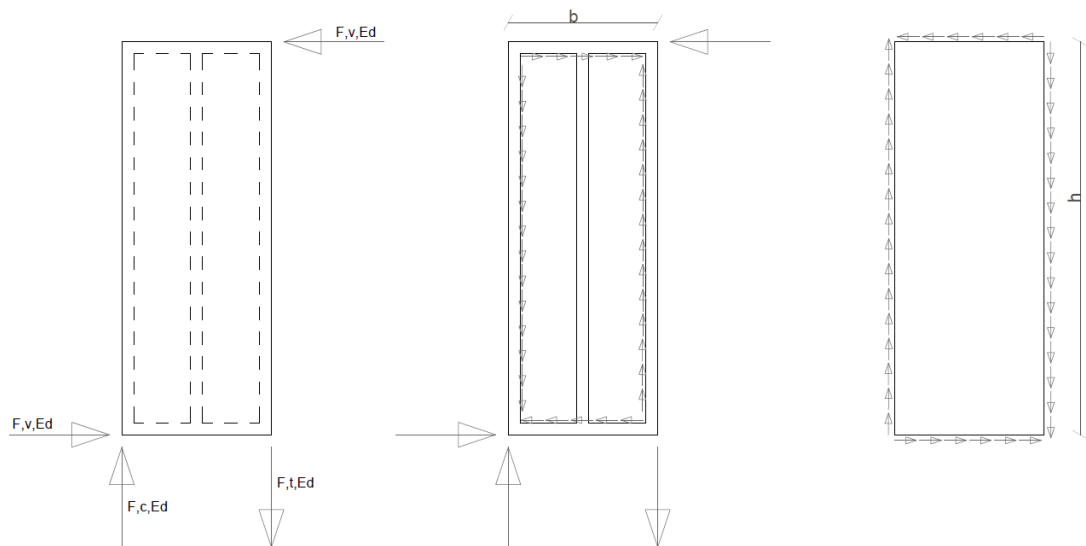
Oman haasteensa puukerrostalojen rakentamiseen aiheuttaa myös akustiikka. Puun materiaaliominaisuuksien sekä mekaanisten puikkoliittimien käyttämisen takia puurakenteet ovat joustavia. Kerrosten sekä huoneistojen välillä rakenteita joudutaan katkaisemaan ääni- ja värähtelyteknisistä syistä, jolloin koko rakennuksen alueella olevia vaakarakenteita ei voida toteuttaa. (Puuinfo 2020) Ääni- ja värähtelyteknisistä syistä kerrosten väliin täytyy asentaa kumibitumikermi tai sylomer-kaista, mikä aiheuttaa kantavien pystyrakenteiden toteuttamiseen haasteita, kerroksesta toiseen jatkuva pilari ei ole enää akustisesti toimiva.

2.1 Jäykistävät rakenteet

Jäykistävissä rakenteissa liitoksella on suuri merkitys jäykistämisen kannalta. Liitokset tilaelementeissä tai kahden tilaelementin välillä eivät ole täydellisen jäykkä, mikä tarkoittaa sitä, että mekaaniset liitokset voivat siirtää kuormaa vain niiden jäykkyyden verran. Jäykistävien rakenteiden toiminnassa on tärkeää ymmärtää, että rakenne liitoksineen on niin jäykkä kuin sen heikoin kohta. Pienilläkin muutoksilla jäykkyyden suhteen saadaan muutettua kuormien jakautumista. (Lehtonen 2022)

2.1.1 Kipsilevyjäykisteiset rankaseinät

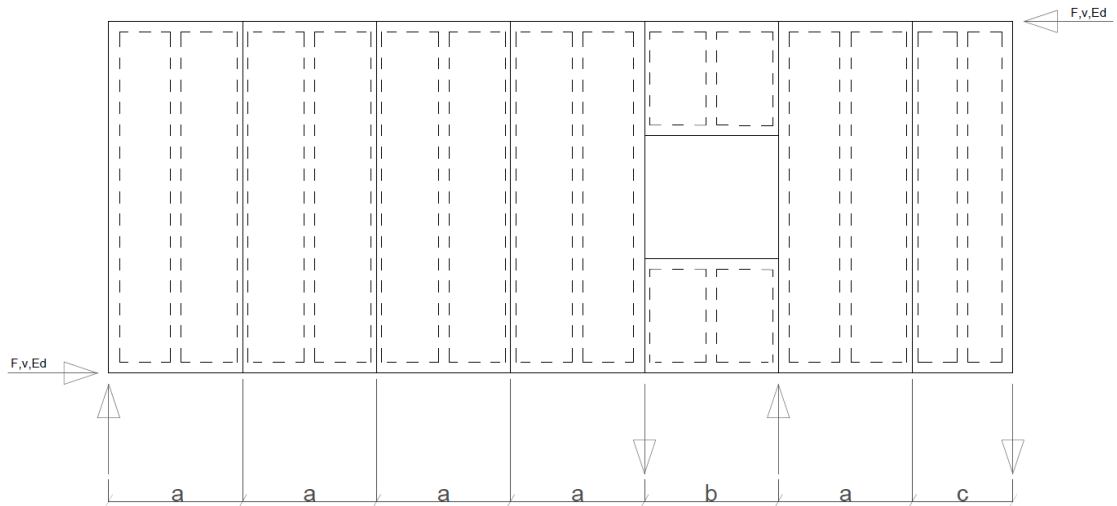
Jäykistysseinien täytyy kestää vaaka- ja pystysuuntaiset kuormat, ja niiden tulee olla riittävän hyvin tuettu liukumista ja kaatumista vastaan. Jäykistävien seinien tarkoituksena on estää ulkoisten voimien vaikutusta rakennukseen, ja pääsääntöisesti ne estävät tai vähentävät tuulikuorman aiheuttamaa muodonmuutosta rakennuksessa. Alla olevassa kuvassa 1 kuvataan, kuinka seinärakennetta kuormittava voima kuormittaa seinärakenteen eri rakenneosia. (RIL 205-1-2017)



Kuva 1. Seinälohkoon, puurunkoon ja levyyn vaikuttavat voimat. (mukaillen RIL 205-1-2017)

Levyjäykisteisessä seinässä seinän yläpintaan vaikuttavan vaakavoiman F_v aiheutuvan leikkausvoiman vastaanottaa levytys, joka tässä tapauksessa on materiaaliltaan kipsilevyä. Vaakavoimasta aiheutuu myös momenttia, jonka vastaanottaa jäykisteseinän päädyissä olevat rangat. (Puuinfo 2020)

Kuvassa 2 kuvataan jäykistävän seinärakenteen eri osatyyppejä. Sekä normaalilevyiset että kapeat seinälohkot, jotka ovat tämän työn tapauksessa katkaistuja kipsilevyjä, voidaan katsoa toimivan jäykistävinä rakenneosina. Kipsilevyn jäykkyysominaisuudet heikentyvät huomattavasti, kun se katkaistaan leveysuunnassa, joten tämän huomiointi sekä mitoitus- että asennusvaiheessa on tärkeää. Ikkuna- tai oviaukollisia seinälohkvoja ei laskennassa huomioida jäykistävinä rakenneosina.

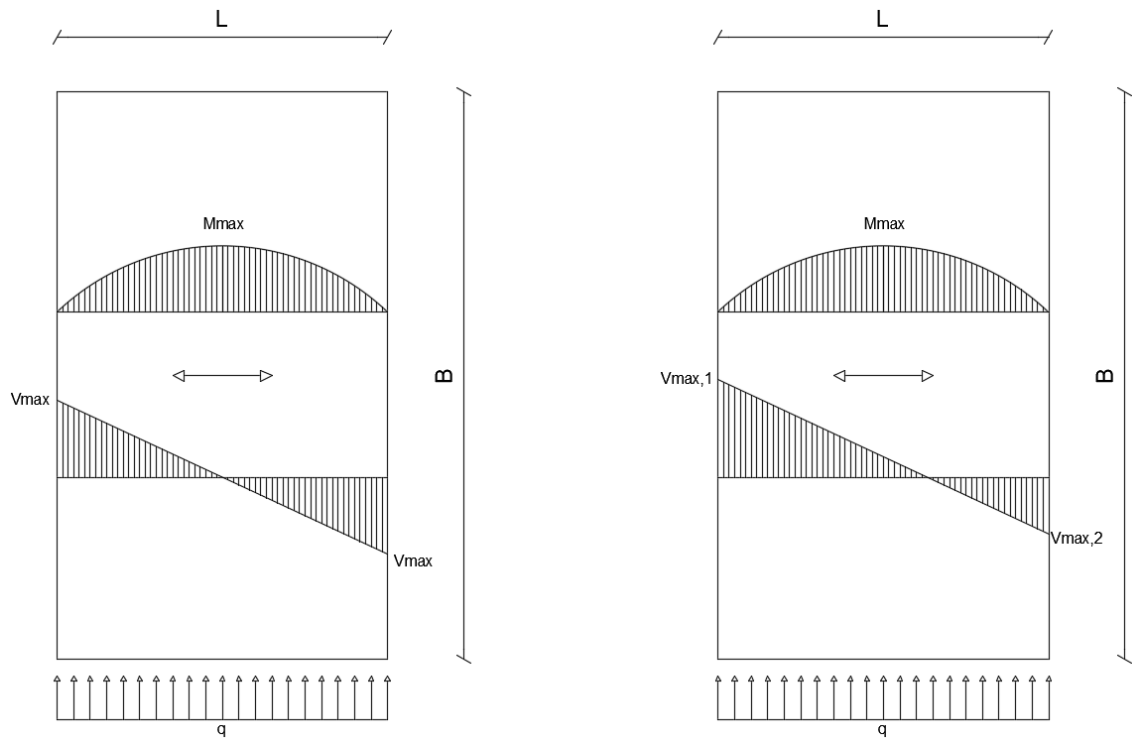


Kuva 2. Jäykistysseinäesimerkki. a: Normaalilevyinen jäykistävä seinälohko; b: Aukollinen seinälohko (ikkuna tai ovi), ei huomioida jäykistävänä rakenneosana; c: Kapea jäykistävä seinälohko (mukaillen RIL 205-1-2017)

2.1.2 Jäykistävät lattiarakenteet

Rakennuksen jäykistämisessä yleisesti ottaen ei huomioida välipohjaan syntyvää tasonsuuntaista muodonmuutosta. Näin ollen välipohjan jäykkyysominaisuksien suhteen tehdään olettaimus, joten sen todellista käyttäytymistä ei tarkastella. Jäykistävinä rakenteina rakennuksen välipohjat ovat kuitenkin keskeisessä roolissa. Tilaelementtien tapauksessa välipohjat ovat joustavin mekaanisin liitoksina kiinni seinärakenteissa. Välipohjarakenteiden jäykistävinä rakenneosana toimii jäykistävä levykenttä. Välipohjan voidaan ajatella olevan korkea yksiaukkoinen vaakapalkki, missä tilaelementin syvyys/pituus on palkin korkeus. (Lehtonen 2022)

Laskennallisesti välipohjarakenteen voidaan ajatella olevan joko joustava tai jäykkä, ja näissä tapauksissa välipohjan tukireaktiot kohdistuvat tilaelementin kantaville seinärakenteille. Joustava välipohja toimii siten, että joustaviksi oletetut välipohjan levyt ovat jäykkyydeltään heikompia kuin niitä kannattelevat jäykistävät seinät. Tällöin seinärakenteet oletetaan jäykiksi, ja rakennemalli ajatellaan niveltuetuksi vaikkei seinien todellisia jäykkyyksiä huomioida. Jäykän välipohjan toimintaperiaate perustuu siihen, että jäykät välipohjat ovat jäykästi niitä kannattaviin jäykistäviin seinärakenteisiin. Tässä tapauksessa välipohjassa ei esiinny vaakasuuntaista taivutusmuodonmuutosta. (Crocetti 2016 s. 206)



Kuva 3. Tilaelementin välipohjaan kohdistuvat rasitukset sen toimiessa korkeana yksiaukkoisena palkkina. (mukailen Lehtonen 2022)

Kuvassa 3 vasemmanpuoleinen tilanne kuvaa joustavan välipohjan tapausta ja oikeanpuoleinen puolestaan kuvaa jäykän välipohjan tapausta. Tilaelementin välipohjaa kuvaavan suorakulmion keskellä olevat nuolet kuvaavat lattiarakenteen kantosuuntaa.

Taivutusmomentti M_{\max} sekä leikkausvoimat V_{\max} ja $V_{\max,i}$ saadaan ratkaistua yksiaukkoisen palkin statiikan kaavojen avulla:

$$M_{\max} = \frac{q \cdot L^2}{8}, \quad (1)$$

$$V_{\max} = \frac{q \cdot L}{2}, \quad (2)$$

$$V_{\max,i} = \left(\frac{K_{\text{tot},i}}{\sum K_{\text{tot},i}} \right) * q * L, \quad (3)$$

missä q on rakennetta kuormittava viivakuorma [kN/m],

L on kuormitettavan rakenteen leveys [m],

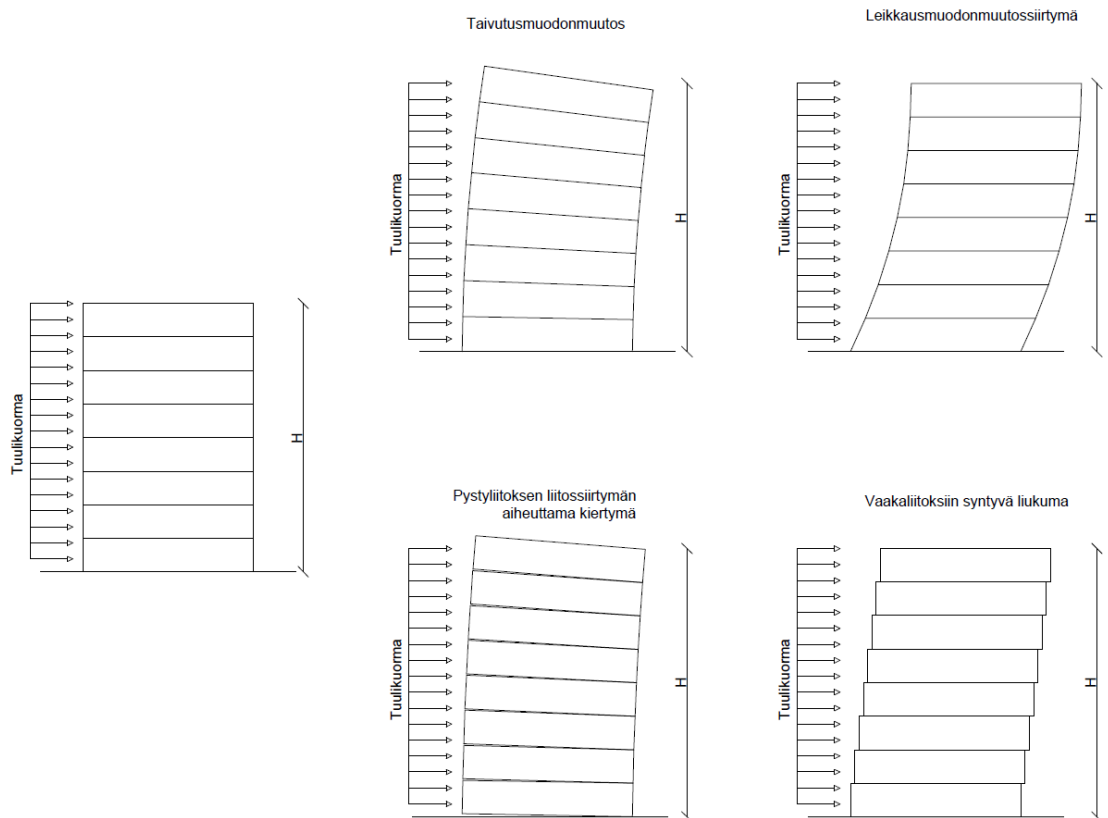
$K_{\text{tot},i}$ on seinän kokonaisjäykkyys [N/mm] ja

$\sum K_{\text{tot},i}$ on huoneiston jäykistävien seinien jäykkyyksien summa [N/mm].

2.2 Tyypikerrostalon vaakasiirtymät

Stabiileetin laskennassa käyttörajatilassa tarkastellaan rakennuksen siirtymää. Käyttörajatilassa vaakasiirtymiä tarkastellaan sekä kerroskohtaisesti että tarkastelemalla vaakasiirtymiä koko kerrostalon mittakaavassa.

Vaakasiirtymän voidaan katsoa koostuvan neljästä eri tapauksesta: leikkausmuodonmuutossiirtymästä, taivutusmuodonmuutoksesta, vaakaliitosten siirtymästä sekä pystyliitoksen liitossiirtymän aiheuttamasta kiertymästä. (Lehtonen 2022) Nämä neljä eri tapausta on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Kokonaisvaakasiirtymän eri tapaukset.

Käyttörajatilamitoituksessa nämä kaikki eri siirtymätapausta täytyy huomioida kokonaisvaakasiirtymän määrittämisessä. Suomessa RIL suosittelee kokonaisvaakasiirtymän raja-arvoa $H/500$. Eurokoodi määrää maksimivaakasiirtymäksi $H/300$. (Puuinfo 2018) Tässä työssä maksimivaakasiirtymän raja-arvona käytetään Eurokoodin määrittelemää $H/300$. Tähän siirtymään täytyy sisällyttää kaikki neljällä olevassa kuvassa esitettyä tapausta summana.

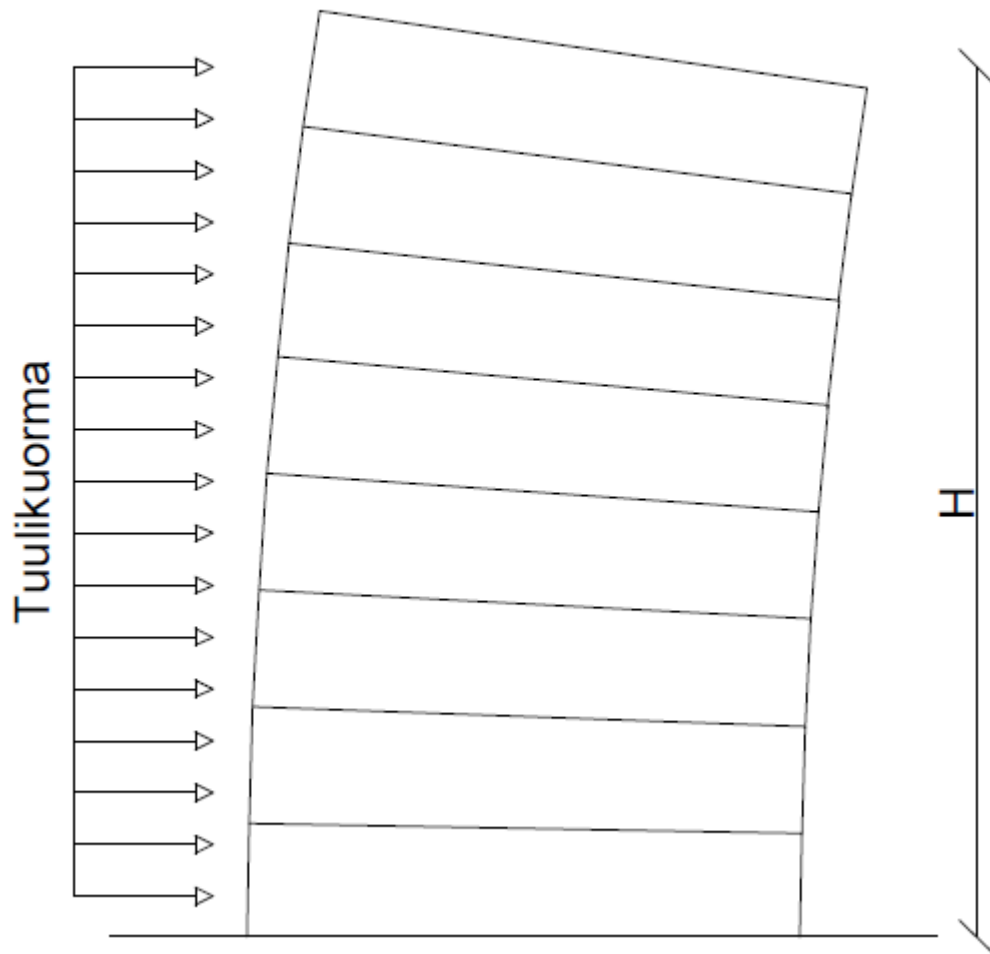
2.2.1 Taivutusmuodonmuutos

Tuulikuorma aiheuttaa rakennuksen taipumista, joka puolestaan aiheuttaa rakenteeseen pystykuormia. Tuulen puoleiseen seinään syntyy nostetta ja vastakkaiseen puristusta, joten näin ollen puristuspuolen seinän voidaan katsoa painuvan kasaan ja nostepuolen seinän puolestaan venyvän.

Taivutusmuodonmuutosta syntyy tämän lisäksi myös leimapaineesta johtuvasta rakenteen muodonmuutoksesta eli painumisesta, rakenteiden puristumisesta ja venymästä sekä ääntä eristävän sylomer-kaistan muodonmuutoksesta.

Ylemmissä kerroksissa taipuma kertaantuu, vaikka kerroskohtaisesti tarkastellessa ylempiin kerroksiin syntyvä taipuma on vähäisempää kuin alemmissa kerroksissa, sillä kerros lähtee taipumaan jo valmiiksi kaltevalta pinnalta. Alla olevassa kuvassa 5 on havainnollistettu taipuman periaate.

Taivutusmuodonmuutos



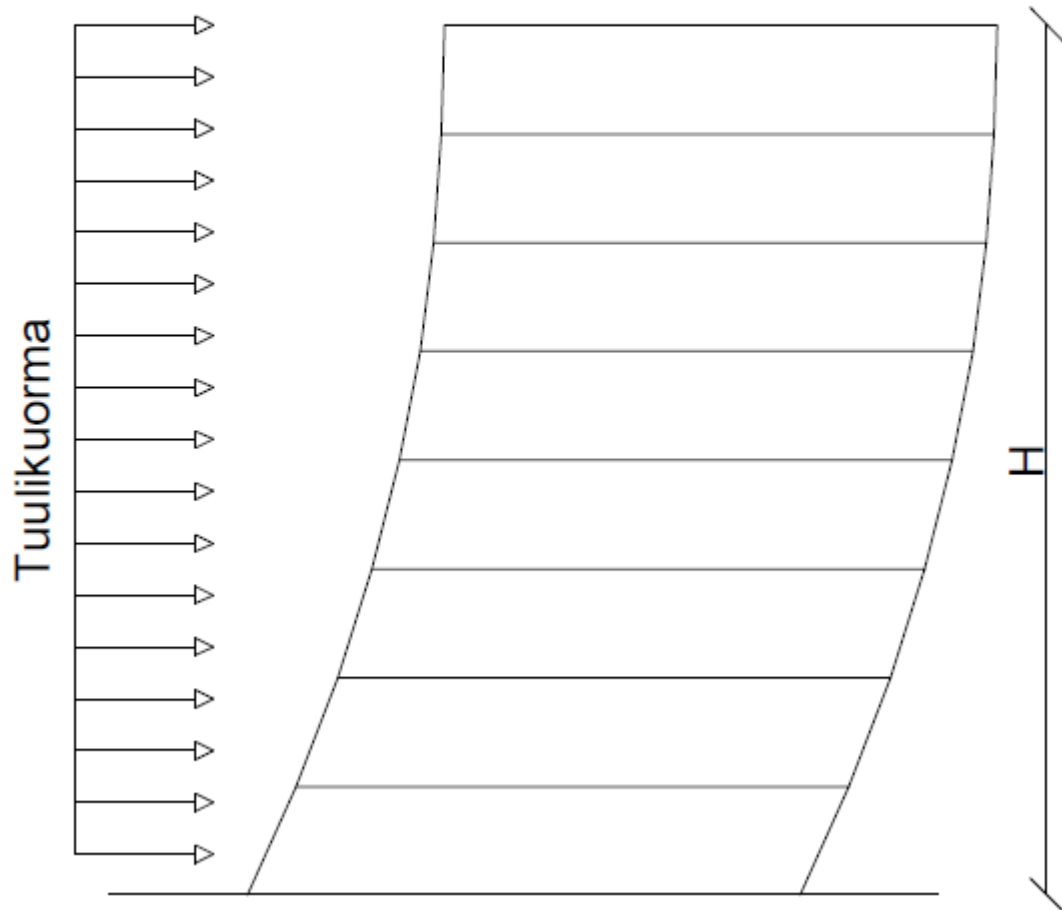
Kuva 5. Taivutusmuodonmuutos

Taivutusmuodonmuutoksen laskennallinen määrittäminen tarkasti on haastavaa, vaikka käytössä olisi apuna laskentaohjelmia. Tämä johtuu siitä, että kyseiseen muodonmuutokseen vaikuttavia tekijöitä on useita.

2.2.2 Leikkausmuodonmuutossiirtymä

Leikkausmuodonmuutoksesta johtuvassa siirtymässä seinärakenteeseen syntyy muodonmuutosta, jossa pystysuuntaisten reunojen voidaan ajatella kallistuvan ja näin ollen yläreuna liikkuu leikkaussuunnassa. Kuvassa 6 on havainnollistettu leikkausmuodonmuutossiirtymän periaate.

Leikkausmuodonmuutossiirtymä



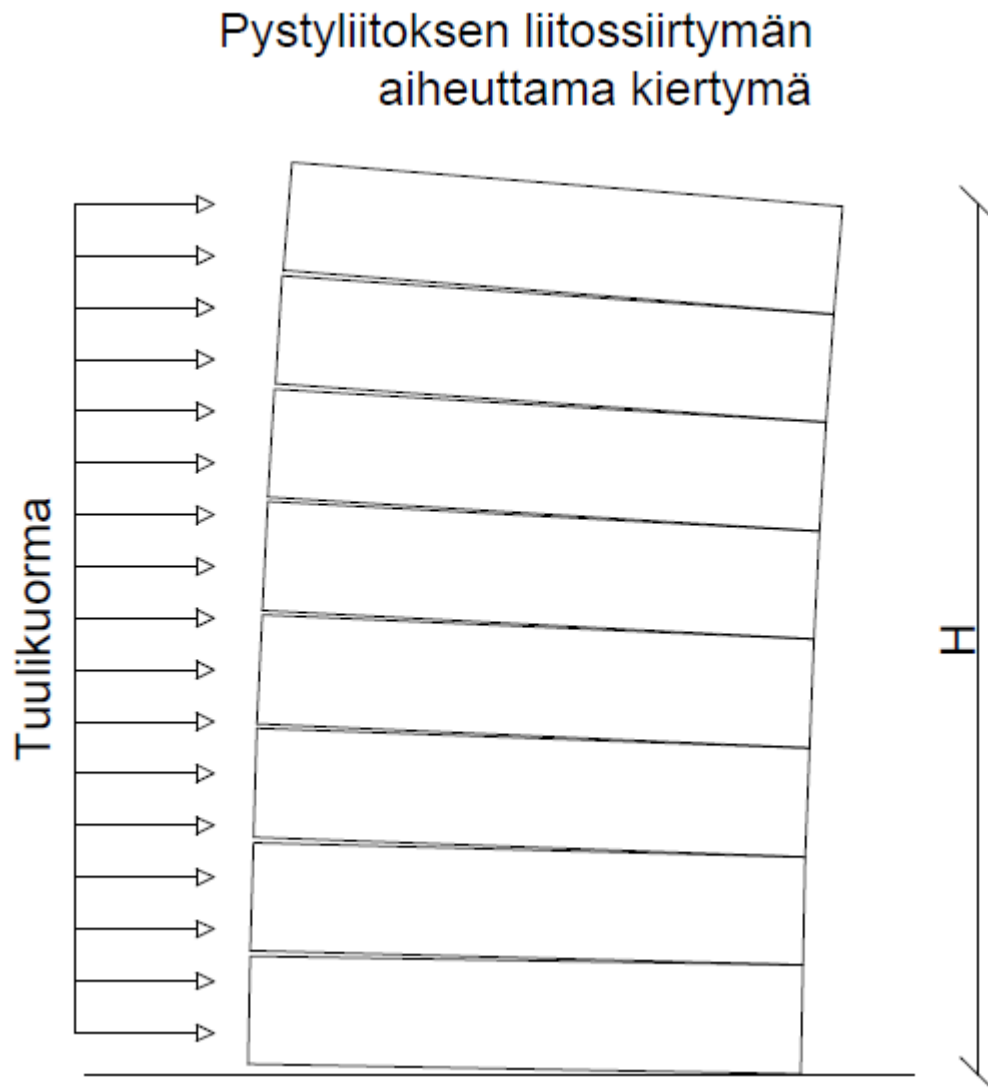
Kuva 6. Leikkausmuodonmuutossiirtymä.

Leikkausmuodonmuutoksesta johtuvaan siirtymään ensisijaisesti vaikuttaa tarkasteltavan seinärakenteen kyky vastustaa muodonmuutosta eli sen jäykkyys.

2.2.3 Liitossiirtymät

Kerrosten välisten liitosten ankkurointipisteeseen syntyy vetoa, joka aiheuttaa liitossiirtymää, ja aiheuttaa rakennukseen muodonmuutosta. Näin ollen kerroksen yläreuna kallistuu. Muodonmuutosta syntyy lisäksi kerrosten välisten tilaelementtien seinärakenteiden liitoksiin, kun tuulen vastaanottavan sivun puoleisiin pystysuuntaisiin liitoksiin syntyy venymää. Nämä aiheuttavat rakennukseen kiertymää, joka näin ollen

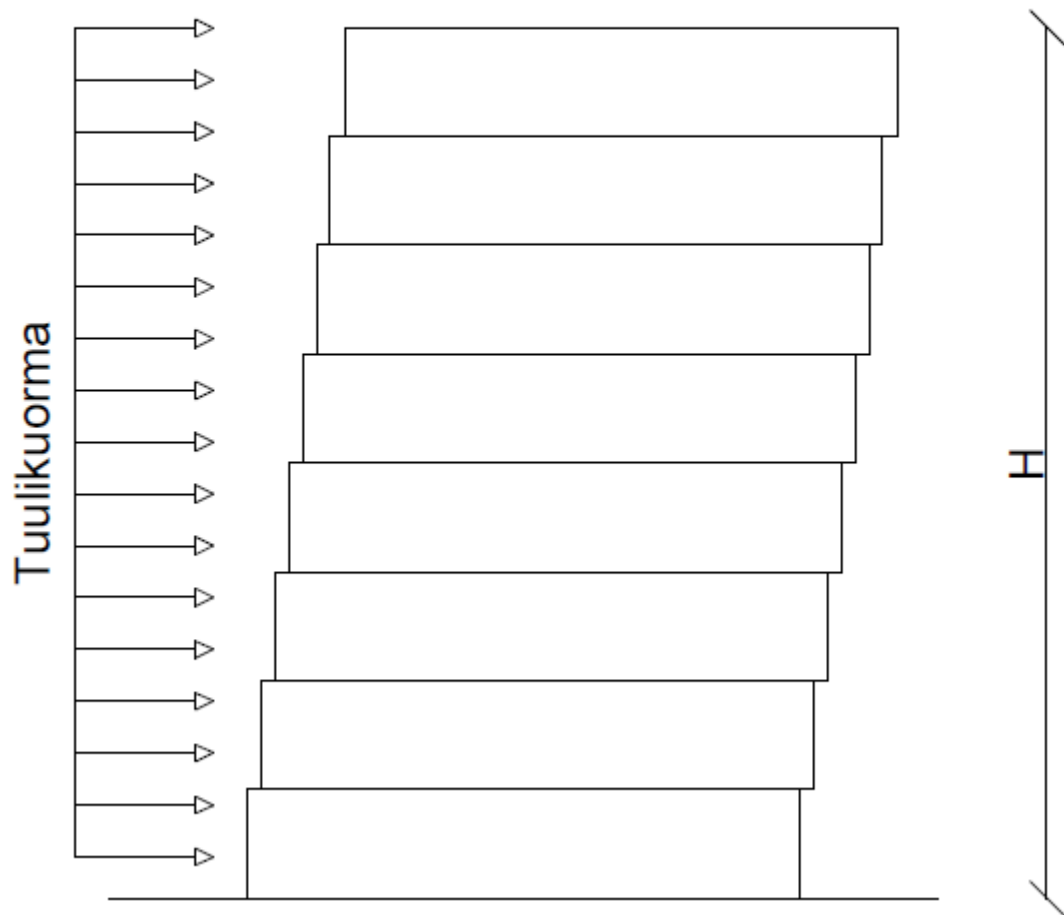
aiheuttaa vaakasiirtymää tarkasteltavaan rakennukseen. Pystyliitosten siirtymä riippuu liitoksen välisestä jäykkyydestä.



Kuva 7. Pystyliitoksen liitossiirtymän aiheuttama kiertymä.

Eri kerrosten välisten tilaelementtien saumat eivät ole täysin jäykkiä vaan niihin kohdistuva vaakakuorma aiheuttaa siirtymää liitoksissa. Kuvassa 8 on havainnollistettu liitoksiin syntyvää vaakasuuntaista siirtymää.

Vaakaliitokseen syntyvä liukuma



Kuva 8. Vaakaliitokseen syntyvä leikkausliukuma.

Liitossiirtymät koskevat puikkoliittimiä, joita ovat naulat, ruuvit sekä tapit. Siirtymän suuruus riippuu suoraan kuormittavan voiman suuruudesta. Sen laskemiseen käytetään K_{ser} -siirtymäkerrointa.

Käyttörajatilamitoituksen liitossiirtymän siirtymäkerroin K_{ser} [N/mm] määritetään kaavalla:

$$K_{ser} = \rho_m^{1.5} * d/23 \quad (4)$$

ja naulaliitoksille, joita ei ole esiporattu lasketaan kaavalla:

$$K_{ser} = \rho_m^{1.5} * d^{0.8}/30 \quad (5)$$

missä ρ_m on puuosan tiheys [kg/m³] ja
d on liittimen paksuus [mm].

Murtorajatilamitoituksessa jäykkyyksominaisuuksille käytetään keskimääräisiä arvoja. Liitoksen siirtymäkertoimena murtorajatilassa käytetään kerrointa K_u , joka määritetään kaavalla:

$$K_u = \frac{2}{3} * K_{ser}, \quad (6)$$

missä K_{ser} on siirtymäkerroin käyttörajatilassa [N/mm].

Ruuvaustavalla on merkittävä vaikutus liitoksen jäykkyyteen, sillä vinoruuvauksella päästään käytännön tasolla huomattavasti pienempiin liitossiirtymiin kuin vaaka- tai pystyruuvauksella.

2.2.4 Kitkan merkitys liitossiirtymissä

Akustisen toimivuuden takia kerrosten välille täytyy lisätä ääntä ja tärinää eristävä sylomer-kaista tai kumibitumikermi. Kitkan hyödyntäminen olisi mahdollista hyödyntää mitoituksessa esimerkiksi käyttämällä sylomer-kaistan aiheuttaman kitkavoimaa liitoksen jäykkyyden määrittämisessä. Sen avulla rakenteita voisi optimoida entisestään. Tilanteissa, joissa esimerkiksi kahden rakenteen välissä on sekä sylomer-kaista että ruuviliitos, liitoksen jäykkyyden määrittämiseen olisi mahdollista käyttää näistä vaihtoehdoista jäykempää.

Sylomer-kaistalle on mahdollista selvittää K_{ser} siirtymäkerrointa vastaava K -arvo jousivakion kaavasta:

$$F = K * \delta \leftrightarrow K = \frac{F}{\delta}, \quad (7)$$

missä K on jousivakio / siirtymäkerroin [N/mm],
 F on kaistaan kohdistuva kuorma [N] ja
 δ on kaistan muodonmuutoksesta johtuva siirtymä [mm].

Tässä työssä liitosten jäykkyydet määritellään mekaanisten liittimien perusteella, jolloin sylomerin jäykkyysominaisuuksia ei oteta laskennassa huomioon. Tärkeää on kuitenkin mitoituksen yhteydessä tiedostaa, että kyseisellä rakenneosalla silti merkitystä kokonaisvaakasiiirtymien määrittämisen suhteen.

2.3 Murtorajatilan tarkastelu

Murtorajatilan mitoituksessa tarkastellaan, että kestävätkö tarkasteltavat rakenteet niihin kohdistuvien kuormien aiheuttamia rasituksia murtumatta tai menettääkö rakennus tasapainon kuormituksen seurauksena. Murtorajatilaa voidaan tämän lisäksi käsitellä onnettomuustilanteessa ja maan petteämisen tai sen liian suuren siirtymätilan suhteen. Tässä työssä nämä murtorajatilojen tapaukset kuitenkin rajataan tarkastelun ulkopuolelle. Murtorajatilan mitoitusperusteena käytetään rakenteiden lujuuksia. Käyttörajatilan mitoitukseen verrattuna ei määritellä suurimpia sallittuja muodonmuutoksia vaan määräävänä tekijänä on kestävätkö rakenne vai ei.

Puu on materiaaliominaisuuksiltaan ortotrooppista, mikä tarkoittaa sitä, että sen ominaisuudet ovat eri suunnasta syiden suhteen katsottuna erilaisia. Tämän lisäksi puu halkeilee helposti vetorasituksen ja leikkausjännityksen tapauksissa. Puun käytös myötölujuuden ylittyessä on epälineaarista, joka vaikeuttaa puurakenteen mitoittamista sekä mallintamista. (Lehtonen 2022)

Murtorajatilassa jäykistävät voimat voidaan jakaa joko rakenteiden jäykkyyksien tai kapasiteettien suhteessa. Kapasiteettien suhteessa voimien jakautumista voidaan käsin laskien käyttää perustellusti, jos seinärakenteiden ja liitosten jäykkyyksissä ei

rakennuksessa ole suuria eroja. Tässä työssä tarkasteltavan kerrostalon kuormien jakoperusteena on aiheellisempaa käyttää laskentaperustetta, jossa kuormat jaetaan jäykistävillä rakenteilla niiden jäykkyyksien suhteessa. Työssä tarkasteltavan kerrostalon jäykistävien seinien pituudet sekä aukkojen sijainnit kerroskohtaisesti tekevät seinälinjoista jäykkyydeltään hyvin erilaiset. Myös FEM-laskenta käyttää kyseistä jäykkyyksien suhteen jakamista laskennan perusteena.

Murtorajatilan tarkastelu voidaan tehdä rakenteiden lineaarisella alueella kimmoteorian avulla, jolloin murtorajatilan kriittisenä pisteenä pidetään rakenteelle sitä kuormituksen arvoa, jossa rakenteeseen syntyy pysyvä muodonmuutos, kuten murtuma tai halkeama tai ettei rakenne enää muulla tavalla palaudu alkuperäiseen muotoonsa. Kun rakenteiden optimointi halutaan viedä vielä pidemmälle, murtorajatilan tarkastelua voidaan tehdä myös rakenteen plastisella alueella. Tällöin murtorajatilan mitoituksessa voidaan hyväksyä rakenteeseen syntyvä muodonmuutos, ja rajatilan kriittisenä pisteenä voidaan pitää sitä, missä rakenne menettää kokonaan sen kantavat tai kuormituksia siirtävät ominaisuudet.

2.3.1 Omapainon vaikutus puurakenteisissa rakennuksissa

Puisten tilaelementtikerrostalojen ja puurakenteisilla korkeilla rakennuksilla yleisesti ottaen haasteena on ankkurointi perustuksiin sekä kerroksien välinen ankkurointi. Tämä johtuu siitä, että puurakennuksessa omapaino jää niin alhaiseksi, että siihen syntyviä vetopuolen kuormia ei saada kumottua. Näin ollen nostevoimien suuruudet nousevat nopeasti haastavan suuriksi. (Puuinfo 2020)

Analyttisessä laskennassa omapainolle käytettävä varmuuskerroin määritetään rakenteen toiminnan perusteella. Esimerkkinä löysässä tilaelementissä omapainoa ei voi hyödyntää laskennallisesti edullisena kuormana niin paljon kuin jäykempää tilaelementtiä. Käytännön tasolla löysällä tilaelementtimoduulilla tarkoitetaan tilannetta, jossa sitä nostetaan yhdestä nurkasta ilmaan muiden nurkkien pysyessä maassa johtuen tilaelementtiin syntyvästä muodonmuutoksesta. Jäykässä tilaelementissä tällainen nosto ei aiheuta muodonmuutosta rakenteisiin.

Murtorajatilan mitoituksessa on myös mahdollista ajatella nostokertojen heikentävän tilaelementin rakenteellista jäykkyyttä, jolloin laskennassa täytyy huomioida valmiiseen tilaelementtiin tehtyjen nostokertojen määrä tehtaalta lähdöstä työmaalla asentamiseen.

2.3.2 Vaakavoimien aiheuttamat lisärasitukset kantavalle rungolle

Vetopuolen normaalivoimat eli nostevoimat sekä puristuspuolen normaalivoimat kuormittavat kantavien rankaseinien runkotoilppia. Kyseiset voimat ovat korkeissa puurakennuksissa murtorajatilan mitoituksessa oleellisessa roolissa. Nostevoimat vetävät rankaseiniä, jolloin runkotoilppien voidaan ajatella venyvän ja puristuspuolella puolestaan painumaan kasaan. Liiallinen pituussuunnan muodonmuutos aiheuttaa haasteita myös jäykistäville kipsilevyille, joiden vetopuolen lujuus on heikko, mikä johtaa niiden murtumiseen. Tämä puolestaan johtaa siihen, että jäykistävien kipsilevyjen lasketut tai kokeellisesti mitatut jäykkyyden arvot eivät enää toteudu. Kun syntyy nostetta, syntyy myös puristusvoimia, jolloin myös rakenteisiin syntyvien puristusvoimien suuruudet aiheuttavat etenkin alimmissa kerroksissa haasteita puurakenteiden kapasiteettien suhteen. (Puuinfo 2020)

3 RAKENNUSLIIKKEEN TYYPIPUUKERROSTALON RAKENNE- JA JÄYKISTYSJÄRJESTELMÄ

Tässä osiossa esitellään työn tarkastelun kohteena oleva 8-kerroksinen puurankarunkoinen tilaelementtikerrostalo yksityiskohtaisesti. Lehdon tilaelementeillä rakennetaan joko luhtikäytävällisiä, usein 2-kerroksisia asuinrakennuksia tai korkeintaan 4-kerroksisia asuinkerrostaloja. Tässä työssä tarkastellaan nimenomaan jälkimmäisen rakennuksen tapaista pohjaratkaisua.

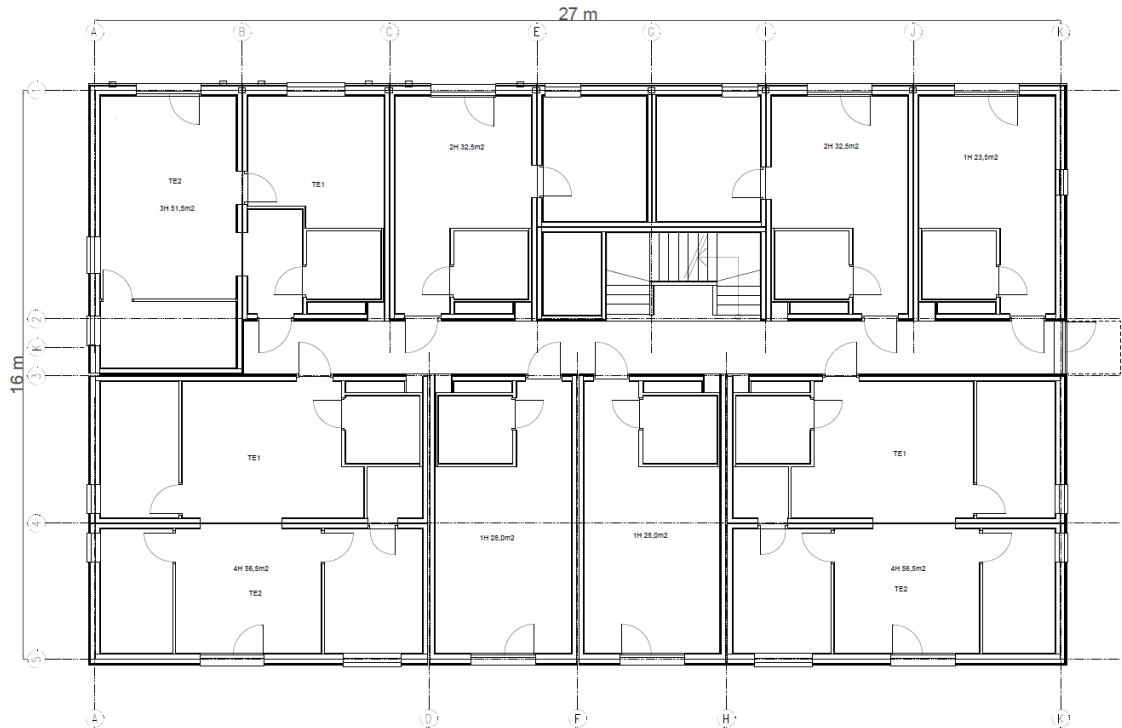
3.1 Tyypikerrostalon rakennejärjestelmä

Yksittäinen kerros koostuu keskikäytävästä, sekä sen molemmin puolin olevista tilaelementeistä koostuvista huoneistoista. Yksiöt koostuvat yhdestä tilaelementistä, kaksi kaksiota muodostuu yhteensä kolmesta tilaelementistä sekä kolmiot ja neliöt valmistetaan kahdesta tilaelementistä. Kerrokset pyritään keskenään rakentamaan keskenään samanlaisia pohjaratkaisuja käyttäen, jolloin pystysuuntaiset kuormat saadaan siirrettyä mahdollisimman tasaisesti perustuksille.

Kerrostalon yläpohja toteutetaan elementtirakenteisena, jossa vesikaton primäärikannattajat ovat MetsäWoodin Kerto-S viilupuusta valmistettuja naulalevyristikoita. Perustukset tehdään joko maanvaraisesti tai paalujen varaan.

Rakennuksen kuormat välitetään jäykistävien vaakarakenteiden eli alapohjan, välipohjan tai yläpohjan kautta seinille ja kantavat puuelementtirakenteiset seinät siirtävät kuormat perustuksille. Kantavien rakenteiden palonkestovaatimus on R60. Yläpohjan, parvekkeiden ja poistumisteiden palonkestovaatimus puolestaan on R30.

Kuvassa 9 on esitetty tyypikerrostalon ensimmäisen kerroksen pohjapiirustus, ja tämä sama pohjaratkaisu toistuu jokaisessa kahdeksassa kerroksessa.



Kuva 9. Tyyppikerrostalon pohjaratkaisu yleensä. Leveyden ja pituuden dimensiot ovat pyöristetty lähimpään tasalukuun kuormien määrittämistä varten.

3.1.1 Tilaelementin rakennejärjestelmä

Yksittäinen tilaelementti koostuu kantavista ja jäykistävästä rankarunkoisista kipsilevyseinistä, tilaelementin alapohjasta sekä tilaelementin yläpohjasta. Tilaelementin sisällä on mahdollisesti myös huoneiden välisiä seiniä, kun kyseessä on tilaelementti, joka on osana kolmiota tai neliötä. Tämän lisäksi osassa tilaelementeistä on märkätila, missä lattiarakenne poikkeaa normaalista. Kyseisten rakenteiden rakennusratkaisut käydään läpi rakennetyypeissä.

3.2 Materiaalit

Tässä osiossa käydään yleisellä tasolla läpi työssä tarkasteltavan tyyppikerrostalon puisia rakennusmateriaaleja. Materiaalien tarkastelu rajataan siten, että esitellään vain ne materiaalit ja niiden ominaisuudet, joilla katsotaan olevan merkitystä rakennuksen toiminnan kannalta. Toisin sanoen siis tarkastellaan niitä materiaaleja, joiden ominaisuudet siirretään FEM-laskentamalliin.

3.2.1 Sahatavara

Sahatavara valmistetaan sahaamalla puuta pituussuuntaa vähintään kahdelta sivulta. Suomessa sahatavara valmistetaan joko kuusesta tai männystä, ja määrältään kumpaakin on karkeasti yhtä paljon. Sahatavaraa voidaan käyttää rakennusmateriaalina sellaisenaan, mutta sitä käytetään myös materiaalina jatkojalostuksessa.

Laatuluokka sahatavaralle määräytyy ulkonäön perusteella. Tärkeimmät kriteerit laatuluokan määräytymiselle ovat oksien määrä, koko ja sijoittuminen, mutta myös muun muassa halkeamilla, vajasärmäisyydellä, vinosyisyydellä ja muotovioilla on vaikutusta luokitteluun.

Etenkin suunnittelun ja laskennan näkökulmasta oleellisempi luokittelu sahatavaralle on lujuuslajittelu. Nykyisin se tehdään kehittyneiden koneellisten lujuuslajittelumenetelmien kuten konenäkömittauksen, röntgenmittauksen, ominaistajuuden mittauksen ja ultraäänimittauksen perusteella. Lujuuslajittelu tehdään standardin EN 338 mukaan. Lujuusluokat C14-C30 lajitellaan joko visuaalisesti tai koneellisesta ja lujuusluokat C35-C50 lajitellaan koneellisesti. (Puuinfo 2020)

Lehto Components Oyn tilaelementeissä kantavien seinien rankarungot on valmistettu käyttäen C24 lujuusluokan sahatavaraa, minkä takia tarkastellaan sen materiaaliominaisuudet tarkemmin.

3.2.2 Liimapuu

Liimapuu on rakenteellinen puutuote, jota valmistetaan liimaamalla lamelleja yhteen. Sahatavaralamellit ovat syysuunnaltaan liimapuutuotteen pituussuuntaisia. Liimapuun valmistamiseen käytetyt sahatavaralamellit ovat enintään 45 mm paksuja.

Liimapuu voidaan valmistaa joko kokoamalla saman lujuusluokan lamelleja yhteen tai käyttämällä suuremman lujuusluokan lamelleja uloimpien lamellien paikalla. Kun liimapuun lamellit ovat yhtenäistä lujuusluokkaa, liimapuu on homogeenista (homogeneous: h). Jälkimmäistä tapausta puolestaan kutsutaan yhdistetyksi liimapuuksi (combined: c). (Puuinfo 2020)

Lehdon tilaelementteihin laitetaan C24 rankarungon lisäksi nurkkapilarit, jotka ovat lujuusluokaltaan G30c liimapuuta.

3.2.3 Viilupuu

Viilupuu eli LVL (Laminated Veneer Lumber) valmistetaan liimaamalla sorvattuja puuviiluja yhteen. Viilut voidaan liimata joko siten, että kakkien viilujen syysuunta on pituussuuntainen tai osa viiluista on liimattu ristiin. Suomessa viilupuuta valmistavat Stora Enso ja Metsä Wood. Tässä työssä keskitytään viilupuista Metsä Woodin valmistamaan Kerto LVL -insinööripuutuotteeseen. (Puuinfo 2020)

Kerto LVL valmistetaan liimaamalla yhteen havupuuviiluja, minkä tuloksena saadaan järeitä palkki- ja puulevytuotteita. Kertopuun ominaisuuksia on hyvä jäykkyys ja mittatarkkuus, joten niiden avulla voidaan rakentaa suuria lujuuksia vaativia rakenteita puusta. Hyvä mittatarkkuus mahdollistaa monimutkaisempienkin rakenteiden ja elementtien valmistuksen sekä pienemmät virhetoleranssit. Kertopuu on erittäin kestävä ja kevyttä, joten esimerkiksi niiden kuljettaminen siirtäminen on huomattavasti helpompaa kuin vastaavan betonirakenteen. (Metsä Group 2022)

MetsäWoodin kertopuulaatuja ovat Kerto-Q, Kerto-S ja Kerto-T. Kerto-Q:ssa viiluista noin viidesosa on poikittaissuuntaisia ja loput pitkittäissuuntaisia. Ristiviilujen ansiosta sekä poikittainen lujuus että jäykkyys paranevat. Kerto-S puutuotteessa viilut ovat puolestaan yhdensuuntaisia. Kerto-T:n syysuunta on pitkittäinen. (Metsä Group 2022)

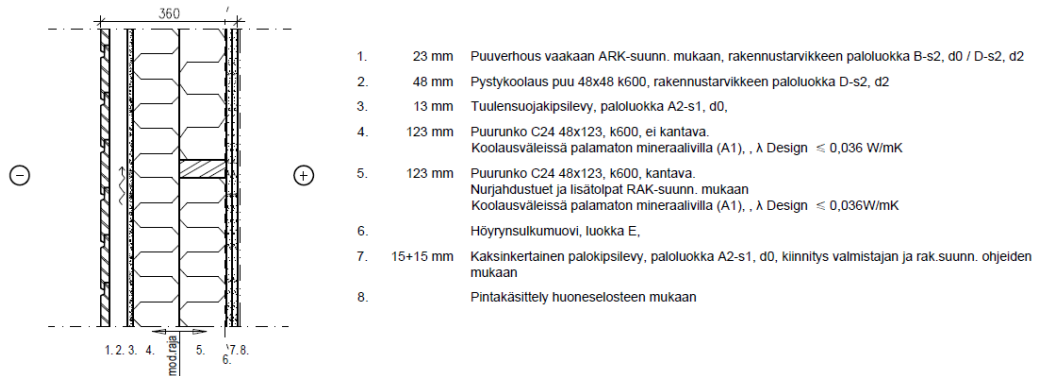
MetsäWoodin Kertopuuta käytetään Lehdon tilaelementeissä niiden lattiarakenteen kehäpalkkien sekä lattiapalkkien valmistamisessa.

3.3 Rakennetyypit

Kappaleen tarkoituksena on esittää tarkastelun kohteena olevan tilaelementtikerrostalon tyypilliset rakenneratkaisut. Rakennetyypeissä ei tarkastella kerrostalon jokaista rakenneratkaisua, vaan ainoastaan niitä, jotka otetaan FEM-laskentamallissa huomioon. Työn edetessä käydään tarkemmin läpi, kuinka huomioidut rakennetyypit sovitetaan FEM-laskentamalliin sekä millaista yksinkertaistamista ja soveltamista niille tehdään.

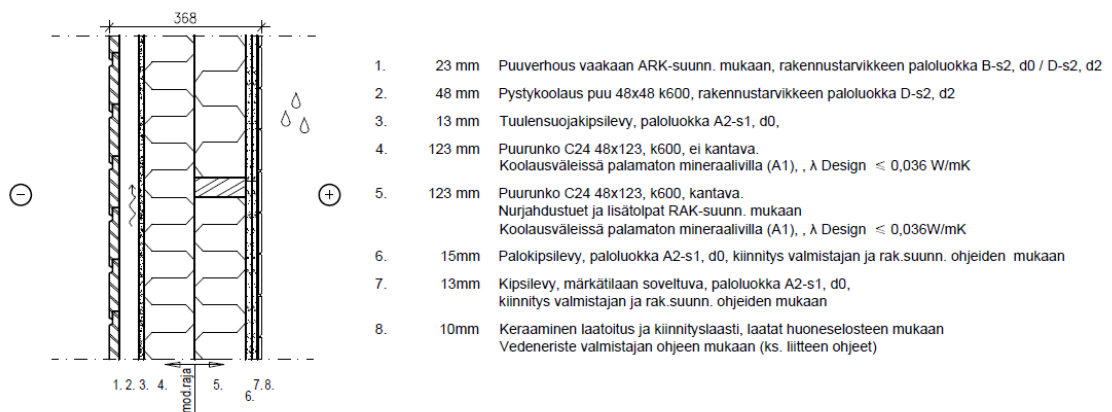
3.3.1 Seinärakenteet

Alla olevassa kuvassa 10 on esitetty kantavien ulkoseinien rakennetyyppi kuivien tilojen kohdalla. Rakenne koostuu kantavasta sisäkuorielementistä ja ei-kantavasta ulkokuorielementistä.



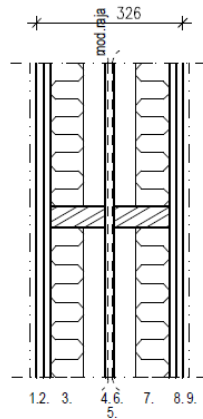
Kuva 10. Ulkoseinä normaalitilanteessa.

Kuvassa 11 on esitetty kantavan ulkoseinän rakenneratkaisu märkätilan kohdalla. Rakenneratkaisu kyseisessä rakennetyypissä on lähes vastaavanlainen kuin edellä esitellyn vakiorakenteen. Ainoastaan sisäkuoren toinen palonsuojakipsilevy korvataan märkätiloihin soveltuvalla kipsilevyllä sekä seinän sisäpintaan tulee keraaminen laatoitus.



Kuva 11. Ulkoseinä märkätilan kohdalla.

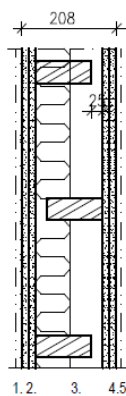
Huoneistojen välinen seinä eli kahden tilaelementin välinen kantavan seinän rakennatarkaisu on toteutettu kuvan 12 tavoin. Rakenne koostuu vierekkäisten tilaelementtien kantavista sisäkuorielementeistä. Huoneistojen välisen seinän omapaino on $0,44 \text{ kN/m}^2$.



1. Pintamateriaali tai -käsittely huoneselostuksen mukaan
2. 15 + 15 mm Sisäverhoukset, kaksinkertainen palokipsilevytykset paloluokka A2-s1, d0, kiinnitys valmistajan ja rak. suunn. ohjeiden mukaan
3. 123 mm Puurunko kantava C24 48x123 k600
Nurjahdustuet ja lisätolpat RAK-suunn. mukaan
Koolausväleissä palamaton mineraalivillaaeriste 70 mm, paloluokka A1
4. Ilmansulkupaperi
5. 20 mm Ilmaväli
6. Ilmansulkupaperi
7. 123 mm Puurunko kantava C24 48x123 k600
Nurjahdustuet ja lisätolpat RAK-suunn. mukaan
Koolausväleissä palamaton mineraalivillaaeriste 70 mm, paloluokka A1
8. 15 + 15 mm Sisäverhoukset, kaksinkertainen palokipsilevytykset paloluokka A2-s1, d0, kiinnitys valmistajan ja rak. suunn. ohjeiden mukaan
9. Pintamateriaali tai -käsittely huoneselostuksen mukaan

Kuva 12. Huoneistojen välinen seinä, kahden tilaelementin ulkoseinistä koostuva väliseinä.

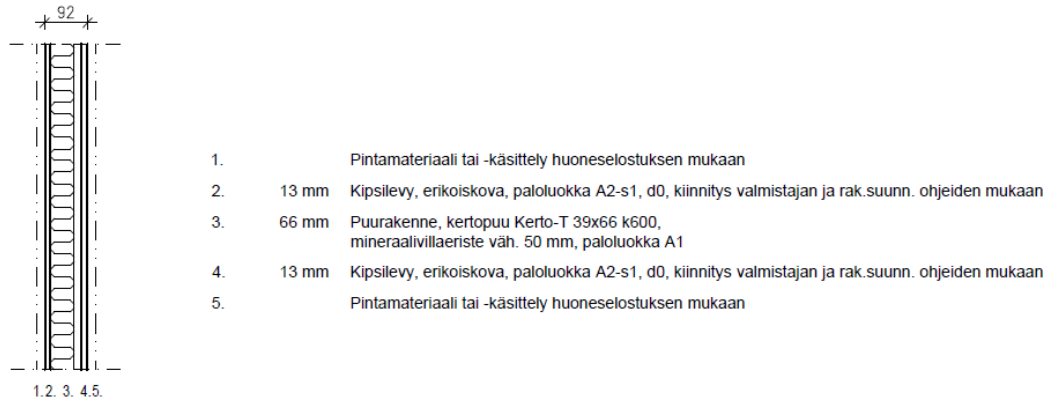
Kuvan 13 mukaista siksak-puurunkoa käytetään huoneiston ja keskikäytävän/rappukäytävän kantavana väliseinä. Rakenne koostuu kantavasta puurankarungosta, jossa runkotolpat kiinnitetään vuorotellen seinärakenteen molemmiin puolin.



1. Pintamateriaali tai -käsittely huoneselostuksen mukaan
2. 15 + 15 mm Kaksinkertainen palokipsilevy, paloluokka A2-s1, d0, kiinnitys valmistajan ja rak. suunn. ohjeiden mukaan
3. 148 mm Puurunko kantava C24 48x123, k300, limitys 25 mm,
Nurjahdustuet ja lisätolpat RAK-suunn. mukaan
Runkoväleissä mineraalivillalla 70 mm, paloluokka A1
4. 15 + 15 mm Kaksinkertainen palokipsilevy, paloluokka A2-s1, d0, kiinnitys valmistajan ja rak. suunn. ohjeiden mukaan
5. Pintamateriaali tai -käsittely huoneselostuksen mukaan

Kuva 13. Huoneiston ja keskikäytävän välinen seinä

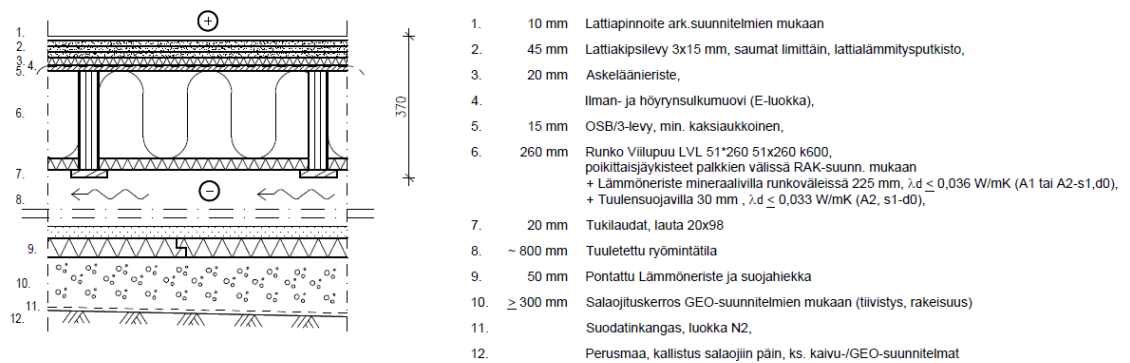
Huoneistojen sisäiset, huoneiden väliset väliseinät on esitetty kuvassa 14. Kyseiset jäykät kipsilevyseinät ovat ei-kantavia, ja ne eivät siirrä kuormia kerrosten välillä. Seinien tarkoituksena huoneiden jakamisen lisäksi on toimia koko rakennusta jäykistävinä seininä. Rakenteen omapaino on $0,26 \text{ kN/m}^2$.



Kuva 14. Ei-kantava huoneiston sisäinen kipsilevyväliseinä

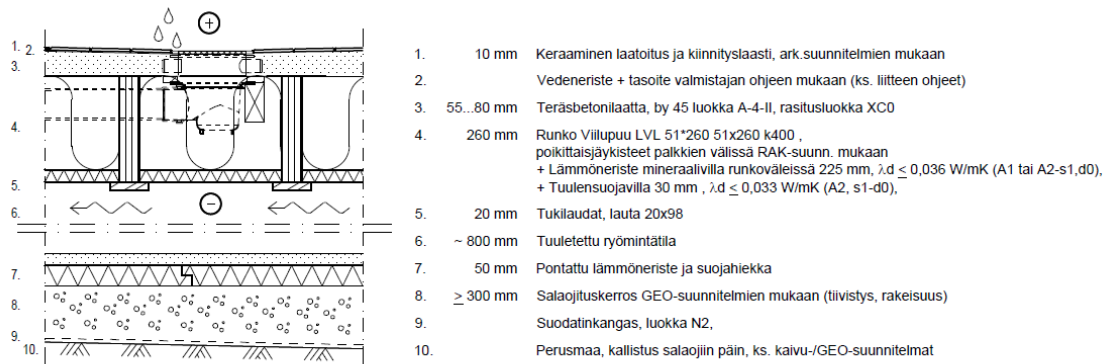
3.3.2 Lattiarakenteet

Alapohja huoneistojen kuivien tilojen kohdalla vastaa kuvassa 15 esitettyä rakenneratkaisua.



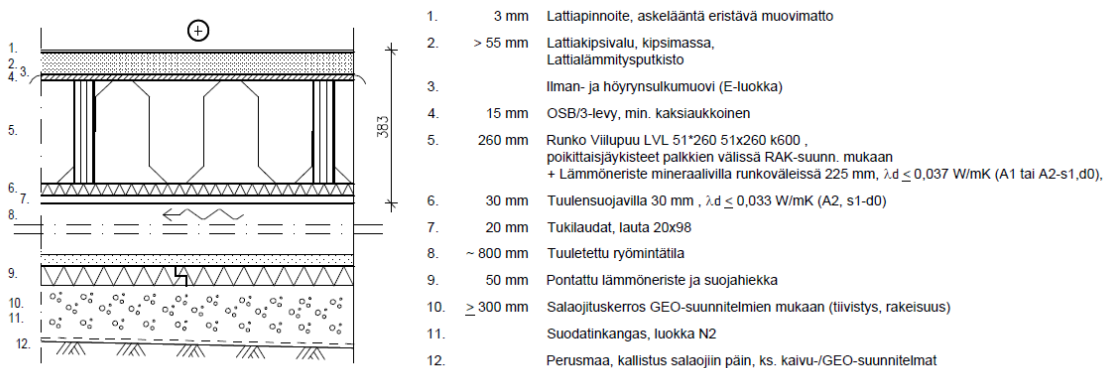
Kuva 15. Alapohja huoneiston kohdalla

Märkätilojen kohdalla alapohja on kuvan 16 mukainen.



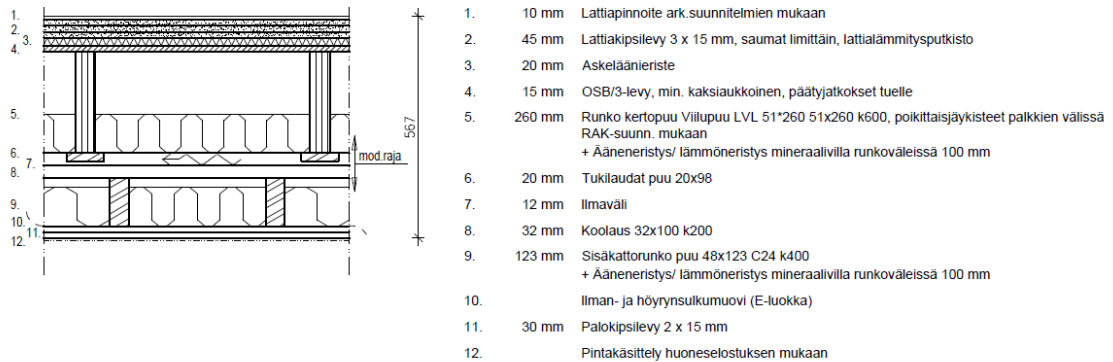
Kuva 16. Alapohja huoneiston märkätilan kohdalla.

Keskikäytävän/rappukäytävän kohdalla alapohjan rakenneratkaisu on kuvan 17 mukainen.



Kuva 17. Alapohja keskikäytävän kohdalla.

Välipohjat huoneistojen kohdalla eli päällekkäisten tilaelementtien väliset ylä- ja alapohjat ovat rakenteeltaan kuvan 18 mukaiset. Rakenteen omapaino on $1,25 \text{ kN/m}^2$.



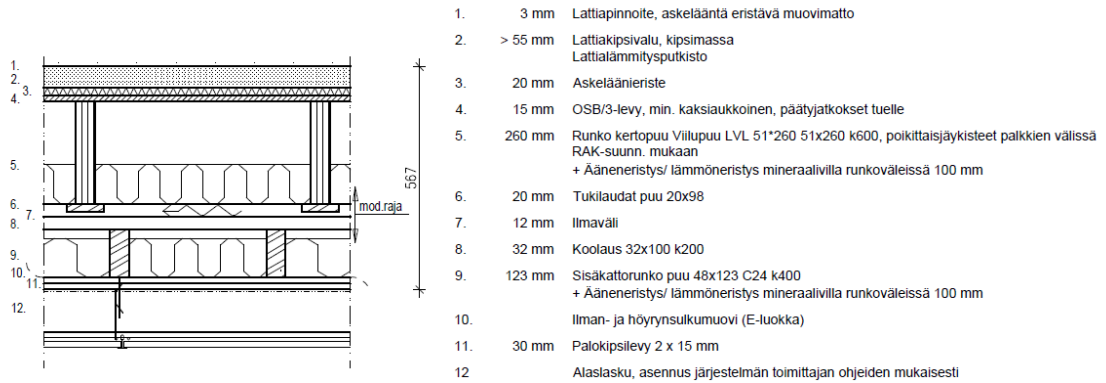
Kuva 18. Välipohja huoneistojen kohdalla.

Huoneistojen välipohjat märkätilojen kohdalla ovat kuvan 19 mukaiset. Märkätilan lattiarakenteen omapaino on $2,8 \text{ kN/m}^2$.



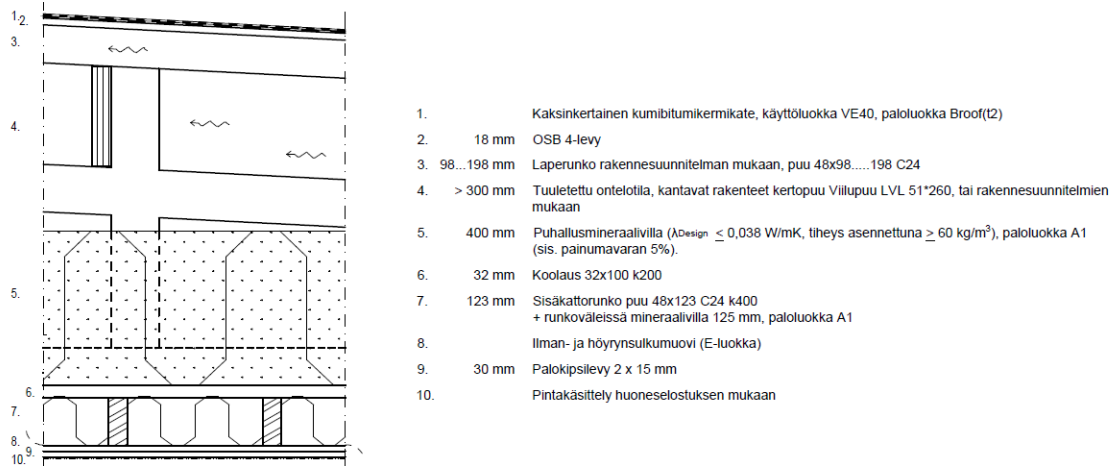
Kuva 19. Välipohja märkätilan kohdalla.

Kuvassa 20 on rakeneratkaisu keskikäytävän sekä rappukäytävän välipohjalle. Keskikäytävän välipohjan rakenteellisena tarkoituksena on siirtää vaakakuormat, jotka johtuvat pääosin tuulesta rakennuksen toiselle puoliskolle, niissä tapauksissa, joissa tuuli kuormittaa rakennuksen pidempää sivua.



Kuva 20. Välipohja keskikäytävän kohdalla.

Tyypikerrostalon yläpohja on rakeneratkaisultaan kuvan 21 rakennetyypin kaltainen. Yläpohjan ontelotilan osastoivuus kuitenkin tutkitaan tapauskohtaisesti erikseen.



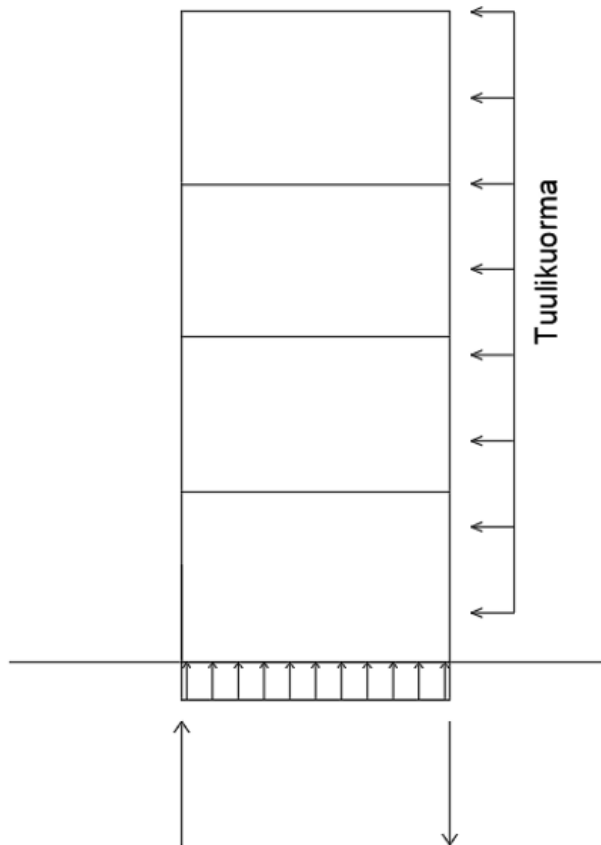
Kuva 21. Yläpohja tyypikerrostalossa.

3.4 Jäykistysjärjestelmä

Jäykistävinä rakenteina toimivat tilaelementtien ulkoseinät eli huoneistojen väliset seinät ja kerrostalon ulkoseinät. Tämän lisäksi riippuen kerrostalon pohjaratkaisusta myös osa keskikäytävän/rappukäytävän seinärakenteista toimii jäykistävinä rakenteina. Seinärakenteen jäykistävä vaikutus saadaan rankarunkoon kiinnitettävistä kipsilevyistä. Puisten lattiarakenteiden jäykistämiseen puolestaan käytetään OSB-levyystä.

Tilaelementtiin kohdistuvia pystysuuntaisia kuormituksia kantavat tilaelementtien pidemmän sivun seinät. Normaalitylanteessa kahden vierekkäisen tilaelementin vierekkäisistä seinistä koostuu huoneistojen välinen seinä. Välipohjarakenteet ja vesikattorakenteet tukeutuvat näihin tilaelementtien pidemmän sivun seiniin. Seinärakenteisiin kohdistuvat pystykuormat voidaan ajatella viivakuormina, sillä kantavien seinien rankajako on tasainen.

Tuulikuorman aiheuttamien nostevoimien tukimomentista voidaan ajatella aiheutuvan pistemäinen voimapari yksinkertaistetun laskennan tapauksessa. FEM-mitoituksessa kuitenkin puristuspuolen resultantti voidaan olettaa jakautuvan viivakuormana seinän päähän. Vetopuolen kuormat voidaan kuitenkin ajatella pistekuormina seinälinjojen päissä, sillä tilaelementtien liitokset tehdään todellisuudessa kantavien seinälinjojen päästä. Asennusteknisistä syistä kaikkia seinälinjoja ei voida kiinnittää alla oleviin rakenteisiin koko seinän pituudelta. Tällöin seinälinjan keskellä tilaelementin seinälinja ei voi vastaan ottaa pystysuuntaista vetoa, vaan seinälinjan voidaan ajatella irtoavan alapuolisesta rakenteesta kyseisessä kohdassa. Tasaisena viivakuormana seinälinjaa kuormittaa pystysuunnassa kuormittaa rakenteiden omapainot, hyötykuormat ja lumikuorma. Kyseistä tilannetta on havainnollistettu kuvan 22 avulla.



Kuva 22. Nosteen ja puristuksen jakautuminen

Seinärakenteen oletetaan toimivan taivutusjäykkänä palkkina. Sekä tuki/ankkurointiliitoksen että rankaseinän on kestettävä tuulikuorman aiheuttama pistemäinen nostevoima. Kuormat jakautuvat seinärakenteiden taivutus- ja leikkausjäykkyyden perusteella. Eli mitä jäykempi seinä, sitä suuremman osuuden kuormasta seinärakenne ottaa vastaan.

Kuormien jakautuminen riippuu olennaisesti myös tuennan jäykkyydestä. Kuormituksen jakautuminen riippuu rakenneosien keskinäisistä jäykkyyksistä, eikä rakennesuunnittelija voi kuljettaa kuormia haluamalleen rakenneosalle.

3.4.1 Liimapuupilarit

Tilaelementtien nurkissa on GL30c lujuusluokan liimapuusta valmistetut 115x180 profiilin nurkkapilarit. Liimapuupilarit lisätään puutilaelementteihin vastaanottamaan kerrostaloon syntyviä puristavia kuormia sekä ankkuroimaan nostevoimia. Nurkkapilareilla ei ole yksittäistä tilaelementtiä tarkastellessa suurta merkitystä, mutta koko rakennuksen mittakaavassa nurkkapilarit parantavat huomattavasti

tilaelementtikerrostalon kykyä ottaa pystysuuntaisia puristus- sekä vetopuolen kuormia vastaan.

Päällekkäiset nurkkapilarit kiinnitetään toisiinsa teräksisellä U-profiililiitoksella. Kyseessä oleva U-profiililiitos on Lehto Groupin kehittämä ankkurointiliitos, jolle kuormituskestävyyden ja jäykkyydestävyyden arvot on selvitetty Lehto Componentsin tilaamalla, Eurofinsin toteuttamalla testaustutkimuksella. Testitulosten perusteella vetokuormituksen siirtymäkertoimeksi saatiin $K_{T,ser} = 25800 \text{ N/mm}$ sekä leikkausvoimarasituksen siirtymäkertoimen arvoksi saatiin $K_{V,ser} = 7620 \text{ N/mm}$. (Eurofins 2021)

Kyseinen U-profiililiitos asennetaan aina tilaelementin lyhyemmän sivun puolelle, joten nurkkapilarin suhteen tämä tarkoittaa sitä, että U-teräs asennetaan nurkkapilarin profiilin pidemmälle sivulle.

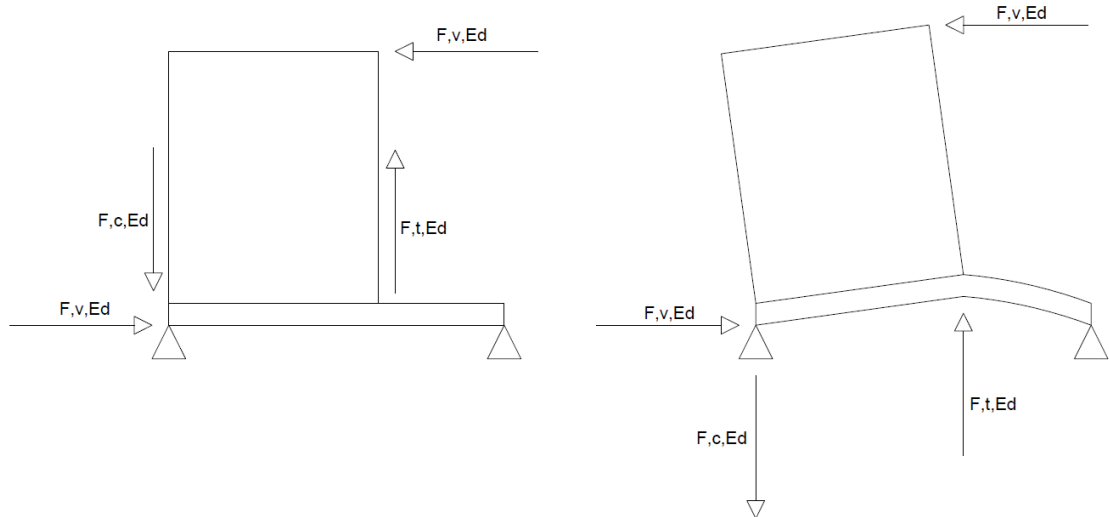
3.4.2 Kertopuupalkit

Tilaelementin alapohjan ulkokehällä kiertävät kehäpalkit. Materiaaliltaan nämä ovat MetsäWoodin kerto-S viilupuuta, ja palkkien profiili on 51x280. Näiden tarkoituksena on taivutusjäykkyydellään siirtää ja jakaa kuormia tasaisesti seinän pituudelle yksittäisen tilaelementin sisällä. Kehäpalkkeilla on suuri merkitys etenkin lyhyiden seinärakenteiden nosteiden hallitsemisessa. Seinien nurkkiin muodostuvat nosteet ankkuroidaan suoraan kantavan rankaseinän runkotalpalta kehäpalkkiin.

3.4.3 Huoneiston sisäinen kevyt kipsilevyseinä

Tämän työn tekemisen aikana rakenteiden toimintaperiaatteita tarkastellessa tehtiin johtopäätös, ettei rakennetyypeissä kuvassa 14 esitettyjä kipsilevyrakenteisia jäykistäviä väliseiniä voi käyttää laskennassa rakennusta jäykistävinä rakenteina. Nämä väliseinät ovat kiinnitetty tilaelementin välipohjan lattiapalkkeihin, joten näin ollen päällekkäisillä seinillä ei ole keskinäisiä jäykistäviä liitoksia kerrosten välillä. Jäykistävä kipsilevy vastustaa muodonmuutosta enemmän kuin palkki, johon se on jäykästi kiinnitetty, jolloin lattiapalkki pääsee taipumaan. Lattiapalkin joustamisen takia seinän jäykkyyden voidaan katsoa olevan huomattavasti pienempi kuin huoneistojen välisillä seinillä. Näin ollen huoneiston sisäisten väliseinien jäykistävä vaikutus jää laskennallisesti merkityksettömän pieneksi. Kyseinen tilanne ratkeaisi, jos lattiapalkin saisi kiinnitettyä alla olevaan

rakenteeseen väliseinän molempien nurkkapisteiden kohdalta. Tällöin lattiapalkin taipuminen ei olisi ongelmana. Lattiapalkkiin kiinnityksen lisääminen nykyisellä valmistus- ja asennustavalla on liki mahdoton toteuttaa toimivasti.



Kuva 23. Havainnekuva keveän kipsilevyväliseinän käyttäytymisestä.

Yllä olevan kuvan mukaisessa tilanteessa lattiapalkkiin kohdistuva nostevoima taivuttaa palkkia 20,5 kN voimalla, jolloin palkin taipuma menee reilusti yli käyttörajatilamitoituksen. Finnwood -ohjelmalla tehty laskelma lattiapalkille on esitetty liitteessä 4. Mitoituksessa on huomioitu välipohjarakenteen omapaino sekä jäykistävän rankarunkoisen kipsilevyseinän omapaino. Palkkiin kohdistuva $F_{t,Ed}$ on ratkaistu vaakasuuntaisen kuorman $F_{v,Ed}$ kaavalla

$$F_{t,Ed} = F_{v,Ed} * \frac{h}{L}, \quad (8)$$

missä $F_{v,Ed}$ on rakennetta kuormittava vaakavoima [N]
 h seinän korkeus on [m] ja
 L on seinän pituus [m].

Vaakavoiman suuruudeksi FEM-laskentamallin avulla on määritetty arvo $F_{v,Ed} = 23,4$ kN Seinän korkeudeksi määritettiin $h = 2,85$ m ja pituudeksi $L = 2,5$ m.

3.5 Liitokset

Tilaelementit valmistetaan tehdasoloissa, jossa yksittäiseen tilaelementtiin tulee rakenteiden välisiä liitoksia ja yksittäisen rakenneratkaisun sisäisiä liitoksia. Tilaelementit liitetään yhteen työmaalla, jolloin myös tilaelementtien välille syntyy liitoksia.

Osassa liitoksista on käytetty liitoksissa liimaa. Käyttörajatilamitoituksessa liimaliitokset voidaan olettaa jäykäksi, mutta murtorajatilamitoituksessa liimaliitosta ei tule huomioida.

3.5.1 Tilaelementin sisäiset liitokset

Yksittäisen tilaelementin laskemassa huomioitavia sisäisiä liitoksia ovat jäykistävien kipsilevyjen ja rungon väliset liitokset sekä pysty- ja vaakarungon väliset liitokset. Jäykistävät levyrakenteet kiinnitetään hakasin tai ruuviliitoksin rakenteen runkoon. Pysty- ja vaakarunkojen välisiin liitoksiin käytetään ruuveja. Ruuvien lisäksi tilaelementin lattian ja kantavan seinärakenteen väliseen liitokseen tulee liimaus.

Tilaelementin lattiarakenteen ja seinärakenteiden liitos on mahdollista tehdä kahdella tapaa. Tilaelementin ulkoseinärakenteet voidaan kiinnittää välipohjarakenteen päälle, mikä on tuotantoteknisesti tehokkaampi vaihtoehto. Tässä tapauksessa jäykistävien seinärakenteiden jäykkyys on suurempi, sillä kipsilevyillä jäykistettyjen rankaseinien kokonaiskorkeus on pienempi kuin tapauksessa, jossa lattiarakenne kiinnitetään tilaelementin ulkoseinien kylkeen.

Tilaelementin lattiarakenne voidaan kiinnittää ulkoseinien kylkeen, jolloin vaakarakenteisiin eli lattiarakenteisiin ei pääse syntymään leimapaineesta johtuvaa painauma. Myös leikkausvoimien hallinta ja siirtäminen on tällä liitosratkaisulla tehokkaampaa. Vaikka seinärakenteiden suuremman kokonaiskorkeuden takia seinien jäykkyyden suhteen tällä liitosratkaisulla ei päästä yhtä korkeisiin arvoihin, niin tästä huolimatta kokonaisvaikasiirtymien hallinta on helpompaa. Tämä johtuu siitä, että kehäpalkin ja rankaseinän väliin ei synny murtorajatilassa liitossiirtymää toisin kuin tapauksessa, jossa lattiarakenne kiertopuu kehäpalkkeineen tulee jäykistävien rankaseinien alle. Tuotantoteknisesti tämän toteuttaminen on kuitenkin Lehdon tilaelementtitehtaalla haastavampaa. Tilaelementin rankaseinän ja kehäpalkin välisessä liitoksessa käytetään halkaisijaltaan 6 mm paksuja ruuveja k600 jaolla. Näin ollen K_u ja

K_{ser} siirtymäkertoimien arvot täytyy jakaa $k = 0,6$ m, jolloin saadaan metrikohtainen liitossiirtymän siirtymäkerroin.

Liitosten jäykkyydet voidaan ratkaista käyttäen kappaleessa kaksi esitettyjä liitossiirtymän kaavoja, jossa materiaalin tiheytenä käytetään C24 sahatavaran ominaistiheyttä $\rho_k = 420 \text{ kg/m}^3$.

Käyttörajatilassa liitossiirtymäkertoimen suuruudeksi saadaan kaavalla (5):

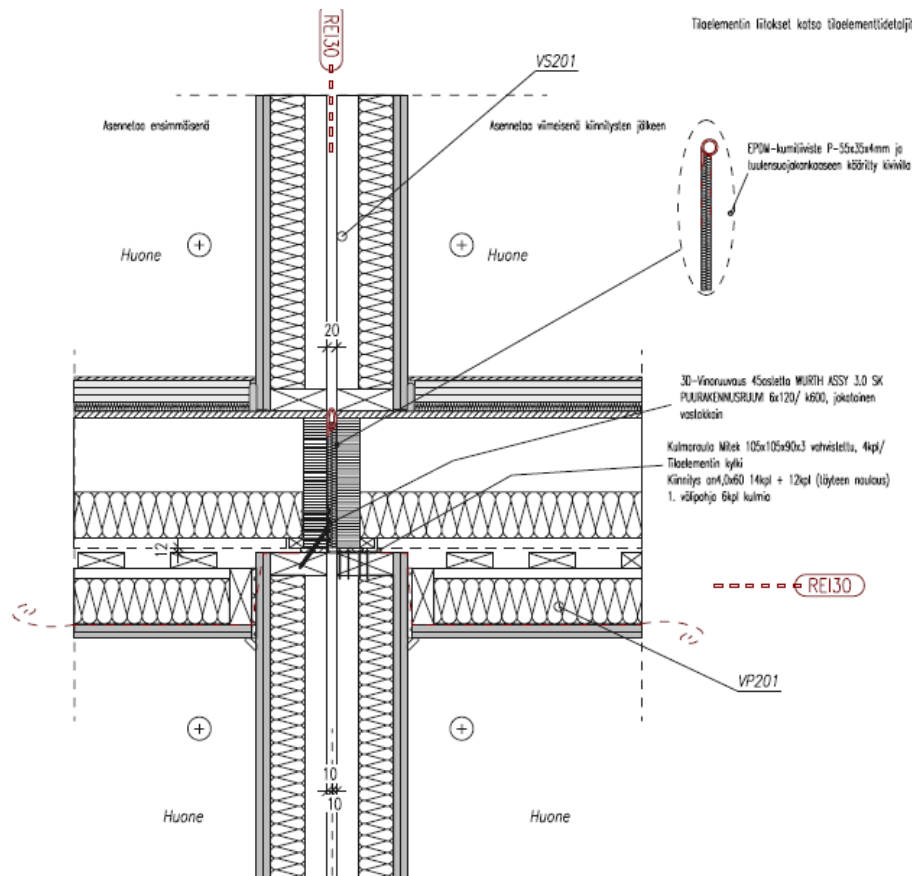
$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{k^{23}} \approx 3750 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (5)$$

Liitokseen on ruuvien lisäksi tehty myös liimaus, jolloin käyttörajatilan mitoituksessa liitoksen voi olettaa jäykäksi. Murtorajatilassa liitossiirtymän kerroin on kaavan (6) mukaisesti:

$$K_u = \frac{2}{3} * K_{ser} \approx 2500 \frac{\text{N}}{\text{m}}. \quad (6)$$

Liitokseen on ruuvien lisäksi tehty myös liimaus, jolloin käyttörajatilan mitoituksessa liitoksen voi olettaa jäykäksi.

Kuvaa 24 voidaan käyttää havainnollistamisessa; Seinärakenteen ja kertopuusta valmistettujen kehäpalkkien liitoksiin syntyy liitossiirtymää sekä palkin yläreunaan että päällekkäisten tilaelementtien väliseen liitokseen palkin alareunassa. Kohtia, joihin muodostuu liitossiirtymää, syntyy tällä liitostavalla kaksi kertaa enemmän kuin asentamalla lattiarakenteet seinien kylkeen kiinni.



Kuva 24. Tilaelementtien välinen liitos, lattiarakenne seinärakenteiden alla. (Huom. Tässä työssä tutkitussa rakemmeratkaisussa lattia liittyy seinän kylkeen)

Puurakenteisiin syntyy painumista sekä rakennuksen massasta johtuvasta kokoonpuristumisesta että puun kuivumisesta johtuvasta kutistumisesta. Puun muodonmuutos molempien tapausten suhteen on huomattavasti merkittävämpää puun poikkisuunnassa kuin pituussuunnassa eli syysuunnassa. Pääsääntöisesti painumista syntyy siis välipohjien vaakapuiden kohdalla, etenkin silloin kun ne tulevat pystysuuntaisten kantavien rakenteiden väliin. Näin ollen yllä olevan kuvan 24 tapauksessa painumisesta johtuva siirtymä on huomattavasti suurempaa kuin liitosratkaisussa, jossa lattiarakenne kiinnitetään seinärakenteen kylkeen. Painumien suhteen on tärkeää huomioida, että ylempiin kerroksiin mentäessä painumien vaikutukset kertautuvat. (Puuinfo 2020)

Kun kantavien pystyrakenteiden alla on vaakarakenteita, välittyä pystyrakenteiden vastaanottamat kuormat alla oleviin vaakarakenteisiin. Tämä johtaa siihen, että etenkin korkeissa rakennuksissa vaakarakenteisiin syntyvät leimapaineet kasvavat niin korkeiksi, että niistä tulee mitoituksen määräävä tekijä.

Yllä läpi käydyn pohdinnan tuloksena voidaan todeta, että etenkin korkeammissa puukerrostaloissa rankaseinän ja lattiarakenteen liitos on rakennuksen toiminnan kannalta huomattavasti parempi toteuttaa ratkaisulla, jossa tilaelementin lattiarakenne kiinnitetään seinärakenteen kylkeen kiinni.

3.5.2 Tilaelementtien väliset liitokset

Tilaelementtien välisiä liitoksia ovat joko päällekkäisten tilaelementtien väliset liitokset tai vierekkäisten tilaelementtien väliset liitokset. Päällekkäiset tilaelementit kiinnitetään toisiinsa ruuveilla tai naulalevyliitoksilla. Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan ruuviliitoksia tilaelementtien välillä. Vierekkäisten tilaelementtien liitoksissa käytetään naulauslevy- tai puskuliitoksia.

Päällekkäisten tilaelementtien välisten liitosten siirtymäkertoimien arvot voidaan ratkaista kappaleessa 2 esitettyjen kaavojen (5) ja (6) avulla. Lehto Group Oyj:n puutilaelementtien välisissä saumoissa käytetään 6 millimetriä halkaisijaltaan olevia ruuveja, joiden asennusjako on k600. Näin ollen K_u ja K_{ser} siirtymäkertoimien arvot täytyy jakaa $k = 0,6$ m, jolloin saadaan metrikohtainen liitossiirtymän siirtymäkerroin. Puuosa tässä tapauksessa on C24 sahatavaraa, joten tiheyden arvoksi tulee $\rho_m = 420 \text{ kg/m}^3$. Näin ollen ratkaistaan seuraavat kaavat käyttörajatilassa (5) ja murtorajatilassa (6)

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1.5} \cdot \frac{d}{23}}{k} \approx 3750 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \frac{\text{mm}}{\text{m}} \quad (5)$$

$$K_u = \frac{2}{3} * K_{ser} \approx 2500 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (6)$$

Keskikäytävä on liitetty puskuliitoksin tilaelementteihin ja jäykistyskuormat siirretään keskikäytäväarakenteen avulla, jolloin sen katsotaan toimivan kuormia siirtävän palkin tavoin.

4 JÄYKISTÄVÄT JA KANTAVAT RAKENTEET FEM-MALLISSA

Peruseriaatteena on yksittäisen rakenneosan tasolla laskea käsin tai vaihtoehtoisesti käyttää kokeellisesti määritettyjä rakenneosan jäykkyysominaisuuksia. Tämän jälkeen FEM-ohjelmistossa luodaan vastaava kappale rakenneosalle. FEM-laskentamalliin luodaan kuorielementti, jonka paksuus, liuku- ja kimmomoduulit säädetään siten, että siirtymät ja muodonmuutokset vastaavat käsin laskentaa. Kun verifiointi on rakenneosalle tehty, voidaan vastaava rakenne luoda FEM-ohjelmistossa.

4.1 Rakenneosien laskelmat ja ominaisuudet

Lehdon puutilaelementeissä seinärakenteiden rankajakona käytetään pääasiassa 600 mm tai 300 mm jakoa. K300 rankajaolliset seinät on pääsääntöisesti käytössä alempien kerrosten tilaelementtien seinissä ja k600 jaollisia ylemmissä kerroksissa. Tämän työn tyyppikerrostalon FEM-laskentamallin tarkastelussa käytetään rankajakona jokaisessa kerroksessa 300 mm.

4.1.1 Sahatavara C24

Seinien rankarunko koostuu C24 sahatavarasta ja rungon oleelliset materiaaliominaisuudet on esitetty alla (RIL 205-1-2017):

kimmomoduuli on $E_{0,mean} = 11\,000$ MPa,

liukumoduuli on $G_{mean} = 690$ MPa ja

tiheys on $\rho = 420$ kg/m³.

Sahatavarasta valmistetun rankarunгон yksittäiselle tolapalle käytettävä profiili on 48x123.

4.1.2 Kipsilevytys

Kipsilevyjen lujuus- ja jäykkyysominaisuudet on määritetty Gyproc 2021 -käsikirjassa annettujen arvojen perusteella. Tilaelementtien seinärakenteet jäykistetään kipsilevyillä, jotka kiinnitetään joko hakasilla tai ruuvikiinnityksillä rankarunkoon. Tässä työssä käytetään liitostyyppinä ruuvikiinnitystä 100 mm ruuvausjaoilla. Kipsilevytyyppinä

seinärakenteissa käytetään Gyproc GR 13 W -levytyyppiä ja ruuveina Wurth 3.9x35 ruuveja. Kyseinen kipsilevy soveltuu käyttöluokan 1 rakenteisiin.

Alla on esitetty kyseisen levytyksen jäykkyy- ja lujuusominaisuudet (Gyproc 2021):
kimmomoduuli pituussuuntaan on $E_0 = 3500 \text{ N/mm}^2$ ja
kimmomoduuli poikkisuuntaan on $E_{90} = 2600 \text{ N/mm}^2$.

Ruuvauksen ominaisuudet ovat seuraavanlaiset:
ominaisleikkauslujuus on $F_{f,Rk,liitin} = 0,911 \text{ kN}$,
siirtymäkerroin on $K_{ser,i,liitin} = 1780 \text{ N/mm}$ ja
liitinjako: $s_i = 100 \text{ mm}$.

Kipsilevyn ominaisuudet ovat seuraavanlaiset:
levyn paksuus on $t_i = 13 \text{ mm}$,
liukumoduuli on $G_{mean,i} = 690 \text{ N/mm}^2$,
kipsilevyn leveys: $b_i = 1200 \text{ mm}$ ja
kipsilevyn korkeus: $h_i = 3150 \text{ mm}$.

Yksittäiselle 1200x2850 levyllä jäykkyydeksi käyttörajatilassa saadaan

$$C_{i,v} = 1997,95 \text{ N/mm}$$

ja kapasiteetiksi eli leikkausvoimakestävyyden mitoitusarvoksi saadaan

$$F_{i,v,Rd} = 11,69 \text{ kN}.$$

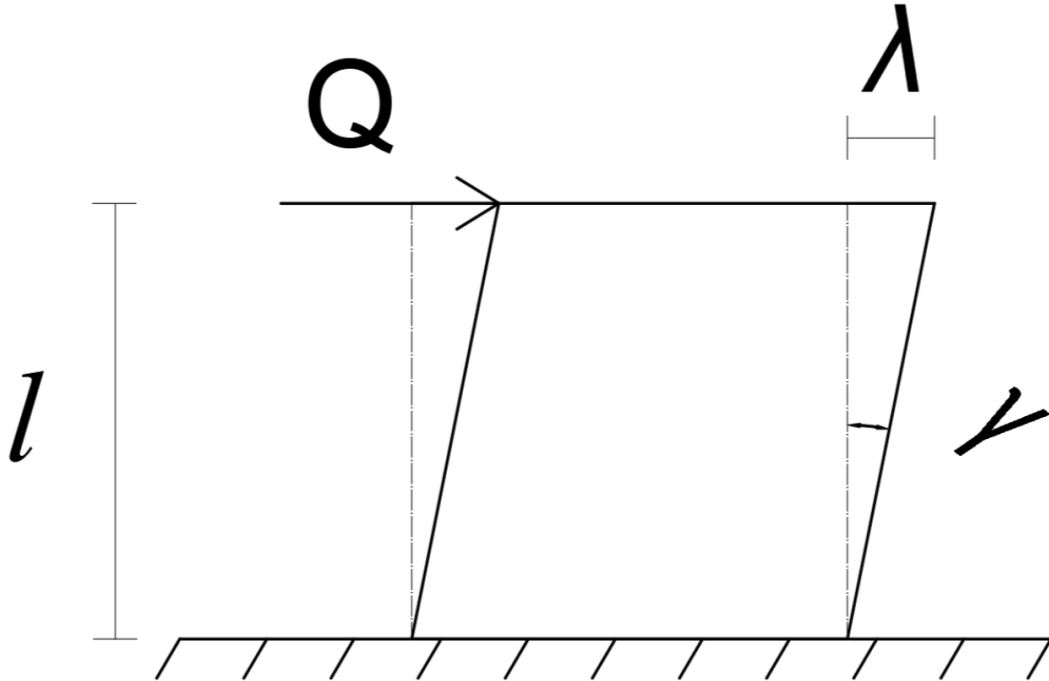
Levytyksen jäykkyyden ja kapasiteetin laskenta on suoritettu analyyttisesti, ja laskenta on esitetty vaiheineen liitteessä 1.

4.2 Rakenneosien soveltaminen FEM-malliin

Edellä läpikäytyille rakennratkaisuille täytyy määrittää FEM-laskentamalliin sellaiset ominaisuudet, että rakenne saadaan siirrettyä FEM-laskentamalliin siten, että se käyttäytyy todellisen rakenteen tavoin.

4.2.1 Seinärakenteiden ominaisuudet FEM-laskentamallissa

Aiemmin määritetyn kipsilevytyksen jäykkyyden C arvon avulla saadaan määritettyä FEM-laskentamalliin lisättävän kuorielementin liukukertoimen G arvon.



Kuva 25. Leikkausmuodonmuutos levyssä. (mukaiillen Tekniikan kaavasto)

Yllä oleva kuva kuvastaa yksittäisen levyn leikkausmuodonmuutosta. FEM-laskentamallin seinärakenteen liukumoduuli saadaan selvitettyä kaavasta (Tekniikan kaavasto):

$$G = \frac{Q \cdot l}{\lambda \cdot A}, \quad (9)$$

missä λ on siirtymä [mm],

Q on levyn kohdistuva kuorma [N],

l on levyn korkeus [mm] ja

A on levyn profiilin pinta-ala ylhäältä päin [mm²].

FEM-laskentamallin kuorielementin paksuus on 150 mm ja yksittäisen kipsilevyn pituus on 1200 mm, joten profiilin pinta-ala on näiden kahden lukuarvon tulo.

Koska levyn jäykkyys saadaan jakamalla kuorma sen aiheuttamalla siirtymällä niin

$$C = \frac{Q}{\lambda} \leftrightarrow \lambda = \frac{Q}{C}, \quad (10)$$

missä λ on siirtymä [mm],
 Q on levyyn kohdistuva kuorma [N] ja
 C on levyn jäykkyys [N/mm].

Tämän avulla liukukerroin saadaan laskettua kaavalla:

$$G = C * \frac{1}{A} = 1997,95 \frac{\text{N}}{\text{mm}} * \frac{3150 \text{ mm}}{150 \text{ mm} * 1200 \text{ mm}} = 35,0 \text{ MPa}. \quad (11)$$

Seinä rakenteita kuvaavien kuorielementtien kimmomoduulin määrittämiseen tarvitaan C24 sahatavaran kimmomoduulia, joka on $E = 11000 \text{ MPa}$. Kun rankajako runkotolpilla on k300 yhden kipsilevyn kohdalle eli 1200 mm matkalle mahtuu neljä runkotolppaa. Kun yksittäisen tolpan profiili on 48x123, niin runkotolppien profiilin kokonaispinta-ala on 1200 mm matkalla on

$$A = 4 * 48 \text{ mm} * 123 \text{ mm} = 23\,616 \text{ mm}^2.$$

FEM-laskentamallin 1200 mm pituisen seinärakenteen yläpinnan profiili on 150x1200 joten:

$$A = 150 \text{ mm} * 1200 \text{ mm} = 180\,000 \text{ mm}^2.$$

Edellä ratkaistujen arvojen avulla saadaan ratkaistua kimmomoduuli kaavalla:

$$E = \frac{11000 \text{ MPa} * 23\,616 \text{ mm}^2}{180\,000 \text{ mm}^2} \approx 1440 \text{ MPa}.$$

Kuorielementin tiheys saadaan laskettua todellisen seinärakenteen omapainon avulla. Ensiksi omapaino täytyy jakaa putoamiskiihtyvyydellä, jolloin omapainon arvoksi saadaan: $0,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} / g = 40,77 \text{ kg/m}^2$. Putoamiskiihtyvyydellä jaetun omapainon avulla saadaan FEM-laskentamallin kuorielementin tiheyden arvo kaavasta:

$$\rho = \frac{40,77 \text{ kg/m}^2}{0,15 \text{ m}} = 272 \text{ kg/m}^3.$$

Alla on kuvakaappaus tilaelementin rankarunkoista, kipsilevyjäykisteistä seinärakennetta vastaavan kuorielementin äsken määritetyt jäykkyyden arvot syötettyinä FEM-Designiin.

Direction:	0°	90°
Em,k [N/mm2]	1440	1.000e-07
Et,k [N/mm2]	1440	1.000e-07
Ec,k [N/mm2]	1440	1.000e-07
Gr,k [N/mm2]	1.000e-07	1.000e-07
Gv,k [N/mm2]	35.0	
rho [kg/m3]	272	

Kuva 26. Kuorielementtiseinäen jäykkyyden arvot.

4.2.2 Lattiarakenteiden ominaisuudet FEM-laskentamallissa

Välipohjat levytetään OSB/3 luokan levyin, joten lattiaan syntyy levykenttä. Tällöin vaakatasossa OSB-levyjä on useampia sekä x- ja y-suunnassa. Tässä tilanteessa levyjäykistys ei toimi täysin samalla tavalla kuin seinärakenteiden tapauksessa, jossa kerroskohtaisesti korkeussuunnassa on vain yksi kipsilevy. Laskentamalliin kuitenkin tehdään yksinkertaistus, jossa ala-, väli- ja yläpohjan kuorielementti määritetään todelliseen lattiarakenteeseen tulevan OSB-levyn jäykkyysominaisuuksien perusteella. OSB/3 luokan levyn jäykkyysominaisuudet ja ominaistiheys on esitetty alla (RIL 205-1-2017):

Taivutuksen kimmomoduulit ovat

pääsuunnassa $E_{m,0} = 4930 \text{ N/mm}^2$ ja

kohtisuorassa suunnassa $E_{m,90} = 1980 \text{ N/mm}^2$.

Puristuksen ja vedon kimmomoduulit ovat

pääsuunnassa $E_{c,t,0} = 3800 \text{ N/mm}^2$ ja

kohtisuorassa suunnassa $E_{c,t,90} = 3000 \text{ N/mm}^2$.

Liukumoduulit ovat

paneelileikkauksen suunnassa $G_v = 1080 \text{ N/mm}^2$ ja

tasoleikkauksen suunnassa $G_r = 50 \text{ N/mm}^2$.

Ominaisihteys rakenteelle on $\rho = 550 \text{ kg/m}^3$.

Alla on kuvakaappaus tilaelementin lattiarakennetta vastaavan kuorielementin äsken määritetyt jäykkyyden arvot syötettyinä FEM-Designiin.

Direction:	0°	90°
Em,k [N/mm2]	4930	1980
Et,k [N/mm2]	3800	3000
Ec,k [N/mm2]	3800	3000
Gr,k [N/mm2]	50.0	50.0
Gv,k [N/mm2]	1080	
rho [kg/m3]	550	

Kuva 27. Kuorielementti lattiarakenteissa.

Sillä lattiarakenteen kuorielementin tiheys ja paksuus on määritetty OSB-levyn ominaisuuksien perusteella, lattiarakenteen omapaino laskentamallissa on eri kuin todellisella rakenteella. Tämä täytyy kompensoida lisäämällä FEM-laskentamalliin jäljelle jäävän omapainon osuus pinta-alakuormana jokaiseen kerrokseen. Tämä esitetään tarkemmin kappaleessa 6 Tyypipuukerrostalon kuormat.

5 TYYPPIPUUKERROSTALON FEM-LASKENTAMALLI

Tässä kappaleessa käydään yksityiskohtaisesti läpi, kuinka FEM-design -laskentaohjelmistoon luodaan tarkastelun kohteena olevan puisen tilaelementtikerrostalon laskentamalli. Mallinnettavat rakenteet ja niiden keskinäiset liitokset, ja liitosten toimintaperiaatteet avataan tässä osiossa.

Seinäarakenteiden kuormia kantavat runkotolpat jakautuvat tasaisesti todellisessa rakenteessa koko seinän pituudelle. Laskentamallissa kyseiset seinät mallinnetaan kuorielementteinä, joten malliin syntyviä pystykuormia täytyy käsitellä metrikohtaisina viivakuormina.

FEM-mallissa ideana on luoda pelkistetty malli todellisesta rakennuksesta, mutta kuitenkin sellainen, että ominaisuuksiltaan sekä toimivuudeltaan laskentamalli vastaa todellista rakennusta. FEM-ohjelmaan mallinnetaan vain ne rakenteet, joilla on merkitystä rakennuksen toiminnan kannalta eli kuormia vastaanottavat tai siirtävät rakenteet.

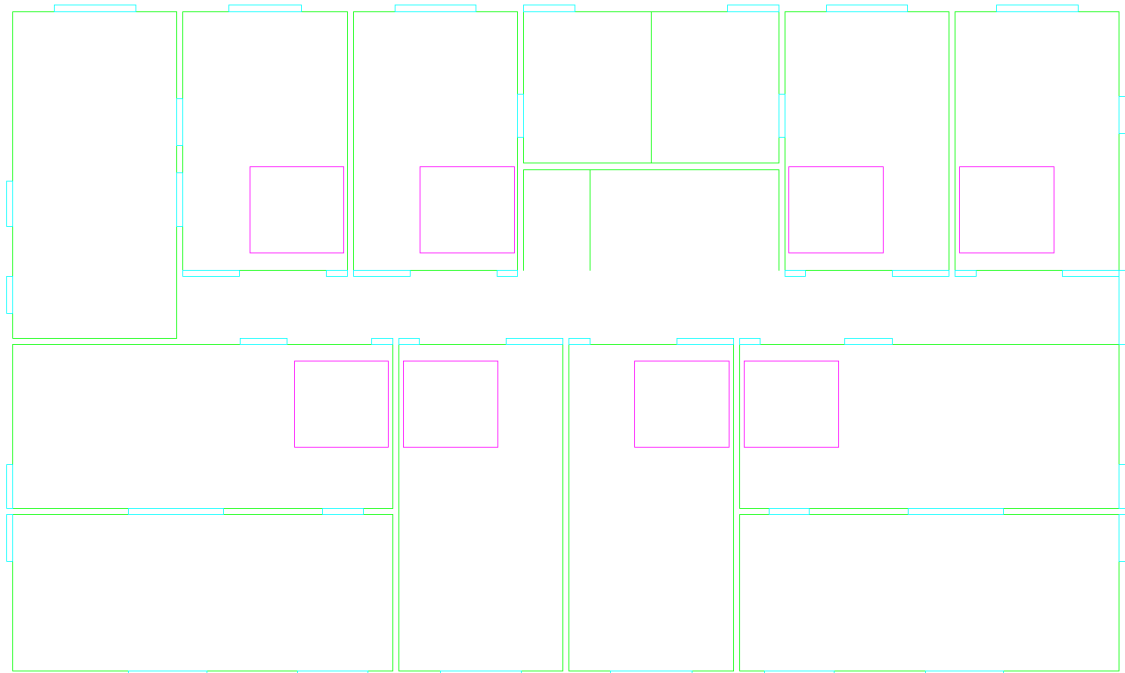
5.1 Pohjapiirustus

Prosessi laskentamallin luomiselle lähtee pohjakuvan luomisesta. Pohjakuvan luomiseen on käytetty Autodeskin AutoCad -ohjelmistoa. Toimivuuden ja tarkkuuden kannalta tärkeintä on saada seinien, jotka toimivat jäykistävinä, pituudet vastaamaan mahdollisimman paljon todellisuutta. Ensiksi näin ollen täytyy mitata rakennuksen pohjapiirustuksesta seinäarakenteiden pituudet aukkojen/nurkkien väliltä, ja saada ne vastaavan mittaisiksi FEM-designiin siirrettävän pohjan kanssa. Jäykistämistä ajatellen liian lyhyet, alle 600 mm pitkät seinärakenteet jätetään huomioimatta.

Sillä FEM-ohjelmaan siirrettävä pohjakuva on piirretty ohuin viivoin, tulee tilaelementtien kokonaismitoissa pientä epätarkkuutta, ja näin ollen laskentamallin rakennus on mitoiltaan hieman eri kuin todellisuuudessa. Tämä ei kuitenkaan haittaa, sillä seinäarakenteiden pituuksien perusteella laskennan tulokset määräytyvät. Tarkoituksena on kuitenkin tästä huolimatta luoda tilaelementtejä kuvaavat suorakulmiot mahdollisimman lähelle todellista mittaa.

Tilaelementtejä kuvaaviin suorakulmioihin mitataan aukottomien jäykistysseinien todelliset mitat. Tilaelementteihin tulevat aukot mallinnetaan jäykistävien seinien mittojen suhteen oikeaan paikkaan, jolloin aukkojen mitat poikkeavat hieman todellisesta tilanteesta. Näin ollen aukkojen avulla saadaan kompensoitua suorakulmion ja tilaelementin välistä virhettä.

Märkätilojen kohdalla lattiarakenne poikkeaa tilaelementin muusta lattiarakenteesta, joten pohjakuvaan piirretään märkätilaa vastaavat suorakulmiot huoneistojen märkätilojen kohdalle. Kun pohjakuva on luotu, tuodaan se FEM-designiin.



Kuva 28. Pohjakuva FEM-malliin. Vihreät viivat kuvaavat seinärakenteita, siniset kuvaavat aukkoja ja violetit märkätiloja.

5.2 Rakenteet ja liitokset

Kappaleessa 4 on käyty läpi tyyppikerrostalon eri rakenneosien jäykkyysominaisuudet, ja tämän lisäksi niille on määritetty FEM-laskentamalliin tuotavien vastaavien rakenneosien samat ominaisuudet. Näillä määritetyillä jäykkyysominaisuuksilla olevat rakenteet mallinnetaan FEM-laskentaohjelmaan. Mallinnettavia rakenneosia ovat kantavat ja jäykistävät seinät, ala- väli- ja yläpohjat, tilaelementtien nurkkapilarit sekä kehäpalkit. Näiden lisäksi perustuksia vastaavat viiva- ja pistetuet lisätään laskentamalliin.

5.2.1 Seinärakenteet

FEM-laskentamalliin luodaan tilaelementtien ulkoseinät eli rakennuksen ulkoseinät, huoneistojen väliset seinät, huoneiston ja rappukäytävän väliset seinät sekä hissikuilun/portaikon seinät. Kantavien seinien rakenneratkaisuissa kappaleen rakennetyyppien mukaisesti on jokaisella seinätyypillä kantavan rankarungon profiili 48x123 ja tolppajako 300 mm tai 600 mm, joten kyseisten seinätyyppien tiheydet ja jäykkyysominaisuudet ovat keskenään lähes yhtä suuret. Sillä laskentamalli luodaan siten, että käytetään jokaisessa kerroksessa k300 runkotoioppajakoa, voidaan kaikille kantaville seinille käyttää samaa kuorielementtityyppiä. Näin FEM-malli saadaan pidettyä seinärakenteiden suhteen selkeänä ja yksinkertaisena, mikä nopeuttaa ja helpottaa mallin muokattavuutta ja laskentatulosten tulkitsemista.

Seinärakenteita vastaavien kuorielementtien tekemiseen käytetään FEM-design -ohjelmalla Timber wall -työkalua, jossa materiaalin jäykkyysominaisuuksiin sijoitetaan kappaleessa 4 määritetyt arvot. Laskentamalliin lisätään tilaelementtien ulkoseinät sekä porras- ja hissikuilun kantavat ja jatkuvat seinälinjat. Kerrosväli tarkastelun kohteena olevassa tilaelementtikerrostalossa on 3,15 metriä, joten tämä määritetään laskentamalliin seinärakenteiden korkeudeksi.

Seinien reunojen liitokset ovat nivelellisiä jousiliitoksia. Tämä täytyy huomioida etenkin päällekkäisten seinärakenteiden kohdalla, jotta liitoksen jäykkyys ei vääristy malliin. Seinärakenteille määritetään liitosten ominaisuudet ala- ja yläreunalle sekä seinän pystysuuntaisille reunoille.

Seinärakenteen alareunojen liitokset määritetään jäykkänä nivelellisenä liitoksena, josta vapautetaan seinäelementin koordinaatiston y-suuntainen veto, tällöin ylempi rakenne pääsee irtoamaan alemmasta rakenteesta nosteen seurauksena. Näin nosteet saadaan siirrettyä tilaelementtien nurkkapilarien kautta, sillä rankaseiniä ei oleteta ottavan vastaan tai kestävän nostetta.

Seinäelementtien yläreunan sekä pystysuuntaisten reunojen liitokset määritetään nivelellisenä liitoksena, jossa seinän reunan suuntainen jäykkyys tulee aiemmin määritetyn K_{ser} -liitossiirtymän mukaisesti. Murtorajatilassa siirtymäkertoimen arvo on $K_u = 2500 \frac{N/mm}{m}$ ja käyttörajatilassa $K_{ser} = 3750 \frac{N/mm}{m}$.

Tuulikuormaa vastaanottavalle sivuille eli rakennuksen jokasivulle täytyy tilaelementtien tuulta vastaan ottaville seinälinjoille FEM-designin cover -työkalulla lisätä kuoret. Tämä johtuu siitä, että ilman niitä tuulikuorma aiheuttaisi seinään taivutusta, joka väärentäisi tilannetta. Kantavaan seinärunkoon kiinnitetään ei-kantava julkisivuelementti, joka siirtää tuulen aiheuttamat vaakasuuntaiset kuormat kantavan seinän ylä- ja alareunaan ja sitä kautta vaakarakenteille. Tuulikuorma saadaan kuori -työkalun avulla siirrettyä kantavan seinäelementin ylä- ja alareunan liitoksille, jolloin FEM-malliin saadaan tuulikuormaa vastaanottavat seinärakenteet toimimaan todellisen rakenteen tavoin. Kuormankantosuunta kuorille on pystysuuntainen ja kuoret tukeutuvat ala ja yläreunasta vaakasuuntaisille liitoksille.

5.2.2 Lattiarakenteet

Lattiarakenteet mallinnetaan kuorielementteinä, joiden tekemiseen käytetään FEM-designissa Timber wall -työkalua. Kuorielementeille syötetään kappaleessa 4 määritetyt jäykkyysominaisuudet. Ala- väli- ja yläpohjien mallintamiseen käytetään ominaisuuksiltaan samanlaisia kuorielementtejä, sillä kyseessä olevien vaakarakenteiden rakenneratkaisujen jäykkyysominaisuudet ja omapainot ovat lähes yhtä suuria.

Lattiarakenteiden reunojen liitokset toteutetaan laskentamallissa nivelellisinä jousiliitoksina. Lattioiden kantosuunta määritetään siten, että lattiarakenteisiin kohdistuvat kuormat siirtyvät kuorielementin pidemmille reunoille eli tilaelementin pidemmille seinälinjoille. Reunat määritetään jokaiselle lattiarakenteelle jäykkinä nivelellisinä liitoksina.

Laskentamalliin vierekkäisten tilaelementtien väliin jää 150 mm, mikä todellisessa rakennuksessa on huoneistojen välisen seinän kantavien rankarunkojen keskinäinen etäisyys. Jotta laskentamalliin ei koostu useita yksittäisiä tilaelementtitorneja, täytyy vierekkäiset tilaelementit sekä porras- ja hissikulun seinärakenteet saada kytkettyä toisiinsa. Tämä tehdään lisäämällä kuorielementtikaistaleet jokaiseen seinien väliseen rakoon, lattia- ja vesikattorakenteiden kanssa samaan tasoon. Kuorielementtikaistaleet tehdään samalla kuorielementtityypillä kuin ala-, väli- ja yläpohjat. Näiden reunat määritetään muiden lattiarakenteiden kanssa samoin.

5.2.3 Nurkkapilarit

Nurkkapilarit mallinnetaan jokaisen tilaelementin nurkkaan. Liimapuupalkin lujuusluokka on GL30c ja sen profiili on 115x180. Nurkkapilareiden ylä- ja alapään liitosten jäykkyysominaisuudet tulevat Lehdon kehittämän U-profilin teräslitoksen perusteella, jotka ovat esitetty jo aiemmin tässä työssä kappaleessa 4. Testituloksista saadut leikkausvoimarasituksen $K_{V,ser} = 7620 \text{ N/mm}$ ja vetokuormarasituksen $K_{T,ser} = 25800 \text{ N/mm}$ siirtymäkertoimet lisätään pilareiden toisen pään ominaisuuksiin/ehtoihin. X-suuntaiseen päädyn jäykkyysominaisuuteen lisätään vetorasituksen siirtymäkerroin ja Y-suuntaiseen lisätään leikkausrasituksen siirtymäkerroin.

5.2.4 Kehäpalkit

Kehäpalkit mallinnetaan jokaisen tilaelementin yläpohjan ulkoreunalle. Ne ovat materiaaliltaan Kerto-S viilupuuta ja profiililtaan ne ovat 51x280. Kehäpalkin päätyjen liitokset asetetaan toimimaan nivelellisen liitoksen tavoin.

5.3 Perustukset

Perustukset mallinnetaan jokaisen kantavan seinälinjan alle viivatukena (line support group). Viivatuet lisätään jokaisen tilaelementin ulkolinjan sekä portaikon ja hissikuilun kantavien seinien alle. Sillä tuulikuorma aiheuttaa nostevoimia kantaviin rakenteisiin, ja nämä voimat pyritään ottamaan tyyppikerrostalossa vastaan ankkuroimalla tilaelementtien nurkat, jolloin nostevoimat saadaan otettua vastaan nurkkapisteistä.

Alimman kerroksen tilaelementtien nurkkapisteisiin lisätään pistetuet, jotka ottavat vastaan nostevoimia, eli ankkuroivat kerrostalon eri rakenneosat nurkista tai seinälinjojen päistä.

6 TYYPPIPUUKERROSTALON KUORMAT

Kappaleessa määritetään tyypikerrostaloon kohdistuvat kuormat ja kuormitustapaukset sekä esitetään, kuinka FEM-laskentamalliin lisätään määriteltävät vaaka- ja pystysuuntaiset kuormat ja niiden suuruudet. Rakennukseen kohdistuvat kuormat lasketaan analyttisesti RIL 205-1 Puurakenteiden suunnitteluohjeen laskentaperusteiden mukaisesti. Tämän lisäksi määritellään käytettävät kuormitusyhdistelmät.

6.1 Aikaluokat ja käyttöluokat

Kuormat voidaan jakaa eri aikaluokkiin niiden vaikuttavan ajan keston perusteella. Aikaluokkia on yhteensä viisi: Pysyvä, pitkäaikainen, keskipitkä, lyhytaikainen ja hetkellinen. Pysyvään aikaluokkaan kuuluvat ne kuormat, jotka kuormittavat rakennetta jatkuvasti vähintään 10 vuoden ajan. Pysyvään aikaluokkaan kuuluu rakenteen oma paino ja esimerkiksi kevyet väliseinät ja muut pysyvästi kiinnitetyt laitteet ja koneet. Pitkäaikaisen kuorman vaikutusaika on puolesta vuodesta 10 vuoteen, ja kuormia ovat esimerkiksi varastojen tavarakuormat. Keskipitkän aikaluokan kuormien vaikutusaika on kuukaudesta puoleen vuoteen. Esimerkkinä keskipitkän aikaluokan kuormasta on lumikuorma. Lyhytaikaisen aikaluokan kuormien vaikutusaika on alle yksi viikko, ja kuormia ovat esimerkiksi huoltokuorma rakennuksen katolla. Hetkellisen aikaluokan kuorman vaikutusaika on nimensä mukaisesti hetkellinen. Tähän aikaluokkaan kuuluvat tuulikuormat ja onnettomuuskuormat. (Ympäristöministeriö 2016)

Rakenteiden käyttöluokkia on kolme, ja ne määritetään ympäristöolosuhteiden perusteella siten, että käyttöluokassa 1 ympäristöolosuhteet ovat suotuisimmat ja käyttöluokassa 3 haastavimmat. Käyttöluokkajärjestelmä on tarkoitettu lujuusarvojen jaottelua varten ja määritellyissä ympäristöolosuhteissa syntyvän muodonmuutoksen laskemisen vuoksi. (Ympäristöministeriö 2016)

6.2 Kuormitustapaukset

Tyypikerrostalon sivujen ulkomitat ovat 27 metriä ja 16 metriä ja korkeus on 27,2 metriä. Edellä mainitut mitat ovat pyöristettyjä laskennan selkeyden vuoksi, ja tulosten suhteen on varmistettu, ettei tästä seuraa tulosten suhteen merkittävää virhettä.

FEM-laskentamalliin määritettäviä kuormitustapauksia ovat Rakenteiden omapainot, hyötykuormat, lumikuorma, tuulikuormat rakennuksen jokaiselle sivulle sekä lisävaakavoimat.

6.2.1 Omapaino

Omapainolla tarkoitetaan rakenteiden massasta johtuvaa kuormitusta. Omapaino kuuluu pysyvään aikaluokkaan.

Suurin osa FEM-laskentamallin omapainoista määräytyy mallinnettavien rakenteiden ominaisuuksien perusteella. Kerrostaloissa on myös rakenteita, joilla ei katsota olevan merkitystä rakennuksen lujouden, jäykkyyden tai kestävyuden suhteen, mutta nämä rakenteet lisäävät silti rakennuksen kokonaispainoa, täytyy ne huomioida laskennassa. Tästä syystä laskentamalliin lisätään joko viiva- tai pinta-alakuormina näiden rakenteen omasta painosta johtuvat kuormat. Kuormiksi FEM-malliin lisätään kylpyhuonelaatan omapaino pinta-alakuormana ja julkisivuelementtien omapainot viivakuormana kerrosten ulkoreunoille.

Sillä lattiarakenne laskentamalliin määritettiin kappaleessa 5 OSB/3 levyn ominaisuuksien perusteella, täytyy omapainoon lisätä pinta-alakuormana lattiarakenteen omapaino ilman OSB/3 levyä. OSB-levyn tiheys on 550 kg/m^3 ja paksuus $0,15 \text{ m}$, joten sen omapaino on

$$550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,15 \text{ m} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}.$$

Kun lattiarakenteen omapaino on $1,25 \text{ kN/m}^2$, niin malliin ala-, väli- ja yläpohjille lisättävän omapainon pinta-alakuorman suuruudeksi saadaan:

$$1,25 \text{ kN/m}^2 - 0,81 \text{ kN/m}^2 = 0,44 \text{ kN/m}^2.$$

Jotta rakennemalli saadaan pidettyä selkeämpänä ja helpommin muokattavana, FEM-malliin ei mallinnetta märkätilojen rakennetyypin ala- tai välipohjaratkaisua erikseen, vaan lisätään omapainojen erotuksen suuruinen kuorma omapainona märkätilojen kohdalle. Rakennetyypeissä esitetyn välipohjan märkätilan kohdalla omapaino on $2,8 \text{ kN/m}^2$ ja välipohjan asunnon kohdalla omapaino on $1,25 \text{ kN/m}^2$. Edellä mainittujen omapainojen erotuksesta saadaan kylpyhuoneiden kohdalle pinta-alakuormaksi:

$$2,8 \text{ kN/m}^2 - 1,25 \text{ kN/m}^2 = 1,55 \text{ kN/m}^2.$$

Lehdon puisten tilaelementtikerrostalojen julkisivuelementit ovat ei-kantavia, ja ne kiinnitetään tilaelementtien ulkoseiniin, jotka kantavat julkisivuelementtien painot. Tämä lisätään FEM-laskentamalliin viivakuormana rakennuksen ulkosivuille jokaiseen kerrokseen, sillä mallinnettujen seinärakenteiden ominaisuuksiin ole lisätty julkisivuelementtien painoa. Julkisivuelementin omapaino on $2,5 \text{ kN/m}^2$, joka halutaan muuttaa viivakuormaksi. Omapaino kerrotaan julkisivuseinäelementin paksuudella, joka on 0,31 metriä, joten näin ollen viivakuormaksi saadaan:

$$2,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 0,31 \text{ m} = 0,78 \text{ kN/m}.$$

6.2.2 Hyötykuormat

Hyötykuormalla tarkoitetaan kuormaa, joka syntyy rakennuksen tilojen käytöstä. Sille käytetään keskipitkää aikaluokkaa.

Taulukko 1. Hyötykuormien ominaisarvot (RIL 205-1-2017)

Kuormitettujen tilojen luokat	qk [kN/m ²]			Qk [kN] (portaot suluissa)
	välipohjat	portaot	parvekkeet	
Luokka A: Asunto- ja majoitustilat	2,0	2,0	2,5	2,0 (2,0)
Luokka B: Toimistotilat	2,5	3,0	2,5	2,0 (2,0)
Luokka C: Kokoontumistilat				
C1 Pöytäalueet	2,5	3,0	2,5	3,0 (2,0)
C2 Kiinteiden istuinten alueet	3,0	3,0	3,0	3,0 (2,0)
C3 Esteettömät alueet	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
C4 Liikuntatilat ja näyttämöt	5,0	3,0	5,0	4,0 (2,0)
C5 Tungoksille alttiit alueet	6,0	6,0	6,0	4,0 (2,0)
Luokka D: myymälätilat				
D1 Vähittäiskaupat	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
D2 Tavaratalot	5,0	6,0	5,0	7,0 (2,0)
Luokka E				
E1 Tavarantoimitus- ja säilytys	7,5	3,0		7,0 (2,0)
Luokka H: Vesikatot		0,4		1,0

Hyötykuorman ominaisarvo riippuu kyseessä olevan tilan käyttötarkoituksesta. Laskentamalliin se lisätään jokaisen asuinkerroksen lattiaa kuormittavaksi pinta- alakuormaksi. Asuinrakennuksille hyötykuorman suuruudeksi valitaan taulukon 1 mukaan

$$q_{k,hyöty} = 2,0 \text{ kN/m}^2.$$

6.2.3 Lumikuorma

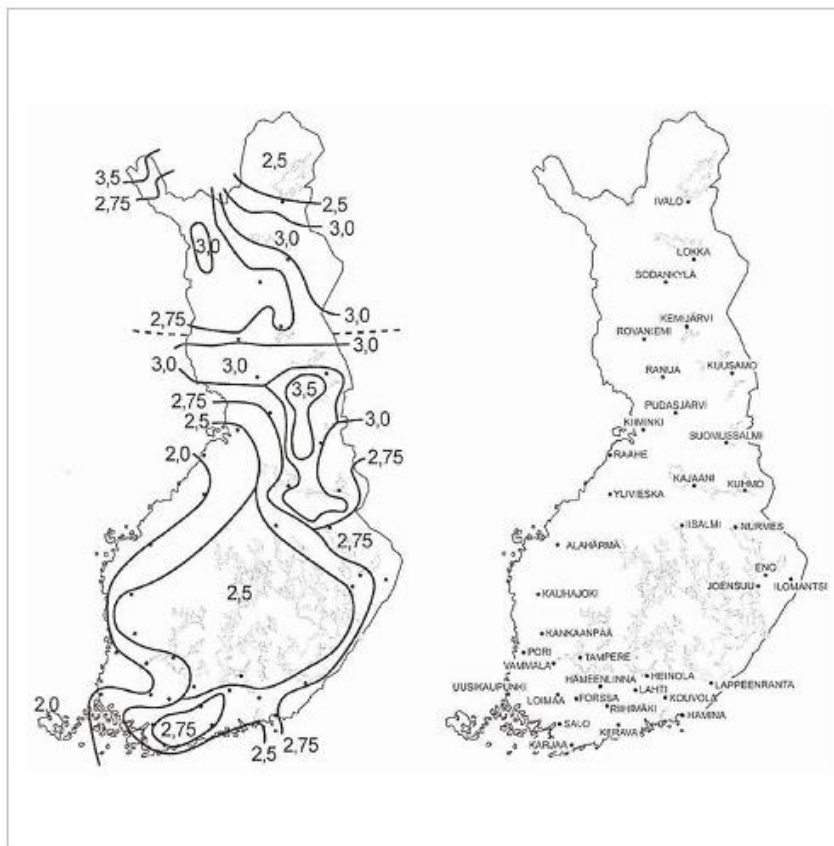
Sillä Suomessa voidaan ajatella satavan enintään puolen vuoden ajan, lumikuorman aikaluokka on keskipitkä. Lumikuorma suuruus määritetään kaavalla

$$s = \mu * C_e * s_k, \quad (12)$$

missä μ on lumikuorman muotokerroin,

C_e on tuulensuojakerroin ja

s_k on maanpinnan lumikuorman ominaisarvo [kN/m^2].



Kuva 29. Maanpinnan lumikuormien ominaisarvot s_k . (RIL 205-1-2017)

Maanpinnan lumikuorman ominaisarvoksi tyypikerrostalolle valitaan kuvan 29 perusteella $S_k = 2,75 \text{ kN/m}^2$. Oletetaan, että tyypikerrostalon rakennuspaikka on maastotyybiltään normaali, jolloin tuulensuojakerroin $C_e = 1$. Lumikuorman muotokertoimelle μ käytetään arvoa 0,8.

Kattoa kuormittavan lumikuorman arvoksi saadaan kaavan (12) avulla

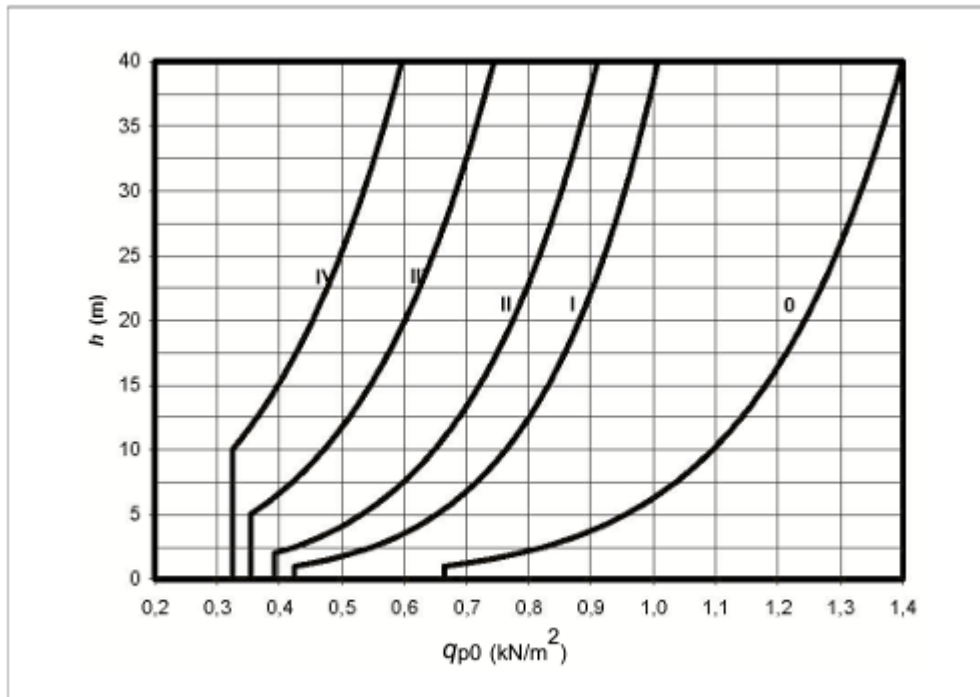
$$s = \mu * C_e * s_k = 2,2 \text{ kN/m}^2. \quad (12)$$

Lumikuorma lisätään laskentamallin yläpohjalle pinta-alakuormana.

6.2.4 Tuulikuorma

Tuulikuorma on tässä työssä ainoa rakennusta kuormittava ulkoinen vaakakuorma, joka otetaan laskennassa huomioon. Tuulikuormalle FEM-laskentamallin tarkastelussa käytettävä aikaluokka on hetkellinen. Tuulikuorma voi kuormittaa rakennusta jokaisen neljän sivun suunnasta, joille kaikille suunnille täytyy määrittää oma tuulikuormatapaus. Tämä johtuu siitä, että tyypikerrostalon pohjaratkaisu ei ole vastakkaisten sivujen suhteen symmetrinen, jolloin jokaista eri sivua kuormittava tuulikuorma aiheuttaa erilaiset kuormien ja voimien jakautumiset. Näin varmistetaan se, että suurimmat nosteet ja puristusvoimat ilmenevät FEM-laskentamallin murtorajatilan analysoinnissa, ja suurimmat kerroskohtaiset vaakasiirtymät sekä maksimivaakasiirtymä saadaan selvitettyä.

Tuulikuorman määrittämiseksi käytetään tässä työssä pintapainemenetelmää. Ensimmäisenä vaiheena on määrittää nopeuspaineen ominaisarvo alla olevasta kuvasta rakennuksen kokonaiskorkeuden ja maastoluokan avulla.



Kuva 30. Tuulen nopeuspaineen ominaisarvot $q_{p0}(h)$ eri maastoluokissa. (RIL 205-1-2017)

Alueet jaetaan maastoluokkiin niiden tuulisuuden ja avoimuuden/suojaisuuden perusteella. Maastoluokkia on yhteensä viisi kappaletta ja ne ovat: 0, I, II, III, IV. Maastoluokkaan 0 kuuluu avomeret tai merelle avoimet rannikot. Maastoluokkaan I kuuluvat järvet ja tasangot, joissa ei ole tuuliesteitä. Maastoluokkaan II kuuluvat alueet, joilla on matalaa kasvillisuutta sekä erillisiä esteitä kuten puita ja rakennuksia ja joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus. Maastoluokkaan III kuuluvat, alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai esteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi kylät, esikaupunkialueet tai pysyvät metsät. Maastoluokkaan IV kuuluvat ne alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 prosenttia on rakennusten peitossa ja joiden keskimääräinen korkeus on vähintään 15 metriä. (RIL 205-1-2017)

Tuulikuorman määrittämiseen tarvitaan rakennuksen hoikkuuslukua eli lambda-arvoa. Lambda-arvon määrittämiseen käytettävä kaava määräytyy rakennuksen kokonaiskorkeudesta:

$$\lambda = \frac{2h}{b} \quad \text{kun } h \leq 15 \text{ m}$$

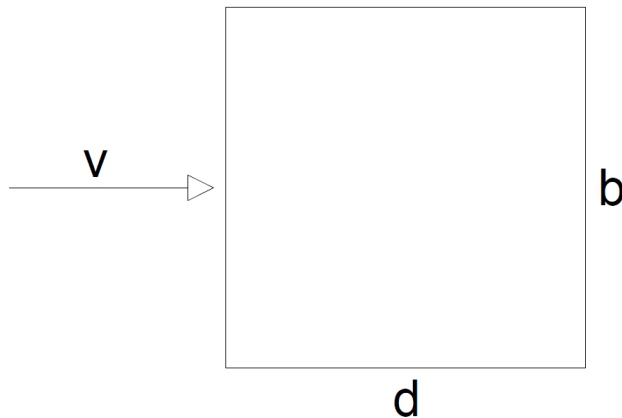
tai

$$\lambda = (2,25 - 0,017h) \frac{h}{b} \quad \text{kun } 15 \text{ m} < h \leq 50 \quad (13)$$

missä h on rakennuksen korkeus [m] ja

b on rakennuksen tuulta vastaanottavan sivun mitta [m].

Rakennukselle täytyy määrittää sivusuhte d/b , joka lasketaan alla olevan kuvan 31 mukaisesti.



Kuva 31. Rakennuksen sivusuhte ja tuulikuormaa kuvaava voima v .

Rakennukselle määritetyn hoikkuusluvun sekä sivusuhteen avulla voidaan määrittää tuulikuorman voimakertoin c_f alla olevasta taulukosta. Mikäli hoikkuusluku tai sivusuhte ei ole sama mitä taulukossa on annettu arvoja, voidaan voimakertoin määrittää arvioimalla tai iteroimalla taulukon arvoja.

Taulukko 2. Voimakertoin c_f . (mukaien RIL 205-1-2017)

λ	Sivusuhte d/b								
	0,1	0,2	0,5	0,7	1	2	5	10	50
≤ 1	1,20	1,20	1,37	1,44	1,28	0,99	0,60	0,54	0,54
3	1,29	1,29	1,48	1,55	1,38	1,08	0,65	0,58	0,58
10	1,40	1,40	1,60	1,68	1,49	1,15	0,70	0,63	0,63

Tuulikuorma määritetään edellä määritettyjen arvojen avulla kaavalla

$$q_{w,d} = c_s * c_d * c_f * q_k \quad (14)$$

missä $c_s c_d$ on rakennekerroin, jonka suuruutena käytetään arvoa 1,
 c_f on rakenteen voimakerroin ja
 q_k tuulen nopeuspaineen ominaisarvo [kN/m²].

Rakennuksen maastoluokka on II ja sen korkeus on 27,2 metriä, jolloin kuvan 30 perusteella saadaan tuulen nopeuspaineen ominaisarvoksi $q_k = 0,82$ kN/m². Kun maaston kaltevuus on alle 0,05 radiaania, niin kaltevuutta ei tarvitse huomioida laskuissa.

Rakennuksen hoikkuusluku eli lambda-arvo ratkaistaan kaavalla:

$$\lambda = (2,25 - 0,017h) \frac{h}{b}, \quad (13)$$

sillä rakennuksen korkeus on $15 \text{ m} < h < 50 \text{ m}$.

Lasketaan tuulikuorman suuruus, kun tuulikuorma kohdistuu rakennuksen pidemmälle sivulle. Lambda-arvoksi saadaan tässä tilanteessa

$$\lambda = (2,25 - 0,017 * 27,2) \frac{27,2}{27} = 1,8. \quad (13)$$

Rakennuksen sivusuhte on

$$\frac{d}{b} = \frac{16 \text{ m}}{27 \text{ m}} = 0,59. \quad (15)$$

Voimakerroin c_f määritetään sivusuhteen $\frac{d}{b}$ ja hoikkuusluvun λ avulla taulukosta 2.

Voimakertoimen arvoksi saadaan $c_f = 1,4$. Kertoimet c_c ja c_d ovat suuruudeltaan 1,0.

Tästä saadaan tuulen neliökuormaksi

$$q_{w,d} = 1 * 1 * 1,4 * 0,82 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,15 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}. \quad (14)$$

Lasketaan tuulikuorma myös tilanteelle, kun tuuli kuormittaa rakennuksen päätyä eli lyhyempää sivua. Tällöin lambda-arvoksi saadaan

$$\lambda = (2,25 - 0,017 * 27,2) \frac{27,2}{16} = 3,04. \quad (13)$$

Rakennuksen sivusuhte on nyt

$$\frac{d}{b} = \frac{27 \text{ m}}{16 \text{ m}} = 1,69. \quad (15)$$

Voimakertoimen arvoksi taulukosta 2 saadaan $c_f = 1,15$. Kertoimet c_c ja c_d ovat tässäkin tapauksessa suuruudeltaan 1,0. Tästä saadaan tuulen neliökuormaksi:

$$q_{w,d} = 1 * 1 * 1,15 * 0,82 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,95 \text{ kN/m}^2. \quad (14)$$

Määritetyt tuulikuormat lisätään pinta-alakuormana rakennuksen sivuille, joista lyhyemmille sivuille lisätään $q_{w,d} = 0,95 \text{ kN/m}^2$ ja pidemmille sivuille $q_{w,d} = 1,15 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$.

Kattorakenteisiin kohdistuva tuulikuorma lisätään viivakuormana FEM-laskentamallin rakennuksen yläreunaan, sillä yksinkertaistamisen vuoksi laskentamallin yläpohja on ylimmän asuinkerroksen tilaelementtien yläpohja. Tuulen viivakuorman suuruus on kattorakenteiden korkeus kerrottuna tuulen neliökuormalla. Tuulen kuormittaessa rakennuksen pidempää sivua tuulta kuvaava viivakuorma on 2,3 kN/m ja lyhyempää sivua 1,9 kN/m.

6.2.5 Lisävaakavoimat

Rakennuksen kantavan rungon pystyrakenteiden mahdollinen vinous täytyy huomioida laskennassa lisävaakavoimana. Lisävaakavoimat vaikuttavat puisessa tilaelementtikerrostalossa kerroskohtaisesti joka seinälinjalla. Niiden määrittäminen hoituu kokonaisuudessaan FEM-ohjelmassa. Ne lisätään FEM-laskentamalliin jokaiselle kerrokselle, ja niitä syntyy neljään eri suuntaan: x- ja y-akseleiden suunnassa sekä positiiviseen että negatiiviseen suuntaan. FEM-designissa lisävaakavoimat määritetään Deviation load -makrokomennon kautta. Jokaiseen kuormitusyhdistelmään lisätään tuulikuorman kanssa samansuuntainen lisävaakavoima.

6.3 Kuormitusyhdistelmät

Jokaista mahdollista kuormitusyhdistelmää ei oteta tarkasteluun FEM-laskentamallissa, vaan tarkastelun kohteeksi valitaan ne yhdistelmät, joiden avulla saadaan kriittisimpiä tuloksia. Ei-määräville muuttuville kuormille käytetään yhdistelykertoimia. Yhdistelykertoimen ψ_0 arvona käytetään taulukon 3 mukaan asuinrakennuksille arvoa $\psi_0 = 0,7$.

Taulukko 3. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet. ψ_0 on ominaisyhdistelyssä käytettävä kerroin, ψ_1 toistuvan kuormituksen kerroin ja ψ_2 on pitkäaikaisosuuden kerroin muuttuvalle kuormalle. (RIL 205-1-2017)

Luokka	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa			
A: asuin- ja majoitustilat	0,7	0,5	0,3
B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
E: varastoitavat tilat	1,0	0,9	0,8
F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
G: liikennöitävät tilat ajoneuvon paino ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
H: vesikatot	0,0	0,0	0,0
Lumikuorma	0,7	0,5	0,2
Rakennusten tuulikuormat	0,6	0,2	0,0

Sillä tuulikuormille täytyy tehdä kuormitusyhdistelmien tarkastelu rakennuksen jokaisen sivun suunnasta, tulee alla esitetyt murto- ja käyttörajatilan kuormitusyhdistelmät neljälle eri tuulikuormalle.

Alla esiteltyjä kuormitusyhdistelmiä sovelletaan jokaiselle neljälle eri sivua kuormittavalle tuulikuormalle. Näin ollen FEM-laskentamalliin tulee yhteensä 16 eri kuormitusyhdistelmää. Yhdistelmissä LVV:llä tarkoitetaan lisävaakavoimaa.

6.3.1 Murtorajatila

Murtorajatilan kuormitusyhdistelmistä etsitään ja valitaan ne tapaukset, joissa tilanne on epäedullisin rakennuksen kestämisen kannalta. Valittuja murtorajatilan kuormitusyhdistelmiä on kolme.

Ensimmäisessä valitussa kuormitusyhdistelmässä käytetään tarkastelussa vain rakennuksen omaa painoa ja tuulikuormaa kertoimineen. Tällöin rakennukseen syntyvät nostevoimat ovat suurimmillaan:

$$0,9 * \text{Omapaino} + 1,5 * 1,0 * \text{Tuulikuorma} + \text{LVV}.$$

Toisessa murtorajatilan kuormitusyhdistelmässä määrävänä muuttuvana kuormana on rakennukseen kohdistuva hyötykuorma, jolloin saadaan suurimmat pystykuormat:

$$1,15 * 1,0 * O_p + 1,5 * 1,0 * \text{Hyöty} + 1,5 * 1,0 * \psi_0 * \text{Lumi} + 1,5 * 1,0 * \psi_0 * \text{Tuuli} + \text{LVV}.$$

Kolmannessa kuormitusyhdistelmässä määrävänä muuttuvana kuormana on tuulikuorma, jolloin vaakakuormat ovat mahdollisimman suuria, ja tämän lisäksi muiden muuttuvien kuormien aiheuttamat puristusvoimat huomioidaan.

$$1,15 * 1,0 * O_p + 1,5 * 1,0 * \psi_0 * \text{Hyöty} + 1,5 * 1,0 * \psi_0 * \text{Lumi} + 1,5 * 1,0 * \text{Tuuli} + \text{LVV}.$$

6.3.2 Käyttörajatila

Käyttörajatilan tarkastelussa tarkastelun kohteena olevan kerrostalon vaakasiirtymät ovat oleellisin selvittävä asia. Valitussa kuormitusyhdistelmässä määrävänä muuttuvana kuormana on tuulikuorma, jolloin tuulikuorma saadaan mahdollisimman isoksi ja näin ollen saadaan käyttörajatilan suurimmat vaakasiirtymät selville. Alla on esitetty tarkasteluun valittu käyttörajatilan kuormitusyhdistelmä kertoimineen:

$$1,0 * \text{Omapaino} + 1,0 * \psi_0 * \text{Hyöty} + 1,0 * \psi_0 * \text{Lumi} + 1,0 * \text{Tuuli} + \text{LVV}.$$

7 TULOSTEN TARKASTELU

Kun FEM-laskentamalliin laskennan kannalta merkitykselliset rakenteet, kuormat sekä rakenteiden väliset liitokset mallinnettu, suoritetaan stabiiliteetin ja staattisen tapauksen FEM-laskenta kuormitustapauksille ja kuormitusyhdistelmille. Tässä osiossa kootaan laskentamallista saadut kuormitustapausten ja kuormitusyhdistelmien oleelliset tulokset.

Kuten aiemmin tässä työssä on mainittu, niin käyttörajatilassa tarkastellaan rakennuksen tuulikuorman aiheuttamaa vaakasiirtymää, ja sallittu maksimivaakasiirtymä on $H/300$, jossa H on rakennuksen kokonaiskorkeus. Käyttörajatilassa tarkastetaan jokaisen neljän eri kuormitusyhdistelmän osalta vaakasiirtymät.

Murtorajatilassa tulosten tarkastelussa pyritään löytämään suurimmat kuormitukset eli rakennuksen kriittisimmät kohdat. Tarkastellaan perustuksille tulevia kuormia, tuulesta johtuvia noste- ja puristusvoimia sekä rakenteisiin syntyviä leikkausvoimia sekä liitosvoimia.

Murtorajatilassa tulosten pohjalta rakenteille tehdään tarkempaa tarkastelua käyttöasteen ja kapasiteetin suhteen, jolloin selville saadaan, onko kyseinen rakenne toimiva vai ei. Käyttöasteen määrittämiseen käytetään Metsä Woodin Finnwood -ohjelmaa.

7.1 FEM-laskentamallin tulokset käyttörajatilassa

Käyttörajatilassa tarkastellaan kerrostalon vaakasuuntaisia siirtymiä. Rakennuksen kokonaisvaakasiirtymä eikä kerroskohtaiset vaakasiirtymät saa ylittää $H/300$ arvoa. Tämän perusteella saadaan sallituksi kerroskohtaiseksi maksimivaakasiirtymäksi:

$$\frac{3150 \text{ mm}}{300} = 10,5 \text{ mm}.$$

Suurin kerroskohtainen vaakasiirtymä syntyy tyypikerrostalossa 2. kerrokseen, sillä alimmissa kerroksissa kuormitukset ovat suurempia, ja alin kerros on oletettu jäykästi kiinni perustuksiin, jolloin nostevoiman aiheuttama veto ei irrota tilaelementtiä pistetuelta. Kerrosten välillä nurkkapilarien liitosten siirtymäkertoimet on määritetty U-

profiilin teräsiitoksen mukaisesti, jolloin kyseisiin liitoksiin pääsee syntymään siirtymää. Suurin kerroskohtainen vaakasiirtymä syntyy toisen kerroksen negatiivisen y-akselin suuntaisen tuulikuorman tapauksessa (Y-), jossa vaakasiirtymäksi saadaan 7,36 mm. Näin ollen voidaan todeta, että

$$10,5 \text{ mm} > 7,36 \text{ mm},$$

joten kerroskohtaisen vaakasiirtymä pysyy käyttörajatilamitoituksen sallitulla puolella. Kerrostalon kokonaisvaikasiirtymän suurin sallittu arvo käyttörajatilassa on puolestaan

$$\frac{27200 \text{ mm}}{300} = 90,7 \text{ mm}.$$

FEM-laskentamallista vaakasiirtymäksi koko kerrostalolle saadaan 47 mm, joka syntyy, kun tuuli kuormittaa rakennuksen pidempää sivua y-akselin negatiiviseen suuntaan (Y-). Näin ollen voidaan todeta, että

$$90,7 \text{ mm} > 47 \text{ mm},$$

joten myös koko rakennuksen mittakaavassa käyttörajatilamitoitus on sallittujen siirtymien sisäpuolella. Laskentatulosten perusteella voidaan todeta, että käyttörajatilamitoituksen osalta 8-kerroksinen rankarunkoinen tilaelementtikerrostalo on toimiva tarkasteluun valitulla kipsilevytyksellä. Käyttörajatilan siirtymien tarkemmat tulokset on esitetty taulukoissa 4 ja 5.

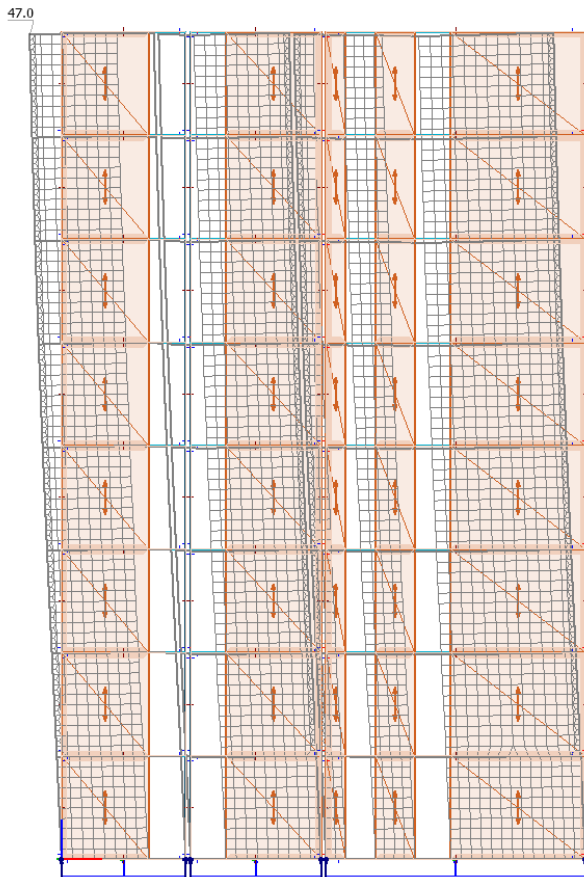
Taulukko 4. Kerrostalon pidempiä sivuja kuormittavien tuulikuormien käyttörajatilan kuormitusyhdistelmien aiheuttamat pysty- ja vaakasiirtymät.

Kerros	Tuuli y+		Tuuli y-	
	Vaikasiirtymä +y (mm)	Pystysiirtymä z (mm)	Vaikasiirtymä -y (mm)	Pystysiirtymä z (mm)
1. krs	6,91	-1,17	6,84	-1,20
2. krs	7,29	-0,94	7,36	-0,95
3. krs	7,00	-0,74	7,00	-0,77
4. krs	6,30	-0,59	6,60	-0,59
5. krs	5,70	-0,42	5,90	-0,43
6. krs	4,90	-0,28	5,10	-0,29
7. krs	4,10	-0,16	4,60	-0,16
8. krs	3,30	-0,04	3,60	-0,04
YHT.	45,50	-4,34	47,00	-4,43

Taulukko 5. Kerrostalon pidempiä sivuja kuormittavien tuulikuormien käyttörajatilan kuormitusyhdistelmien aiheuttamat pysty- ja vaakasiirtymät.

Kerros	Tuuli x+		Tuuli x-	
	Vaakasiirtymä +x (mm)	Pystysiirtymä z (mm)	Vaakasiirtymä -x (mm)	Pystysiirtymä z (mm)
1. krs	5,14	-1,09	4,58	-1,07
2. krs	5,76	-0,90	5,14	-0,82
3. krs	5,70	-0,74	4,98	-0,64
4. krs	5,30	-0,58	4,70	-0,49
5. krs	4,70	-0,44	4,20	-0,34
6. krs	4,10	-0,30	3,50	-0,22
7. krs	3,50	-0,17	3,00	-0,12
8. krs	2,80	-0,05	2,40	-0,04
YHT.	37,00	-4,27	32,50	-3,74

Taulukoissa 4 ja 5 vaakasiirtymän suunta on kyseessä olevan käyttörajatilan kuormitusyhdistelmän tuulikuorman suuntainen. Rakennukseen syntyy myös tuulen suunnasta katsottuna kohtisuoraa vaakasiirtymää rakennukseen syntymän kiertymän takia, mutta tässä työssä se on rajattu tarkastelun ulkopuolelle.



Kuva 32. Vaakasiirtymä käyttörajatilassa FEM-laskentaohjelmassa

7.2 FEM-laskentamallin tulokset murtorajatilassa

Murtorajatilassa tarkastellaan perustuksille tulevia puristuspuolen normaalivoimia viivakuormien muodossa. Perustuksille tulevat viivakuormat ovat yhtä suuria, kuin alimman kerroksen rankaseiniin syntyvät puristavat viivakuormat. Tämän lisäksi tarkastellaan tilaelementtien nurkkapilareihin syntyviä puristus- sekä vetopuolen pistekuormia. Kerrostaloon syntyy myös seinän suuntaista vaakasuuntaista leikkausvoimaa. Murtorajatilassa tarkasteluja ei tehdä kuormitusyhdistelmittäin vaan luetaan tulokset kuormitusyhdistelmien maksimiarvoista.

7.2.1 Vaakasuuntaiset leikkausvoimat

Kerrostaloon syntyvät vaakasuuntaiset leikkausvoimat pysyvät tarkasteltavassa kerrostalossa maltillisina. Tämä johtuu siitä, että rakennus ei ole kovin hoikka, sillä tilaelementeistä koostuvia asuntoja on keskikäytävän molemmiin puolin. Suurin syntyvä vaakasuuntainen leikkausvoima on

$$V_{x,y,Ed} = 11,8 \text{ kN/m.}$$

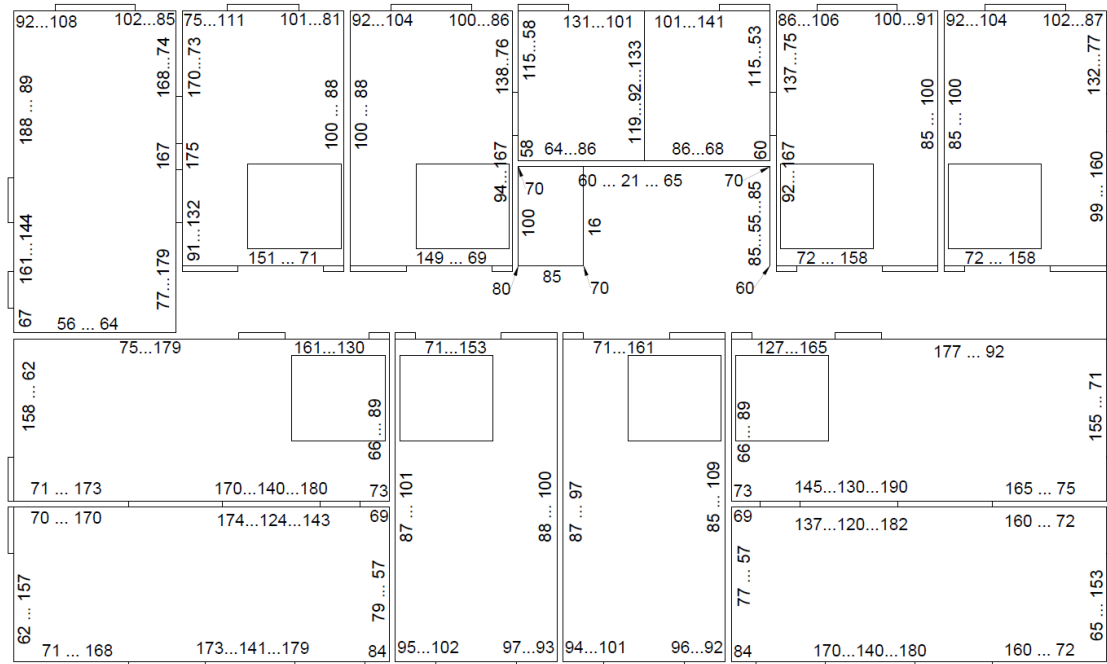
Kun yksittäisen ruuvin kapasiteetti on 2,0 kN, tarkoittaa vaakasuuntaisen leikkausvoiman $V_{x,y,Ed}$ arvo sitä, että murtorajatilassa mitoituksen perusteella kyseiseen tilanteeseen vaaditaan yhden metrin matkalle 6 kpl 2,0 kN kapasiteetin omaavia ruuveja.

7.2.2 Seinärakenteiden puristavat viivakuormat

Tarkastellessa perustuksille syntyviä pystysuuntaisia viivakuormia eli puristuspuolen normaalivoimia huomataan, että tyypillisen viivakuorman suuruus vaihtelee välillä

$$V_{z,Ed} = 85 \text{ kN/m} \dots V_{z,Ed} = 130 \text{ kN/m.}$$

Aukkojen vieressä viivakuorman suuruus FEM-laskentamallissa nousee lyhyeltä matkalta huomattavan korkeaksi, suurimmillaan $V_{z,Ed} \approx 190 \text{ kN/m}$, mikä täytyy huomioida tilaelementtien seinärakenteiden rankajaon suunnittelussa. Kuvassa 33 on esitetty viivakuormien suuruudet seinälinjoittain.



Kuva 33. Perustuksille tulevat viivakuormat seinälinjoilta. Kuvassa on esitetty myös hissikuilun/porraskäytävän seinälinjojen nurkkiin syntyvät kuormakertymät pistekuormina. Viivakuormat ovat yksikössä kN/m ja pistekuormat kN .

Kuvassa 33 ilmoitetut seinälinjojen viivakuormien vaihteluvälit tarkoittavat seinärakenteen aiheuttamaa viivakuormaa seinän koko matkalta. Eli esimerkiksi vasemmanpuoleinen viivakuorman arvo kuvaa seinän aiheuttamaa viivakuormaa seinärakenteen vasemmassa reunassa.

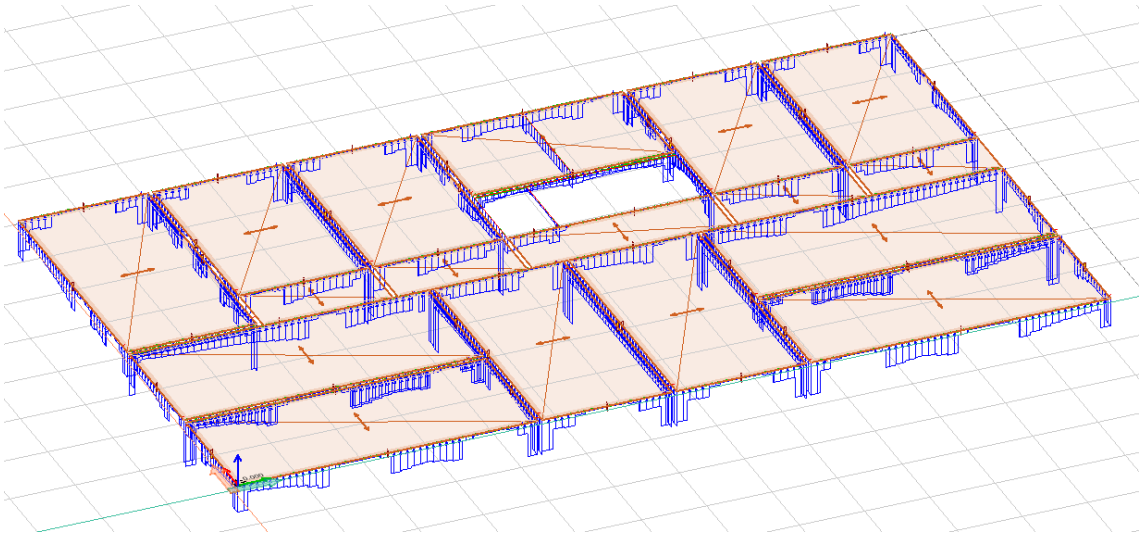
Tilaelementin ulkoseinien C24 sahatavarasta valmistettujen profiiltaan 48x123 runkotolppien kapasiteetti on noin 20 kN. Runkotolpan kapasiteetin määrittäminen on esitetty liitteessä 3. Kun kantavan rankaseinän tolppajako on k300, viivakuormana seinärakenteen kapasiteetti on

$$4 * 20 \text{ kN}/1,2 \text{ m} = 66,7 \text{ kN/m}.$$

Kuvasta 33 nähdään, että ensimmäisen kerroksen seinien rankarunkoa kuormittavat puristuspuolen viivakuormat ovat suuruusluokaltaan jokaisen tilaelementin kohdalla suurempia kuin rankaseinän kapasiteetti k300 tolppajaolla. Näiden perusteella huomataan, että

$$66,7 \text{ kN/m} < 130 \text{ kN/m},$$

joten k300 rankajaolla murtorajatilan käyttöasteet ylittyvät. Jos käytettäisiin k200 rankajakoa, päästäisiin 100 kN/m kapasiteettiin, ja tämäkään ei riittäisi kuin osassa seinärakenteista. Kun kuormat nousevat suurimmillaan 190 kN/m kokoisiksi, tarkoittaa tämä sitä, että paikoittain olisi tarvetta käyttää rankajakona k100 tolppajakoa, millä päästäisiin 200 kN/m kapasiteettiin. Näin tiheän rankajaon käyttäminen ei enää ole lämmöneristyksenkään kannalta järkevää.

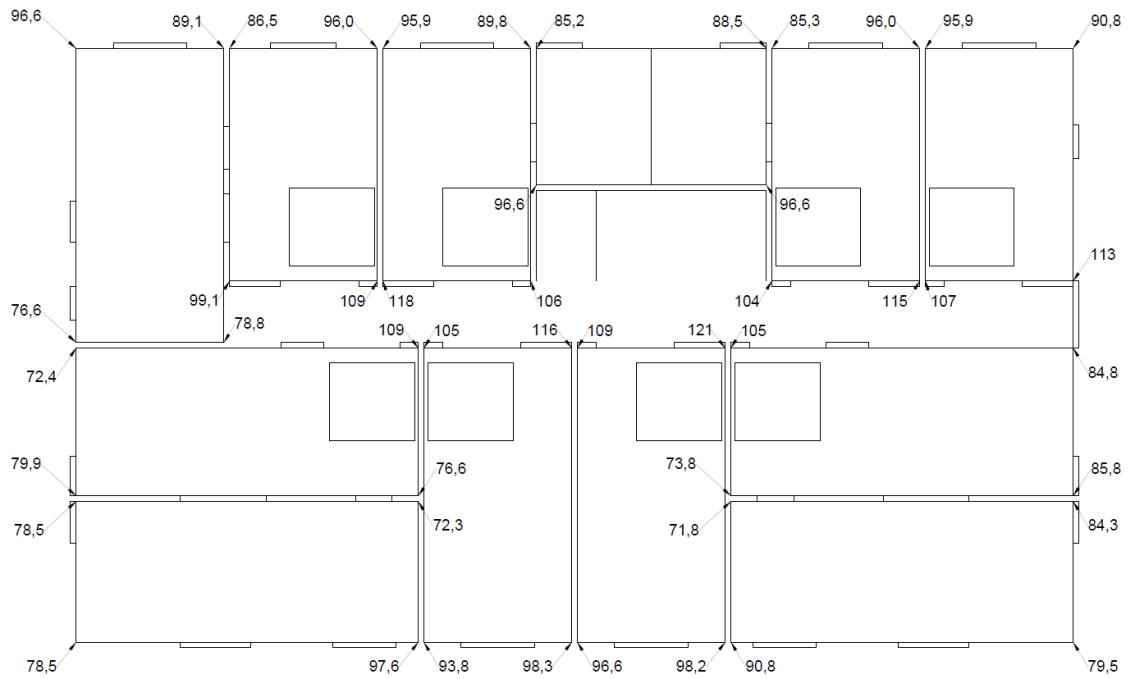


Kuva 34. Puristavat pystyrakenteisiin kohdistuvat viivakuormat alimmassa kerroksessa.

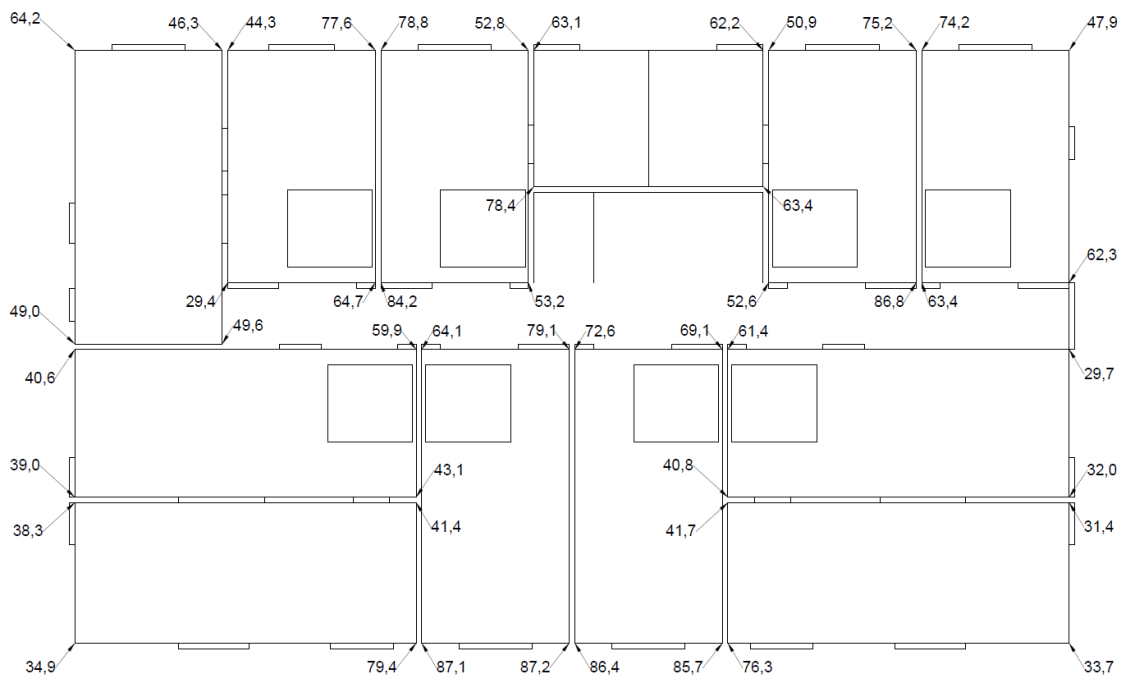
Kuvassa 34 on esitetty FEM-Design -laskentamallin puristavien viivakuormien jakautuminen alimmassa kerroksessa.

7.2.3 Nurkkapilareihin syntyvät kuormat

Tilaelementin nurkissa olevat liimapuupilarit ottavat vastaan suuren osan puristavista kuormista sekä niiden kautta ankkuroidaan vetopuolen nostevoimat. Kuvassa 35 on esitetty jokaisen tilaelementin nurkkapilariin syntyvät puristuspuolen pistekuormat. Kuvassa 36 on puolestaan esitetty jokaisen tilaelementin nurkkapilariin syntyvät vetopuolen pistekuormat.



Kuva 35. Nurkkapilareihin syntyvät puristuspuolen pistevoimat ensimmäisessä kerroksessa. Kuormat on esitetty yksikössä kN.



Kuva 36. Nurkkapilareihin syntyvät vetopuolen pistevoimat ensimmäisessä kerroksessa. Kuormat on esitetty yksikössä kN.

Kuvan 35 perusteella voidaan todeta, että puristuspuolelle syntyvät pistevoimat vaihtelevat välillä

$$V_{z,Ed,c} = 70 \text{ kN} \dots V_{z,Ed,c} = 120 \text{ kN}$$

ja suurin puristuspuolen pistevoima on

$$V_{z,Ed,c,max} = 121 \text{ kN.}$$

Vetopuolelle syntyvät nostevoimat vaihtelevat kuvan 36 mukaan välillä

$$V_{z,Ed,t} = 30 \text{ kN} \dots V_{z,Ed,t} = 87 \text{ kN}$$

ja suurin vetopuolen pistekuorma on

$$V_{z,Ed,t,max} = 87,2 \text{ kN.}$$

GL30c lujuusluokan liimapuusta valmistettujen, 115x180 profiilin nurkkapilareiden kapasiteetti on noin 94 kN. Kapasiteetin laskenta on esitetty liitteessä 2. Kun alimman kerroksen nurkkapilareihin kohdistuvan puristuksen suurin arvo on 121 kN ja kuvan 35 perusteella kuormien arvot ylittävät pääsääntöisesti kapasiteetin 94 kN arvon huomataan, että nurkkapilareidenkin osalta käyttöasteet menevät murtorajatilassa yli.

Vetopuolella nurkkapilareihin kohdistuvat kuormat ovat puristuspuolen kuormia maltillisempia, ja käyttöasteet ylittyvät kuvan 36 perusteella kolmessa kohdassa. Nostevuimien hallinta nurkkapilareiden suhteen on siis pienin rakennemuutoksin täysin mahdollista, mutta koska samat rakenteet ottavat vastaan myös puristusta, täytyy niiden mitoitus tehdä puristuspuolen kuormien perusteella.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Tässä kappaleessa otetaan tarkastelun kohteeksi työssä esiin nousseet asiat, ratkaisut sekä ongelmat. Myös tulosten luotettavuutta sekä laskentamallin oikeellisuutta arvioidaan. Tämän lisäksi käydään läpi haasteita mitä kipsilevyjäykisteisten tilaelementtipuukerrostalojen rakentamisessa syntyy.

8.1 Tulosten luotettavuuden arviointi

Tämän työn tekovaiheessa ilmeni, ettei Gyprocin sertifikaatti ei ole enää voimassa, joten Gyproc käsikirjaan perusteella määritetyt kipsilevyjen levytyksen jäykkyyden ja kapasiteetin arvot eivät mahdollisesti vastaa täysin todellisuutta. Seinärakenteiden jäykkyyden ja kapasiteettien arvot olisi mahdollista myös määrittää kokeellisesti. Seinärakenteille tehtyjä kokeita Lehdolla ei ole kuitenkaan tehty paljon, ja koin että niistä sadut tulokset eivät ole riittävän hyviä tai oikeellisia luotettavien tulosten saamisen varmistamiseksi.

FEM-laskentamalliin ei ole määritetty katkaistujen kipsilevyjen jäykkyyden heikentymistä. Katkaistaessa kipsilevyjen jäykkyyden voidaan katsoa heikentyvän huomattavasti, ja kun FEM-mallin kuorimaisten seinärakenteiden jäykkyys on määritetty vakioksi niin tämä asia on jäänyt tarkastelun ulkopuolelle. Kokonaisen kipsilevyn pituus on 1200 mm, ja osa seinistä on tätä lyhyempiä, jolloin kyseisten seinien jäykkyys mallissa hieman vääristyy. Vääristymä ei ole kuitenkaan merkittävä, sillä FEM-laskentamalli ohjaa kuormia jäykkyyksien perusteella, ja tästä syystä hoikkii seinänpätkiin ei kohdistu suuria kuormia. Tämän lisäksi mahdollista virhettä syntyy myös pitkien seinälinjojen kohdalla, sillä todellista rakennetta valmistaessa on hyvin todennäköistä, että vähintään yksi kipsilevytyksen levy seinälinjalla joudutaan kaventamaan.

8.2 Ulkopuolelle rajattujen muuttujien merkitys

Seinärakenteisiin tehtävät läpiviennit vaikuttavat negatiivisesti rakenteiden jäykkyyteen. Osaltaan myös mahdollisesti reikävaraukset ja läpiviennit voivat hankaloittaa tilannetta tiheälle rankajaolle, sillä seinän sisään tyhjää, eristeellä täytettävää tilaa jää vain vähän. Kuten tuloksista selviää niin alimmissa kerroksissa k300 rankajako ei riitä, vaan koko ensimmäinen kerros täytyy vähintään tehdä k200 rankajaolla. Tämän lisäksi

kriittisimmissä kohdissa runkotolppiin syntyy niin suuria kuormituksia, että edes 200 mm rankajako ei ole riittävä.

Viruminen aiheuttaa omia haasteita rakennukselle, sillä puun viruminen johtaa siihen, että ajan saatossa puurakenteisiin syntyy virumasta johtuvaa painauma. Sahatavaran virumaluku on $K_{def} = 0,8$. Tämä tarkoittaa sitä, että jossain vaiheessa rakennuksen käyttöikä osa kipsilevyt alkavat kantamaan pystykuormia. Tämä on todellinen haaste, sillä kipsilevyjen lujuusominaisuudet ovat heikkoja verrattuna sahatavaraan.

Kitkan ja kerrosten väliin asennettavan sylomer-kaistan vaikutukset on rajattu työssä pois. Mikäli ne huomioitaisiin ja leikkausvoimaa otettaisiin kitkalla kiinni, tilaelementtien väliin tulevat sylomer-kaistat aiheuttaisivat siirtymää ja näin ollen leikkausliitoksen jäykkyys määräytyisi kaistan kitkakertoimen perusteella. Sylomerin kitkakerroin on epälineaarinen, joten sen tarkka määrittäminen aiheuttaisi omia haasteita. Tässä työssä leikkausvoima otetaan kiinni päädyistä, joten liitoksen jäykkyys/siirtymäkerroin tulee käytettävän liitososan mukaan. Silloin sylomer-kaistojen vaikutuksia ei tarvitse huomioida jäykkyyden laskennassa. Nurkkapisteiden kiinnitys ja ankkurointi täytyy tehdä nostevoimien kiinniottamisen takia, joka tapauksessa, joten kitkavoiman huomioinnilla etenkin puristuspuolella liitosten jäykkyyden optimointia olisi mahdollista toteuttaa.

Rakenneteknisiä haasteita tässä työssä käytetyllä tilaelementtitekniikalla syntyy muun muassa kerrosten välisen höyrynsulun toteuttamisen osalta. Tähän asti Lehto on rakentanut tilaelementit siten, että lattiarakenne on seinärakenteiden alapuolella. Tässä työssä puolestaan tarkastellaan rakennerratkaisua, jossa tilaelementin lattia kiinnitetään seinärakenteiden kylkeen. Myös liimapuusta valmistettujen nurkkapilareiden käyttäminen Lehdon tilaelementeissä on uusi asia. Tästä syystä detaljitasolla olevat ratkaisut eivät vielä ole loppuun asti määritettyjä, eikä tämän työn tarkoituksenakaan ole tarkastella yksittäistä tilaelementtiä detaljitasolla.

8.3 Suositukset

Työssä tarkasteltavan tyyppikerrostalossa on käytetty rakennerratkaisuiltaan vain yhdenlaisia tilaelementtejä seinän rankarungon sekä kipsilevytyksen osalta. Todellista kerrostaloa ei ole kuitenkaan järkevää toteuttaa tällä tavalla, sillä ylemmissä kerroksissa

rakenteilta vaadittavat lujuus- ja jäykkyysominaisuudet eivät ole niin vaativia kuin alemmissa kerroksissa. Joten etenkin kustannustehokkuuden kannalta tilaelementtikonseptointi olisi järkevä toteuttaa siten, että erilaisia tilaelementtityyppejä olisi useampi, ja niiden käyttö riippuisi ylempien kerrosten lukumäärästä.

Lehdon tilaelementtitehtaalla kipsilevyjen levytyksen liitostyyppinä on käytetty pääsääntöisesti k70 jaon hakasliitoksia. Hakasliitoksen jäykkyys on huomattavasti heikompi kuin tässä työssä tarkasteltujen k100 ruuviliitosten. Hakasliitokset ovat ajallisesti ja kustannuksellisesti tehokkaita, joten siirtyminen hakasista ruuviliitoksiin lisää kustannuksia. Hakasliitokset ovat kuitenkin toimiva vaihtoehto matalissa, alle 4-kerroksisissa rakennuksissa ja näin ollen myös korkeiden rakennusten ylimmissä kerroksissa. Korkeiden kerrostalojen alimmissa kerroksissa ruuvien käyttäminen jäykistelevytyksen liitintyyppinä on kuitenkin välttämätöntä etenkin vaakasiirtymien hallitsemisen kannalta.

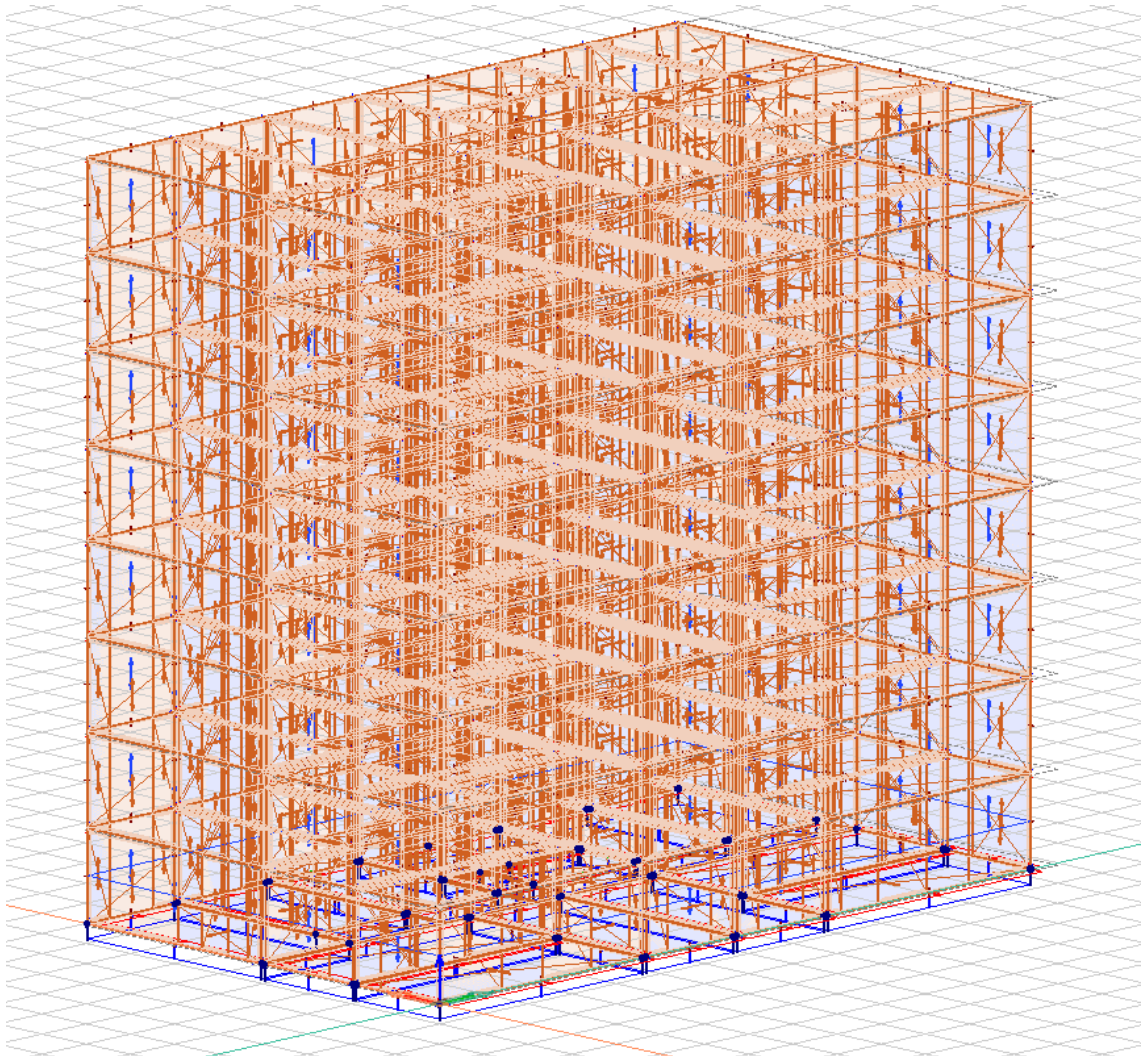
Kerrostalon kokonaisvaakasiirtymän pitäminen määrättyjen rajojen sisäpuolella on helpompaa kuin kerroskohtainen kokonaisvaakasiirtymä. Etenkin alimpien kerrosten kohdalla kokonaisvaakasiirtymä herkästi ylittää määrätyn H/300 raja-arvon vaikka koko kahdeksan kerroksista kerrostaloa tarkastellessa vaakasiirtymän arvo ei ylittäisi raja-arvoa. Tämä on tärkeää huomioida etenkin, kun rakennuksen kokonaisvaakasiirtymä lähentelee määrättyä raja-arvoa.

Alimpiin kerrokseen syntyvien viivakuormien suuruudet 8-kerroksisessa rakennuksessa kasvavat niin korkeiksi, että yksinkertaisesti seinien kantavina rakenteina ei ole järkevää käyttää alimmissa kerroksissa sahatavarasta valmistettua rankarunkoa. Vaihtoehtoja tämän ratkaisemiseksi löytyy useita. Alimmat kaksi tai kolme kerrosta on mahdollista toteuttaa betonirakenteisina, jolloin puisten tilaelementtien kerrosmäärä saataisiin pienemmäksi, ja näin ollen kuormien hallinta olisi huomattavasti helpompaa. Kustannuksen näkökulmasta tällä ratkaisulla ei olisi merkittävää vaikutusta kokonaiskustannuksiin. Vaihtoehtoina on myös insinööripuutuotteiden kuten viilupuun tai CLT:n käyttö alimmissa kerroksissa. Näin olisi mahdollista toteuttaa kerrostalo täysin puurakenteisia tilaelementtejä käyttäen. Insinööripuutuotteista valmistettujen tilaelementtien kustannukset ovat kuitenkin huomattavasti korkeampia kuin sahatavarasta valmistettujen rankarunkoisten tilaelementtien. Viilupuusta tai CLT:stä valmistettujen tilaelementtien valmistamisen aloittaminen tarkoittaisi myös sitä, että

tilaelementtitehtaan puolella pitäisi tehdä investointeja, jotta niiden valmistaminen tehdasoloissa olisi ylipäätään mahdollista. Tämä lisäisi myös kustannuksia entisestään.

8.4 FEM-laskentamallin hyödyntäminen ja käsittely

Tämän työn laskentamallin luomisessa on lukuisia vaihteita, joissa jokaisessa inhimillisten virheiden tekeminen on mahdollista. FEM-Design -laskentaohjelma on käyttökokemukseni perusteella todella virheherkkä, ja pienetkin virheet rakenteiden mallintamisessa voi muuttaa koko rakennuksen käyttäytymistä huomattavasti, jolloin luonnollisesti saadut tulokset ovat virheellisiä ja käyttökelvottomia.



Kuva 37. FEM-laskentamalli työssä tarkasteltavasta tilaelementtikerrostaalosta.

Kuten kuvasta 37 näkee, laskentamallissa on todella paljon tietoa pakattuna, joten muun muassa rakenteiden muokkaaminen tietyssä, yksittäisessä kohdassa on mallin

valmistumisen jälkeen haastavaa. Järkevimmäksi tavaksi laskentamallin luomiselle nopeasti koin olevan tyylin, että kokonaisuudessaan mallinnetaan ensimmäinen kerros kerralla kuormineen kuntoon. Tällöin tarkastavan analysoinnin voi ajaa yhdelle kerrokselle suhteellisen nopeasti läpi, ja näin ollen varmistaa, ettei mallissa ole virheitä. Kun ensimmäinen kerros on kunnossa, kerrosta voidaan kopioida ylöspäin, ja näin ollen voidaan olla lähes varmoja, ettei rakenteellisia virheitä laskentamalliin synny. Sillä FEM-laskentamallin suorittaman laskennan kesto tämän työn mallin kohdalla oli yli kolme tuntia, niin ajankäytöllisesti ei ole tehokasta, jos laskenta joudutaan suorittamaan useampaan otteeseen.

FEM-laskentamallin hyödyntäminen on lähes ehdoton työkalu etenkin puisten tilaelementtikerrostalojen murtorajatilan sekä käyttörajatilan mitoituksessa. FEM-laskentaohjelmistot automaattisesti määrittävät kuormien jakautumisen jäykistävien seinien kesken eri kuormitusyhdistelmillä. Yksinkertaisten rakennusten kohdalla voimien jakautuminen on mahdollista hyvin perusteltujen olettamusten perusteella suorittaa suhteellisen tarkasti myös käsin, mutta monimutkaisempien rakennusten kohdalla tämä osoittautuu nopeasti lähes mahdottomaksi.

9 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tarkastella, että soveltuuko Lehdon käyttämät puurakenteiset rankarunkoiset, kipsilevyjäykisteiset tilaelementit käytettäväksi tehtäessä 8-kerroksista kerrostaloa. Tämän lisäksi tavoitteena oli luoda toimiva laskentamalli FEM-laskentaohjelmaan, minkä periaatetta on mahdollista hyödyntää Lehdon tulevissa tilaelementtikerrostaloprojekteissa.

8-kerroksisesta puisesta tilaelementtikerrostalosta luotiin laskentamalli FEM-Design laskentaohjelmalla. Laskentamallissa seinä- ja lattiarakenteet mallinnettiin kuorielementeillä, ja rakenteiden väliset liitokset mallinnettiin jousiliitoksien. Laskentamallin rakenteiden ominaisuudet määritettiin analyttisesti vastaamaan todellisia rakenteita. Myös laskentamalliin lisätyt kuormat määritettiin analyttisesti eurokoodin laskentaperusteiden mukaan. FEM-mallin avulla tarkasteltiin kerrostalon vaakasiirtymiä sekä kantavaan rankarunkoon tulevia kuormia. Vaakasiirtymien tarkastelu tehtiin käyttörajatilan kuormitusyhdistelmillä ja rankarungon kuormituksen tarkastelu murtorajatilassa.

Käyttörajatilan kuormitusyhdistelmillä tarkasteltiin vaakasiirtymiä koko rakennukselle sekä kerroskohtaisesti. Suurimman sallitun vaakasiirtymän arvona käytettiin $H/300$, missä H on kerroksen tai koko kerrostalon kokonaiskorkeus. FEM-laskentamallin tulosten perusteella todettiin, että vaakasiirtymät molemmissa tarkastelutapauksissa pysyivät sallittujen arvojen sisäpuolella.

Murtorajatilan kuormitusyhdistelmillä tarkasteltiin kantavaan rankarunkoon tulevia suurimpia puristuspuolen viivakuormia. Tämän lisäksi tilaelementtien nurkissa on liimapuiset nurkkapilarit, jotka ottavat vastaan pystysuuntaista vetoa ja puristusta. Näiden pistekuormien suurimmat arvot saatiin laskentamallista. Laskentamallista saatujen tulosten avulla selvitettiin rakenteiden käyttöasteet FinnWood -laskentaohjelmaa käyttäen. Murtorajatilan kuormitusyhdistelmien tulosten perusteella todettiin, että etenkin puristuspuolen kuormat ovat liian suuria työssä tarkastelluille rakenteille.

Loppupäätelminä tässä työssä päädyttiin siihen, että 8-kerroksinen kerrostalo on liian korkea rakennettavaksi puurankarunkoisilla, kipsilevyjäykisteisillä tilaelementeillä. 8-kerroksinen rakennus on mahdollista toteuttaa, mutta alimpien kerrosten kohdalla täytyy

tällöin käyttää toisenlaisia ratkaisuja, ellei liimapuusta valmistettujen nurkkapilareiden dimensioita kasvata entisestään. Nurkkapilaritkin ovat tässä työssä tarkastellussa tapauksessa puristuspuolella kuormitettuina yli niiden kapasiteetin, joten niiden profiilin dimensioita täytyisi kasvattaa merkittävästi. Itsessään työssä tarkasteltava tilaelementti on toimiva ratkaisu, kun sitä käytetään matalissa kerrostaloissa tai 2-kerroksisissa luhtitaloissa. Mikäli puurakenteisten kerrosten lukumäärä halutaan kasvattaa kahdeksaan kerrokseen työssä tutkituilla rakenteilla, tulisi alimpien kerrosten tilaelementtien valmistusperiaate muuttaa rankarunkoisesta sahatavarasta toisenlaiseen rakenneratkaisuun, esimerkiksi Kerto-Ripa rakenteisiin tai CLT-rakenteisiin.

LÄHDELUETTELO

Crocetti, R., 2016. Horizontal stabilization. In design of timber structures – Volume 1. Structural aspects of timber construction. Edition 2. Swedish Wood. ISBN: 978-91-980304-8-8

Eurofins Expert Services Oy, 2021. EUFI29-21002618-T3. Tilaelementtien välisin U-profililiitoksen leikkaus- ja vetovoimakestävyys. [viitattu 1.6.2022]

Lehtonen, D., 2022. Tilaelementeistä kootun puukerrostalon jäykistäminen. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma.

Metsä Group, 2022. Kerto LVL [verkkodokumentti]. Espoo: Metsä Group. Saatavissa: <https://www.metsawood.com/fi/tuotteet/kerto/Pages/Kerto.aspx> [viitattu 1.6.2022]

Mäkelä, M., Soninen, L., Tuomola, S., Öistämö, J., 2022. Tekniikan kaavasto. 22. p. Tampere: Tammertekniikka, 205 s. ISBN: 978-95-254914-8-7

Puinfo, 2018. Puurakenteiden lyhennetty suunniteluohje 4. p. Eurokoodi 5. Helsinki: Puinfo. Saatavissa: <https://puinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Eurokoodi-5-Lyhennetty-suunniteluohje-31.8.-web.pdf> [viitattu 1.6.2022]

Puinfo, 2020. Liimapuu [verkkodokumentti]. Helsinki: Puinfo. Saatavissa: <https://puinfo.fi/puutieto/insinööri tuotteet/liimapuu-glt/> [viitattu 1.6.2022]

Puinfo, 2020. Rakennuksen jäykistys [verkkodokumentti]. Helsinki: Puinfo. Saatavissa: <https://puinfo.fi/rakenteet/rankarakenteet/rakennuksen-jaykistys/> [viitattu 1.6.2022]

Puinfo, 2020. Sahatavaran lujuuslajittelu ja CE-merkintä [verkkodokumentti]. Helsinki: Puinfo. Saatavissa: <https://puinfo.fi/puutieto/sahatavara-ja-sen-jalosteet/sahatavaran-lujuuslajittelu-2/> [viitattu 1.6.2022]

Puinfo, 2020. Suunnittelu [verkkodokumentti]. Helsinki: Puinfo. Saatavissa: <https://puinfo.fi/rakenteet/yhdistelmarakenteet/suunnittelu/> [viitattu 1.6.2022]

Puuinfo, 2020. Viilupuu (LVL) [verkkodokumentti]. Helsinki: Puuinfo. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/puutieto/insinööri tuotteet/viilupuu-lvl/> [viitattu 1.6.2022]

RIL 205-1, 2017. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-1. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry: 243 s. [viitattu 1.6.2022]

Saint-Gobain Finland Oy, Gyproc, 2021. Gyproc käsikirja 2021. Helsinki: Saint-Gobain Finland, 512 s.

VTT Oy, 2006. Puurakenteiden jäykistysuunnittelun ohje. Espoo. [viitattu 1.6.2022]

Ympäristöministeriö, 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Helsinki, 24 s. [viitattu 1.6.2022]

Liite 1. Rankarunkoisen kipsilevyseinän jäykkyys ja kapasiteetti. (1/3)

INSINÖÖRITOIMISTO
MÄKELÄINEN OYLaskennan verifiointi - Kipsilevyseinän
jäykkyys

Levytyksen lähtötiedot:

Levymitoitus tehty käyttöluokka 1, aikaluokka hetkellinen

EN 520 Kipsikartonkilevy - Tyyppi EK - 13mm

Runkomateriaali:sahatavara C24 - rankajako k300 Kiinnitystapa 4

Seinän valmistuksessa noudatettava valmistajan antamia ohjeita.
(gyproc käsikirja)

Arvot Gyproc-käsikirja 2021 sivu 450

Kiinnike	Levytyyppi	Käyttöluokka	Ominaisleikkauslujuus [N]	Siirtymäkerroin [N/mm]	Kimmo-moduuli pituus-suunta [N/mm ²]	Kimmo-moduuli poikki-suunta [N/mm ²]	Liuku-moduuli [N/mm ²]	Ominaisleikkauslujuus [N/mm ²]
Würth 3,9x35	GR 13 W	1	911	1780	3500	2600	690	1,78

Kipsilevytyksen leikkausvoimakkestävyys (RIL 205-1-2017, kohta 9.2.4.2)

Ruuvaus:

$$F_{f,Rk,liitin} := 0.911 \text{ kN}$$

$$K_{ser,i,liitin} := 1780 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$s_i := 100 \text{ mm}$$

Liitinjako levyn reunolla. Ruuveilla max. 200mm

Levytyks:

$$t_i := 13 \text{ mm}$$

Levyn paksuus: Gyproc GR13

$$G_{mean,i} := 690 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

GR13 Kipsilevyn liukumoduuli

$$b_i := 1200 \text{ mm}$$

Kipsilevyn leveys

$$h_i := 3150 \text{ mm}$$

Kipsilevyn korkeus

$$k_{mod} := 1.1$$

Kts. taulukko alta: KL1, AL Hetkellinen

$$\gamma_M := 1.3$$

Liite 1. Rankarunkoisen kipsilevyseinän jäykkyys ja kapasiteetti. (2/3)



INSINÖÖRITOIMISTO
MÄKELÄINEN OY

Laskennan verifiointi - Kipsilevyseinän jäykkyys

Kipsikartonki- ja kuitukipsilevyjen muunnos- ja virumakertoimia

- EN 520 mukaisille kipsikartonkilevyille ei ole annettu k_{mod} - ja k_{def} -kertoimia, joten kyseisille levyille käytetään kuitukipsilevyille annettuja kertoimia (ks. ETA-03 / 0050)

k_{mod} -kertoimet kipsikartonkilevyille ja kuitukipsilevyille		
Aikaluokka	Käyttöluokka 1	Käyttöluokka 2
Pysyvä	0,20	0,15
Pitkäaikainen	0,40	0,30
Keskipitkä	0,60	0,45
Lyhytaikainen	0,80	0,60
Hetkellinen	1,10	0,80

k_{def} -kertoimet kipsikartonkilevyille ja kuitukipsilevyille		
Aikaluokka	Käyttöluokka 1	Käyttöluokka 2
Pysyvä	3,00	4,00
Pitkäaikainen	2,00	2,50
Keskipitkä	1,00	1,25
Lyhytaikainen	0,35	0,50

$$F_{f,Rd,liitin} := \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot F_{f,Rk,liitin}$$

$$F_{f,Rd,liitin} = 770,85 \text{ N}$$

Yksittäisen liittimen leikkauvoimakkestävyyden mitoitusarvo

$$b_i = 1200 \text{ mm}$$

$$\gamma_i := \sqrt{\frac{36}{\left(6 + 5 \frac{h_i}{b_i}\right)^2} + \frac{144}{\left(15 + 4 \frac{b_i}{h_i}\right)^2}} = 0,791$$

$$F_{i,v,Rd} := \frac{F_{f,Rd,liitin} \cdot b_i}{\gamma_i \cdot s_i}$$

$$F_{i,v,Rd} = 11,69 \text{ kN}$$

Yksittäisen levyn leikkauvoimakkestävyyden mitoitusarvo

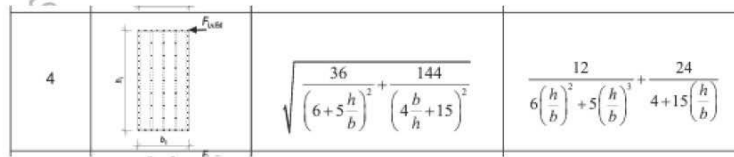
Liite 1. Rankarunkoisen kipsilevyseinän jäykkyys ja kapasiteetti. (3/3)



INSINÖÖRITOIMISTO
MÄKELÄINEN OY

Laskennan verifiointi - Kipsilevyseinän jäykkyys

Levyjäykisteen yleinen mitoitusmenetelmä (RIL 205-1-2017, kohta 9.2.4.3S)



$$\beta_i := \frac{12}{6 \left(\frac{h_i}{b_i} \right)^2 + 5 \left(\frac{h_i}{b_i} \right)} + \frac{24}{4 + 15 \left(\frac{h_i}{b_i} \right)} = 0.644 \quad \text{Kiinnitystapakerroin 4}$$

(RIL 205-1-2017, kuva 9.13S.)

$$C_{i,v} := \frac{1}{\beta_i \cdot \frac{s_i \cdot h_i^2}{K_{ser.i.lisitin} \cdot b_i^3} + \frac{h_i}{b_i \cdot G_{mean,i} \cdot t_i}} \quad K_{ser.i.lisitin} = (1.78 \cdot 10^3) \frac{N}{mm}$$

$$C_{i,v} = 1997.95 \frac{N}{mm}$$

Yksittäisen levyn jäykkyskerroin (KRT)

Kapasiteetti

$$F_{i,v,Rd} = 11.69 \text{ kN}$$

Yksittäisen levyn (1200mm) leikkausvoimakestävyyden mitoitusarvo

Jäykkyys

$$C_{i,v} = 1997.95 \frac{N}{mm}$$

Yksittäisen levyn (1200mm) jäykkyskerroin (KRT)

Liite 2. Nurkkapilarin kapasiteetin määrittäminen. (1/4)

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

MAKSIMIKÄYTTÖASTE YLITTYI

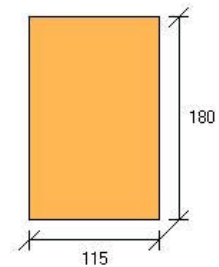
?

30.5.2022

Laskelmat on tehty alla olevilla lähtötiedoilla vain kyseiselle rakenneosalle. Laskelmissa esitetty rakenneosan pituus ei ole tilausmitta. Tilausmitassa on otettava huomioon esim. tuennan vaatima lisäpituus.

RAKENNETIEDOT:

Rakennetyyppi: Pilari
 Materiaali: GL30c
 Poikkileikkaus: 115x180
 (B=115 mm, H=180 mm, A=20700 mm², I_y=55890000 mm⁴, W_y=621000 mm³)
 Käyttöluokka: 1
 Seuraamusluokka: CC2 (kFI=1.0)
 Kulma: 90.0 astetta



Uloke-/jännevälipituudet:

Uloke-/jänneväli: Pystymitta [mm]:
 Jänneväli 1: 3150.0
 Yhteensä: 3150.0

Tuki: Sijainti x [mm]: Tyyppi:
 1: 0 Kiinteä niveltuki (X, Z)
 2: 3150 Liukutuki (X)

f_{m,k} (M_y): 33.00 N/mm²
 f_{m,k} (M_z): 30.00 N/mm²
 f_{c,0,k}: 24.50 N/mm²
 f_{c,90,k}: 2.50 N/mm²
 f_{t,0,k}: 21.45 N/mm²
 f_{t,90,k}: 0.50 N/mm²
 f_{v,k} (V_z): 3.50 N/mm²
 f_{v,k} (V_y): 3.50 N/mm²
 E_{mean}: 13000 N/mm²
 G_{mean}: 650 N/mm²
 E_{0.05}: 10800 N/mm²
 G_{0.05}: 540 N/mm²
 Tilavuuspaino: 5.00 kN/m³ (omapainon laskentaa varten)
 k_m-kerroin: 0.70
 k_{cr}-kerroin: 1.00

Osavarmuusluku: 1.25

Aikaluokka: k_{mod}:
 Pysyvä: 0.600
 Pitkäaikainen: 0.700
 Keskipitkä: 0.800
 Lyhytaikainen: 0.900
 Hetkellinen: 1.100

Liite 2. Nurkkapilarin kapasiteetin määrittäminen. (2/4)

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

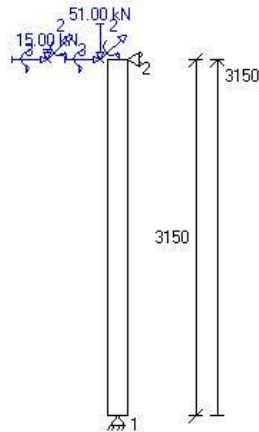
© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

MAKSIMIKÄYTTÖASTE YLITTYI

?

30.5.2022

kdef: 0.600

**KUORMITUSTIEDOT:**

Omapaino (Omapaino, Pysyvä):

Pistekuorma: 1:	FZ = 15.00 kN	x = 3150.0 mm
Pistekuorma: 2:	My = -0.300 kNm	x = 3150.0 mm
Pistekuorma: 3:	Mz = 0.300 kNm	x = 3150.0 mm
Rakenneosan paino:	QZ = 0.103 kN/m	x = 0 - 3150 mm

Hyötykuorma (Hyötykuorma A, Keskipitkä, MRT/KRT-liikkuvuus = 100.0 %):

Pistekuorma: 1:	FZ = 51.00 kN	x = 3150.0 mm
Pistekuorma: 2:	My = -1.020 kNm	x = 3150.0 mm
Pistekuorma: 3:	Mz = 1.020 kNm	x = 3150.0 mm

KUORMITUSYHDISTELMÄT:Yhdistelmä 1 (MRT, Pysyvä)
0.90*OmapainoYhdistelmä 2 (MRT, Pysyvä)
1.00*1.35*Omapaino

Liite 2. Nurkkapilarin kapasiteetin määrittäminen. (3/4)

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

MAKSIMIKÄYTTÖASTE YLITTYI

?

30.5.2022

Yhdistelmä 3 (MRT, Keskipitkä)
1.00*1.15*Omapaino + 1.00*1.50*Hyötykuorma

Yhdistelmä 5 (MRT, Keskipitkä)
1.00*1.15*Omapaino + 1.00*1.50*0.70*Hyötykuorma

Yhdistelmä 9 (KRT)
1.00*Omapaino

Yhdistelmä 10 (KRT)
1.00*Omapaino + 1.00*Hyötykuorma

Yhdistelmä 11 (KRT)
1.00*Omapaino + 1.00*0.70*Hyötykuorma

MITOITUS:

Mitoitusstandardi: EN 1995-1-1:2004 + A1:2008 + A2:2014 + RIL 205-1-2017
Kokonaiskäyttöaste: 100.3 %

MITOITUSPARAMETRIT:

Taipumaraja $W_{net,fin}$: L/300
Korotuskerron, vasen uloke: 2.00
Korotuskerron, oikea uloke: 2.00
Nurjahdus z-suuntaan: $L_c = 1.00 \cdot L$
Nurjahdus y-suuntaan: $L_c = 1.00 \cdot L$
Kiepahdus on estetty

MITOITUKSEN ÄÄRIARVOT:

Tarkastelu:	Mitoitusarvo:	Raja-arvo:	Käyttöaste *):	Sijainti x:	
Leikkaus (z):	0.60 kN	30.91 kN	1.9 %	2126 mm	Yhdistelmä 3/1, Keskipitkä
Leikkaus (y):	0.60 kN	30.91 kN	1.9 %	630 mm	Yhdistelmä 3/1, Keskipitkä
Puristus:	94.12 kN	142.81 kN	65.9 %	0 mm	Yhdistelmä 3/1, Keskipitkä
Taivutus (M_y):	1.87 kNm	13.12 kNm	14.3 %	3150 mm	Yhdistelmä 3/1, Keskipitkä
Taivutus (M_z):	1.87 kNm	7.62 kNm	24.6 %	3150 mm	Yhdistelmä 3/1, Keskipitkä
(laskettu ilman kiepahdusta)					
Taivutus (M_y+M_z):	0.35	1.00	34.6 %	3150 mm	Yhdistelmä 3/1, Keskipitkä
($M_y=1.87$ kNm, $M_z=1.87$ kNm)					
Taivutus+puristus:	1.00	1.00	100.3 %	3150 mm	Yhdistelmä 3/1, Keskipitkä
($M_y=1.87$ kNm, $M_z=1.87$ kNm, $N_x=93.75$ kN)					
jänneväli 1, $W_z,inst$:	-1.2 mm	-- mm	-- %	1811 mm	Yhdistelmä 10/1
jänneväli 1, W_z,net,fin :	-1.5 mm	10.5 mm	14.0 %	1811 mm	Yhdistelmä 10/1
jänneväli 1, $W_y,inst$:	-2.8 mm	-- mm	-- %	1811 mm	Yhdistelmä 10/1
jänneväli 1, W_y,net,fin :	-3.6 mm	-- mm	-- %	1811 mm	Yhdistelmä 10/1

ÄÄRIARVOJEN KUORMITUSYHDISTELMÄT

Liite 2. Nurkkapilarin kapasiteetin määrittäminen. (4/4)

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

MAKSIMIKÄYTTÖASTE YLITTYI

?

30.5.2022

Yhdistelmä 3/1 (Keskipitkä):

1.15*Omapaino + 1.50*Hyötykuorma

Yhdistelmä 10/1 :

1.00*Omapaino + 1.00*Hyötykuorma

VOIMASUUREIDEN ÄÄRIARVOT:

Tulos:	Maksimiarvo:	Sijainti x:
N _{x,max}	94.12 kN	0 mm
V _{z,max}	0.60 kN	2126 mm
V _{y,max}	0.60 kN	630 mm
M _{z,max}	1.87 kNm	3150 mm
M _{y,max}	1.87 kNm	3150 mm

TUKIREAKTIOT:

FX:

Tuki:	MRTmax:	MRTmin:	KRTmax:	KRTmin:
1:	0.60 kN	0.09 kN	0.42 kN	0.10 kN
2:	-0.09 kN	-0.60 kN	-0.10 kN	-0.42 kN

FZ:

Tuki:	MRTmax:	MRTmin:	KRTmax:	KRTmin:
1:	94.12 kN	13.79 kN	66.33 kN	15.33 kN
2:	0.00 kN	0.00 kN	0.00 kN	0.00 kN

FY:

Tuki:	MRTmax:	MRTmin:	KRTmax:	KRTmin:
1:	0.60 kN	0.09 kN	0.42 kN	0.10 kN
2:	-0.09 kN	-0.60 kN	-0.10 kN	-0.42 kN

- KRT tukireaktiot ovat vain vertailua varten

TUKIREAKTIOT KUORMITUSTAPAUKSITTAIN (OMINAISARVOT):

Kuormitustapaus:

Tuki:	Omapaino FX [kN]:	FZ [kN]:	FY [kN]:
1:	0.10	15.33	0.10
2:	-0.10	0.00	-0.10

Kuormitustapaus:

Tuki:	Hyötykuorma FX [kN]:	FZ [kN]:	FY [kN]:
1:	0.32	51.00	0.32
2:	-0.32	0.00	-0.32

HUOMIOT:

- EN 1995-1-1-standardin, sen täydennysosien A1:2008, A2:2014 ja Suomen kansallisten liitteiden sekä

Liite 3. Runkotolpan kapasiteetin määrittäminen. (1/4)

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

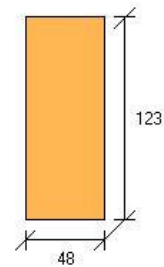
© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

31.5.2022

Laskelmat on tehty alla olevilla lähtötiedoilla vain kyseiselle rakenneosalle. Laskelmissa esitetty rakenneosan pituus ei ole tilausmitta. Tilausmitassa on otettava huomioon esim. tuennan vaatima lisäpituus.

RAKENNETIEDOT:

Rakennetyyppi: Pilari
 Materiaali: C24
 Poikkileikkaus: 48x123
 (B=48 mm, H=123 mm, A=5904 mm², I_y=7443468 mm⁴, W_y=121032 mm³)
 Käyttöluokka: 2
 Seuraamusluokka: CC2 (kFI=1.0)
 Kulma: 90.0 astetta

**Uloke-/jännevälipituudet:**

Uloke-/jänneväli: Pystymitta [mm]:
 Jänneväli 1: 3150.0
 Yhteensä: 3150.0

Tuki: Sijainti x [mm]: Tyyppi:
 1: 0 Kiinteä niveltuki (X, Z)
 2: 3150 Liukutuki (X)

f_{m,k} (M_y): 24.97 N/mm²
 f_{m,k} (M_z): 30.14 N/mm²
 f_{c,0,k}: 21.00 N/mm²
 f_{c,90,k}: 2.50 N/mm²
 f_{t,0,k}: 15.09 N/mm²
 f_{t,90,k}: 0.40 N/mm²
 f_{v,k} (V_z): 4.00 N/mm²
 f_{v,k} (V_y): 4.00 N/mm²
 E_{mean}: 11000 N/mm²
 G_{mean}: 690 N/mm²
 E_{0.05}: 7400 N/mm²
 G_{0.05}: 460 N/mm²
 Tilavuuspaino: 5.00 kN/m³ (omapainon laskentaa varten)
 km-kerroin: 0.70
 kcr-kerroin: 1.00

Osavarmuusluku: 1.30

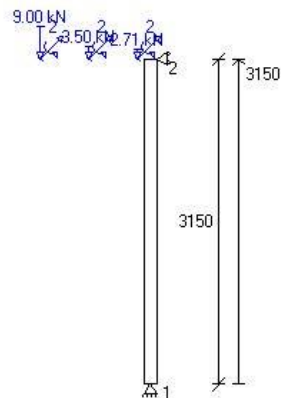
Aikaluokka: k_{mod}:
 Pysyvä: 0.600
 Pitkäaikainen: 0.700
 Keskipitkä: 0.800
 Lyhytaikainen: 0.900
 Hetkellinen: 1.100

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

31.5.2022

kdef: 0.800

**KUORMITUSTIEDOT:**

Omapaino (Omapaino, Pysyvä):

Pistekuorma: 1: FZ = 9.00 kN x = 3150.0 mm

Pistekuorma: 2: My = -0.324 kNm x = 3150.0 mm

Hyötykuorma (Hyötykuorma A, Keskipitkä, MRT/KRT-liikkuvuus = 100.0 %):

Pistekuorma: 1: FZ = 3.50 kN x = 3150.0 mm

Pistekuorma: 2: My = -0.126 kNm x = 3150.0 mm

Lumikuorma (Lumikuorma Sk < 2.75 kN/m², Keskipitkä):

Pistekuorma: 1: FZ = 2.71 kN x = 3150.0 mm

Pistekuorma: 2: My = -0.098 kNm x = 3150.0 mm

KUORMITUSYHDISTELMÄT:

Yhdistelmä 1 (MRT, Pysyvä)

0.90*Omapaino

Yhdistelmä 2 (MRT, Pysyvä)

1.00*1.35*Omapaino

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

31.5.2022

Yhdistelmä 3 (MRT, Keskipitkä)

1.00*1.15*Omapaino + 1.00*1.50*Hyötykuorma

Yhdistelmä 4 (MRT, Keskipitkä)

1.00*1.15*Omapaino + 1.00*1.50*Hyötykuorma + 1.00*1.50*0.70*Lumikuorma

Yhdistelmä 5 (MRT, Keskipitkä)

1.00*1.15*Omapaino + 1.00*1.50*0.70*Hyötykuorma + 1.00*1.50*Lumikuorma

Yhdistelmä 8 (MRT, Keskipitkä)

1.00*1.15*Omapaino + 1.00*1.50*0.70*Hyötykuorma + 1.00*1.50*0.70*Lumikuorma

Yhdistelmä 9 (KRT)

1.00*Omapaino

Yhdistelmä 10 (KRT)

1.00*Omapaino + 1.00*Hyötykuorma + 1.00*0.70*Lumikuorma

Yhdistelmä 11 (KRT)

1.00*Omapaino + 1.00*0.70*Hyötykuorma + 1.00*Lumikuorma

Yhdistelmä 12 (KRT)

1.00*Omapaino + 1.00*0.70*Hyötykuorma + 1.00*0.70*Lumikuorma

MITOITUS:

Mitoitusstandardi: EN 1995-1-1:2004 + A1:2008 + A2:2014 + RIL 205-1-2017

Kokonaiskäyttöaste: 99.8 %

MITOITUSPARAMETRIT:

Taipumaraja Wnet,fin: L/300

Korotuskertoimen, vasen uloke: 2.00

Korotuskertoimen, oikea uloke: 2.00

Nurjahdus z-suuntaan: Lc = 1.00*L

Nurjahdus on estetty y-suuntaan

Kiepahdus on estetty

MITOITUKSEN ÄÄRIARVOT:

Tarkastelu:	Mitoitusarvo:	Raja-arvo:	Käyttöaste *):	Sijainti x:	
Leikkaus (z):	0.21 kN	9.69 kN	2.2 %	3039 mm	Yhdistelmä 4/1, Keskipitkä
Puristus:	18.45 kN	28.79 kN	64.1 %	3039 mm	Yhdistelmä 4/1, Keskipitkä
Taivutus (My):	0.66 kNm	1.86 kNm	35.7 %	3150 mm	Yhdistelmä 4/1, Keskipitkä
Taivutus+puristus:	1.00	1.00	99.8 %	3150 mm	Yhdistelmä 4/1, Keskipitkä
(My=0.66 kNm, Mz=0.00 kNm, Nx=18.45 kN)					
jänneväli 1, Wz,inst:	-4.0 mm	-- mm	-- %	1811 mm	Yhdistelmä 10/1

Liite 3. Runkotolpan kapasiteetin määrittäminen. (4/4)

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

31.5.2022

jänneväli 1, Wz,net,fin:	-6.4 mm	10.5 mm	61.0 %	1811 mm	Yhdistelmä 10/1
--------------------------	---------	---------	--------	---------	-----------------

ÄÄRIARVOJEN KUORMITUSYHDISTELMÄT

Yhdistelmä 4/1 (Keskipitkä):

1.15*Omapaino + 1.50*Hyötykuorma + 1.05*Lumikuorma

Yhdistelmä 10/1 :

1.00*Omapaino + 1.00*Hyötykuorma + 0.70*Lumikuorma

VOIMASUUREIDEN ÄÄRIARVOT:

Tulos:	Maksimiarvo:	Sijainti x:
Nx,max	18.45 kN	3039 mm
Vz,max	0.21 kN	3039 mm
My,max	0.66 kNm	3150 mm

TUKIREAKTIOT:

FX:

Tuki:	MRTmax:	MRTmin:	KRTmax:	KRTmin:
1:	0.21 kN	0.09 kN	0.16 kN	0.10 kN
2:	-0.09 kN	-0.21 kN	-0.10 kN	-0.16 kN

FZ:

Tuki:	MRTmax:	MRTmin:	KRTmax:	KRTmin:
1:	18.45 kN	8.10 kN	14.40 kN	9.00 kN
2:	0.00 kN	0.00 kN	0.00 kN	0.00 kN

- KRT tukireaktiot ovat vain vertailua varten

TUKIREAKTIOT KUORMITUSTAPAUKSITTAIN (OMINAISARVOT):

Kuormitustapaus:	Omapaino
Tuki:	FX [kN]: FZ [kN]:
1:	0.10 9.00
2:	-0.10 0.00

Kuormitustapaus:	Hyötykuorma
Tuki:	FX [kN]: FZ [kN]:
1:	0.04 3.50
2:	-0.04 0.00

Kuormitustapaus:	Lumikuorma
Tuki:	FX [kN]: FZ [kN]:
1:	0.03 2.71
2:	-0.03 0.00

HUOMIOT:

Liite 4. Jäykisteseinän ja lattiapalkin taipuman määrittäminen. (1/4)

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

MAKSIMIKÄYTTÖASTE YLITTYI

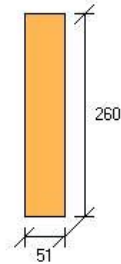
?

31.5.2022

Laskelmat on tehty alla olevilla lähtötiedoilla vain kyseiselle rakenneosalle. Laskelmissa esitetty rakenneosan pituus ei ole tilausmitta. Tilausmitassa on otettava huomioon esim. tuennan vaatima lisäpituus.

RAKENNETIEDOT:

Rakennetyyppi: Lattiapalkki/laatta
 Materiaali: KERTO-S syrjällään
 Poikkileikkaus: 51x260 (varastokoko)
 Lisätietoja: Vakiokoko
 (B=51 mm, H=260 mm, A=13260 mm², I_y=74698000 mm⁴, W_y=574600 mm³)
 Käyttöluokka: 1
 Seuraamusluokka: CC2 (KFI=1.0)



Uloke-/jännevälipituudet:

Uloke-/jänneväli: Vaakamitta [mm]:
 Jänneväli 1: 3780.0
 Yhteensä: 3780.0

Tuki:	Sijainti x [mm]:	Leveys [mm]:	Tyyppi:
1:	0	100	Kiinteä niveltuki (X,Z)
2:	3780	100	Liikutuki (Z)

fm,k (My): 44.76 N/mm²
 fm,k (Mz): 50.00 N/mm²
 fc,0,k: 35.00 N/mm²
 fc,90,k: 6.00 N/mm²
 ft,0,k: 34.52 N/mm²
 ft,90,k: 0.80 N/mm²
 fv,k (Vz): 4.20 N/mm²
 fv,k (Vy): 2.30 N/mm²
 E_{mean}: 13800 N/mm²
 G_{mean}: 600 N/mm²
 E_{0.05}: 11600 N/mm²
 G_{0.05}: 400 N/mm²
 Tilavuuspaino: 5.10 kN/m³ (omapainon laskentaa varten)
 km-kerroin: 0.70
 kcr-kerroin: 1.00

Osavarmuusluku: 1.20

Aikaluokka: k_{mod}:
 Pysyvä: 0.600
 Pitkäaikainen: 0.700
 Keskipitkä: 0.800
 Lyhytaikainen: 0.900
 Hetkellinen: 1.100

Liite 4. Jäykisteseinän ja lattiapalkin taipuman määrittäminen. (2/4)

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

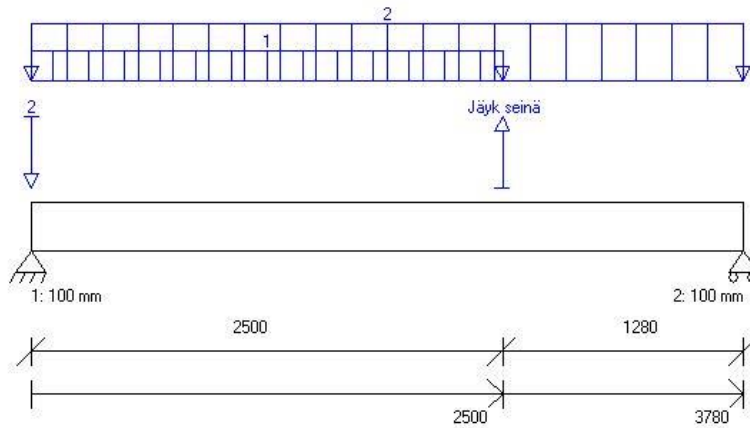
© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

MAKSIMIKÄYTTÖASTE YLITTYI

?

31.5.2022

kdef: 0.600

**KUORMITUSTIEDOT:**

Omapaino (Omapaino, Pysyvä):

Rakennesosan paino: QZ = 0.068 kN/m x = 0 - 3780 mm

viivakuorma: 1: QZ = 0.650 kN/m x = 0 - 2500 mm

viivakuorma: 2: QZ = 1.250 kN/m x = 0 - 3780 mm

Tuulikuorma (Tuulikuorma, Hetkellinen):

Pistekuorma: 1: FZ = -20.50 kN x = 2500.0 mm (Jäyk seinä)

Pistekuorma: 2: FZ = 20.50 kN x = 0.0 mm

KUORMITUSYHDISTELMÄT:

Yhdistelmä 1 (MRT, Pysyvä)

1.00*1.35*Omapaino

Yhdistelmä 2 (MRT, Pysyvä)

1.00*1.15*Omapaino

Yhdistelmä 3 (MRT, Pysyvä)

0.90*Omapaino

Liite 4. Jäykisteseinän ja lattiapalkin taipuman määrittäminen. (3/4)

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

MAKSIMIKÄYTTÖASTE YLITTYI

?

31.5.2022

Yhdistelmä 6 (MRT, Hetkellinen)
1.00*1.15*Omapaino + 1.00*1.50*0.60*Tuulikuorma

Yhdistelmä 8 (MRT, Hetkellinen)
1.00*1.15*Omapaino + 1.00*1.50*Tuulikuorma

Yhdistelmä 10 (MRT, Hetkellinen)
0.90*Omapaino + 1.00*1.50*Tuulikuorma

Yhdistelmä 13 (KRT)
1.00*Omapaino

Yhdistelmä 17 (KRT)
1.00*Omapaino + 1.00*Tuulikuorma

MITOITUS:

Mitoitusstandardi: EN 1995-1-1:2004 + A1:2008 + A2:2014 + RIL 205-1-2017
Kokonaiskäyttöaste: 176.0 %

MITOITUSPARAMETRIT:

Taipumaraja Winst: L/400
Taipumaraja Wnet,fin: L/300
Korotuskerroin, vasen uloke: 2.00
Korotuskerroin, oikea uloke: 2.00
Nurjahdus on estetty molempiin suuntiin (y ja z)
Kiepahdus taivutuksesta My (y-askelin suhteen):
Rakenne on täysin sivuttaistuettu yläpuolelta
Rakenne on täysin sivuttaistuettu alapuolelta
Värahtelymitoitusta ei ole tehty

MITOITUKSEN ÄÄRIARVOT:

Tarkastelu:	Mitoitusarvo:	Raja-arvo:	Käyttöaste *):	Sijainti x:	
Leikkaus (z):	19.13 kN	34.03 kN	56.2 %	2500 mm	Yhdistelmä 10/1, Hetkellinen
Taivutus (My):	23.52 kNm	23.58 kNm	99.7 %	2500 mm	Yhdistelmä 10/1, Hetkellinen
(ilman kiepahdusta):	23.52 kNm	23.58 kNm	99.7 %	2500 mm	Yhdistelmä 10/1, Hetkellinen
Tukipaine, tuki 1:	24.45 kN	32.26 kN	75.8 %	0 mm	Yhdistelmä 8/1, Hetkellinen
Tukipainekerroin = 1.15					
Tukipaine, tuki 2:	4.09 kN	21.11 kN	19.4 %	3780 mm	Yhdistelmä 1/1, Pysyvä
Tukipainekerroin = 1.38					
jänneväli 1, Wz,inst:	-16.6 mm	9.5 mm	176.0 %	2174 mm	Yhdistelmä 17/1
jänneväli 1, Wz,net,fin:	-13.7 mm	12.6 mm	108.7 %	2268 mm	Yhdistelmä 17/1

ÄÄRIARVOJEN KUORMITUSYHDISTELMÄT

Yhdistelmä 10/1 (Hetskellinen):

Liite 4. Jäykisteseinän ja lattiapalkin taipuman määrittäminen. (4/4)

Finnwood 2.4.3 (2.4.089)

© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

MAKSIMIKÄYTTÖASTE YLITTYI

?

31.5.2022

0.90*Omapaino + 1.50*Tuulikuorma

Yhdistelmä 8/1 (Hetkellinen):

1.15*Omapaino + 1.50*Tuulikuorma

Yhdistelmä 1/1 (Pysyvä):

1.35*Omapaino

Yhdistelmä 17/1 :

1.00*Omapaino + 1.00*Tuulikuorma

VOIMASUUREIDEN ÄÄRIARVOT:

Tulos:	Maksimiarvo:	Sijainti x:
V _{z,max}	19.13 kN	2500 mm
M _{y,max}	23.52 kNm	2500 mm

TUKIREAKTIOT:

Tuki:	MRTmax:	MRTmin:	KRTmax:	KRTmin:
1:	24.45 kN	3.22 kN	17.14 kN	3.58 kN
2:	4.09 kN	-17.61 kN	3.03 kN	-10.53 kN

- Tukipisteisiin syntyy nostetta, varmista ankkurointi

- KRT tukireaktiot ovat vain vertailua varten

TUKIREAKTIOT KUORMITUSTAPAUKSITTAIN (OMINAISARVOT):

Kuormitustapaus:	Omapaino
Tuki:	FZ [kN]:
1:	3.58
2:	3.03

Kuormitustapaus:	Tuulikuorma
Tuki:	FZ [kN]:
1:	13.56
2:	-13.56

HUOMIOT:

- EN 1995-1-1-standardin, sen täydennysosien A1:2008, A2:2014 ja Suomen kansallisten liitteiden sekä RIL 205-1-2017 -suunnitteluohjeen mukainen laskenta
- VTT on tehnyt kolmannen osapuolen tarkistuksen ohjelmalle (VTT-S-03665-17 ja VTT-S-05393-17)
- MRT = Murtorajatila, KRT = Käyttörajatila
- *) Yhteisvaikutustarkastelussa %-luku tarkoittaa mitoitusarvon ja raja-arvon suhdetta, ei todellista käyttöastetta
- Liittyvän alapuolisen rakenteen tukipainekestävyys tulee tarkistaa erikseen
- Mitoituksessa ei huomioida ulokkeiden alle 20 mm taipumaa ylöspäin
- Värähtely- ja taipumatarkastelua ei tehdä alle 200 mm pituisille ulokkeille
- Leikkausmuodonmuutos on mukana käyttöraja-tilamitoituksessa
- Leikkausmuodonmuutos ei ole mukana voimasuureiden laskennassa