



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

MASSIIVIPUUELEMENTIN RAKENNETEKNISET RAT- KAISUT

TEKIJÄ/T: Jani Kosonen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Jani Kosonen	
Työn nimi Massiivipuelementin rakennetekniset ratkaisut	
Päiväys 29.4.2013	Sivumäärä/Liitteet 37/6
Ohjaaja(t) lehtori Matti Mikkonen, lehtori Janne Repo	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Lameco LHT Oy, Insinööritoimisto Tanskanen Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia massiivipuiseen ulkoseinäelementin rakenteellisia ratkaisuja. Työn tilaajana oli Lameco LHT Oy, joka on erikoistunut lamellihiiristä tehtyihin rakennustuotteisiin. Työn tavoitteena oli kehittää rakenteellisesti toimiva elementtirakenteinen massiivipuurunko, jonka kantavana rakenteena on pystysuuntainen massiivipuelementti. Lisäksi työn tavoitteena oli saada taulukkolaskentapohja massiivipuiseen ulkoseinän mitoitukseen.</p> <p>Aluksi työssä tutkittiin massiivipuiseen elementin materiaaliominaisuuksia, valmistusta ja käyttökohteita. Tämän tutkinnan tuloksena voitiin aloittaa elementin mitoitus, kun tiedettiin millaisista materiaaleista elementti koostuu ja miten suuri on elementin vaakasuuntainen kosteuseläminen ja millä tavalla sen vaikutus huomioidaan elementtirakenteessa. Mitoituksessa tarkasteltiin elementin nurjahduskestävyyttä ja mitoitettiin elementissä oleva aukonylityspalkki. Lisäksi tarkasteltiin kantavan ulkoseinäelementin toimivuutta rungon jäykistyksessä.</p> <p>Työn tuloksena saatiin taulukkolaskentapohja, jonka avulla voidaan mitoittaa kyseisiä ulkoseinäelementtejä ja tarkastella niiden sopivuutta rungon jäykistyksessä. Lisäksi saatiin paljon tutkimustuloksia pystysuuntaisen hirsielementin toimivuudesta pientalo- ja puukerrostalokohteissa. Elementtirakenteessa huomattiin myös paljon ongelmakohtia, joiden ratkaisemiseksi jouduttaisiin tekemään vielä runsaasti tutkimustyötä, jotta elementti saataisiin kaupalliseen käyttöön.</p>	
Avainsanat massiivipuu, puukerrostalo, elementtirakentaminen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Jani Kosonen			
Title of Thesis Structural Analysis of Solid Wood Element			
Date	29 April 2013	Pages/Appendices	37/6
Supervisor(s) Mr. Matti Mikkonen, Lecturer , Mr. Janne Repo, Lecturer			
Client Organisation /Partners Lameco LHT Oy, Insinööritoimisto Tanskanen Oy			
<p>Abstract</p> <p>Purpose of this thesis was to study the structural solutions of the the solid wood exterior wall element. The work was commissioned Lameco LHT Ltd, which has specialized in lamellate building products. The aim was to develop a structurally functional prefabricated solid wood structure in which the load-bearing structure is a vertical solid wood element. Another aim was to get a spreadsheet for dimensioning of solid wood exterior wall.</p> <p>The work began as a study of the material properties, processing and applications of a solid wood element from which the new element design were based. Material costs, horizontal moisture expansion and buckle tolerance were also taken into an account in new element design process. The bridging bar over the window opening was also measured in this study.</p> <p>The result was a spreadsheet which can be used to design these elements for the exterior wall and consider the suitability of these elements in the stiffening of the frame. Based on this study new research results were found about vertical timber element functionality in single-family houses and apartment houses. The element structure still has some problem areas which still need more research to solve in order to get the element for commercial use.</p>			
Keywords Solid Wood, Timber Structures, Elements			

ESIPUHE

Kiitän Lameco LHT Oy:tä, että sain mahdollisuuden tehdä heille opinnäytetyön. Lisäksi kiitän Jouko Tanskasta työni hyvästä ohjauksesta.

Kiitos myös työn ohjauksesta Savonia-ammattikorkeakoulun lehtoreille Matti Mikkoselle ja Janne Revolle.

Kuopiossa 29.4.2013

Jani Kosonen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	MASSIIVIPUUELEMENTTI RAKENNUSMATERIAALINA	8
2.1	Massiivipuuelementin materiaaliominaisuudet	8
2.2	Elementin valmistus	9
2.3	Elementin käyttökohteet.....	9
2.4	RunkoPES.....	10
3	ELEMENTTIRAKENTEIDEN LIITOKSET	11
3.1	Elementtien väliset liitokset	11
3.1.1	Ulkoseinäelementtien liitokset	11
3.1.2	Välipohjan liitokset	12
3.2	Elementtien liitokset perustuksiin	14
4	RAKENNUKSEN JÄYKISTYS.....	16
4.1	Välipohjan toimintaperiaate jäykistävänä rakenteena	16
4.2	Levyjäykisteisen tason toimintaperiaate.....	16
4.3	Ulkoseinäelementti jäykistävänä rakenteena	17
5	RAKENTEIDEN MITOITUS	22
5.1	Eurokoodit.....	22
5.2	Kuormat	23
5.2.1	Pysyvät kuormat	23
5.2.1.1	Omapaino	23
5.2.2	Muuttuvat kuormat.....	23
5.2.2.1	Hyötykuorma.....	23
5.2.2.2	Lumikuorma	24
5.2.2.3	Tuulikuorma	27
5.2.3	Kuormitusyhdistelmät	28
5.2.3.1	Murtorajatila.....	28
5.2.3.2	Käyttörajatila.....	29
5.3	Ulkoseinän mitoitus.....	30
5.3.1	Nurjahduskestävyys	30
5.3.2	Elementin aukkopalkin mitoitus.....	33
5.2.2.1	Aukkopalkin leikkausvoimakestävyys.....	33

5.2.2.2 Aukkopalkin taivutuskestävyys.....	34
6 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET	36
LÄHTEET	
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Puurakentaminen on ollut Suomessa aina suosiossa, koska meillä on paljon metsää ja puuta on ollut kattavasti saatavilla rakennusmateriaaliksi. Aikaisemmin puurakentaminen on kuitenkin keskittynyt lähinnä pientalorakentamiseen ja pilari-palkki järjestelmiin halleissa. Viime vuosina on kuitenkin ymmärretty, että puurakentamisen voi viedä aivan uusiin mittasuhteisiin asuntorakentamisessa. Puuelementtirakentamisessa on monia hyviä puolia verrattuna esimerkiksi betonielementtirakentamiseen kuten, teollisen puurakentamisen kilpailukyky, puun keveys verrattuna betoniin, energiatehokkaat ja ilmativiit ratkaisut ja lisäksi puu on myös aidosti kotimainen vaihtoehto, joka tukee suomalaista työllisyyttä. Näiden kriteerien pohjalta on hyvä kehittää suomalaisia ratkaisuja suomalaiseen asuntorakentamiseen.

Opinnäytetyöni tarkoitus on kehittää masiivipuista hirsielementtiä, jonka tarkoitus toimia jo markkinoilla olevien massiivipuuelementtien kilpailijana. Työn tarkoituksena on mitoittaa massiivipuuelementille Eurokoodi-kriteerien mukaiset kestävyudet, sekä tarkastella elementin liitoksia muihin rakenneosiin ja tutkia elementtiä myös jäykistävänä rakenteena.

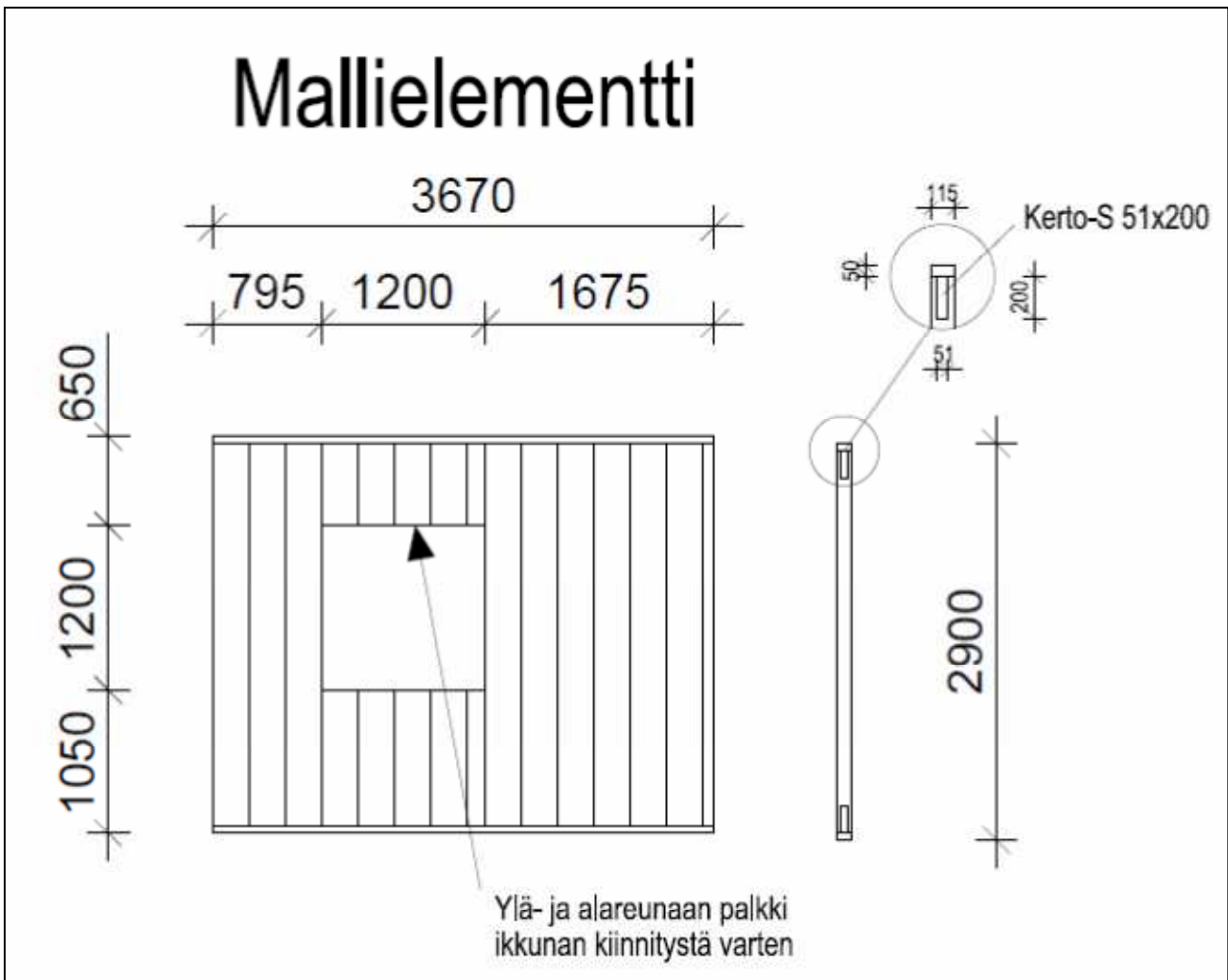
Tässä työssä tilaajana toimii Lameco LHT Oy, joka on erikoistunut hirsirakentamiseen ja haluaa saada oman tuotteensa osaksi kasvavaa puurakentamista asuintaloissa. Esimerkkikohteena tässä työssä käytetään Arkkityypit Oy:n suunnittelemaa 2-kerroksista paritaloa. Työn tuloksena saadaan laskentapohja elementtien mitoitusta varten.

Elementtirakenteiden mitoituksessa käytetään julkaisuja RIL 205-1-2009 ja 201-1-2011. Mitoituksen pohjana toimii myös Puuinfon asuinrakennuksen sovelluslaskelmat. Lisäksi elementtirakenteiden liitosten suunnittelun pohjana on juuri ilmestynyt puuelementtirakenteiden yleinen teollisuusstandardi RunkoPES.

2 MASSIIVIPUUELEMENTTI RAKENNUSMATERIAALINA

2.1 Massiivipuuelementin materiaaliominaisuudet

Opinnäytetyössä käsiteltävä massiivipuuelementti on Lameco LHT Oy:n kehittämä hirsielementtirakenne. Elementti koostuu pystysuuntaisista lamellihirsistä, jotka on laitettu ylä- ja alaohjauspuun väliin. Pystysuuntaisella syysuunnalla saavutetaan merkittävää etua painumattomuuden ansiosta tyypilliseen vaakahirsirakenteeseen verrattuna. Kaikkia hirsistä ei liimata kiinni toisiinsa, jotta voitaisiin hallita elementissä tapahtuvat muodonmuutokset mahdollisimman hyvin. Hirsistä tehdään liimaamalla niin sanottuja pienenlementtejä, johon kuuluu kolme pystyhirttä. Kun yhden hirren leveys on 265 mm, kolme hirttä yhdistämällä pienenlementtien leveydeksi saadaan 795 mm. Pienenlementit kiinnitetään ylä- ja alaohjauspuuhun mekaanisesti, joten kutistuminen tapahtuu jokaisen pienenlementin saumassa erikseen. (kuva 1.) Lameco LHT:n tekemien tutkimusten mukaan hirsien kutistumaksi on saatu noin 0,75 % leveydestä, joten 795 mm pienenlementin kutistumaksi tulee noin 6 mm. Kun pystyhirrellä ei ole painumaa ja todella pieni kutistuminen, voidaan elementistä tehdä koko seinän mittainen, kuitenkin logistiikka huomioonottaen. Pienenlementtien väliset saumat tiivistetään tarkasti ja estetään vesihöyryn pääseminen sauman läpi.



Kuva 1. Mallielementti

2.2 Elementin valmistus

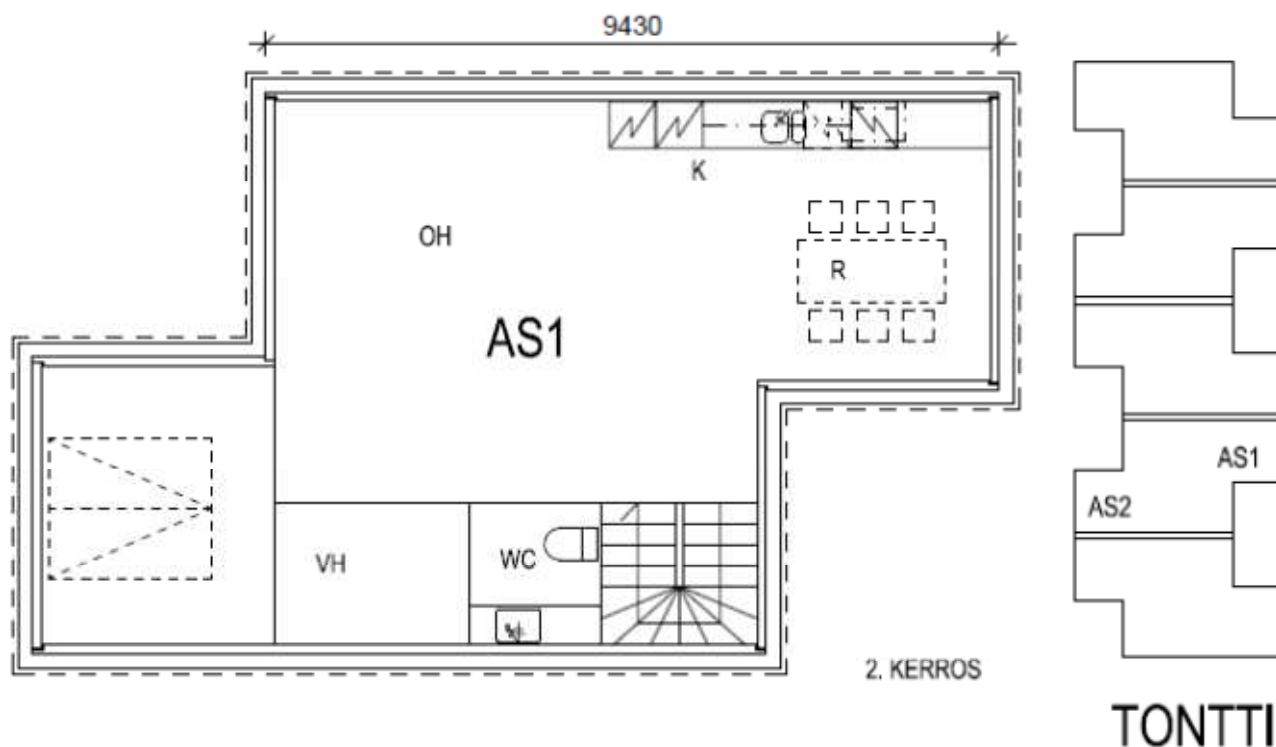
Elementin valmistukseen kuuluu työvaiheita sekä elementtitehtaalla että työmaalla. Tilaajan perimmäisenä tarkoituksena kuitenkin on, että mahdollisimman moni työvaihe tehdään elementtitehtaalla, jotta päästäisiin mahdollisimman pieneen työaikaan rungon pystytyksessä. Ensin tehdään kantava runko eli ylä- ja alaohjauspuut, joiden väliin laitetaan tarvittava määrä pystyhirsistä muodostuvia pienelementtejä. Seuraavaksi tehdään sovitukset tarvittaville aukoille. Jokaiseen aukkoon laitetaan ylä- ja alalaitaan palkki ikkunoiden tai ovien kiinnitystä varten. Aukkojen ylitykset tehdään pääasiassa yläohjauspuun avulla, mutta tarvittaessa asennetaan aukonylityspalkki. Aukon kohdalla sijaitsevat hirret eivät kannata mitään, vaan ovat ripustettuna ylä- ja alakarapuuhun. Sitten tehdään koolaukset kantavan elementin ulkopinnalle. Koolauksen väliin asennetaan tarvittavat lämmöneristeet ja lopuksi asennetaan vielä julkisivuverhouskin. Työmaalla tehdään mahdollisesti julkisivuverhous, jos se on esimerkiksi tiilverhous, mutta puujulkisivun voi asentaa jo tehtaalla. Työmaalle jää myös laitettavaksi sisäverhous, esimerkiksi kipsilevy, joka vaaditaan puukerrostaloissa palonsuojausta varten.

2.3 Elementin käyttökohteet

Tässä opinnäytetyössä kehitettävää massiivipuuelementtiä on tarkoitus alkaa käyttämään kaikenlaisessa puuelementtirakentamisessa. Esimerkkikohteena on 2-kerroksinen talo (kuvat 2 ja 3), jossa on kaksi huoneistoa. Lisäksi näitä 2-kerroksisia taloja on tarkoitus liittää toisiinsa rivitalomaisesti. Vaikka tämän esimerkkikohteen voisi määritellä pientaloksi, elementin käyttömahdollisuudet on myös tarkoitus jatkaa puukerrostalorakentamiseen. Puukerrostalorakentaminen on ollut Keski-Euroopassa jo pitkään yleistä, mutta Suomessa se on vasta oikeastaan alkamassa lieventyneiden puukerrostalon palomääräysten ansiosta. Tämän johdosta monenlaisia tuotteita ja vaihtoehtoja tarvitaan.



Kuva 2. Esimerkkitalon 1. kerros



Kuva 3. Esimerkkitalon 2. kerros ja tontti

2.4 RunkoPES

RunkoPES on puuelementtirakentamisen yleinen teollisuusstandardi. Betonialalla samankaltainen runko-BES (Betoni elementti systeemi) on ollut jo käytössä 70-luvulta asti, mutta puuelementtiteollisuuden yleinen standardi on tullut käyttöön vasta vuoden 2012 aikana. RunkoPES standardin tarkoitus on luoda yhtenäiset periaatteet, jotta rakennus voidaan suunnitella ottamatta kantaa rakennuksen toteuttajaan tai tiettyyn yksityiseen ratkaisuun. Lisäksi rakenneratkaisujen toimittajat pystyvät tarjoamaan omia ratkaisuja tasa-arvoisesti ja kustannustehokkaasti, koska eri valmistajien rakenneratkaisut ovat tarvittaessa liitettävissä toisiinsa. Yleinen standardi ei ole talotyyppikohtainen, vaan se soveltuu sekä pientalo- että puukerrostalorakentamiseen. Runkojärjestelminä käsitellään kantavat seinät runkojärjestelmänä ja pilari-palkki-järjestelmä. Standardissa käsitellään ranka- ja massiivipuurakenteet ja annetaan esimerkkejä näiden puurakenteiden liitoksista ja rakennetyypeistä. RunkoPES:in tarkoituksena on myös, että ulkovaipan energiatehokkuutta voidaan lisätä liittymätyyppien säilyessä kuitenkin ennallaan. RunkoPES toimii tässä opinnäytetyössä päällimmäisenä ohjeena massiivipuuelementtiä suunniteltaessa. (Puuinfo.)

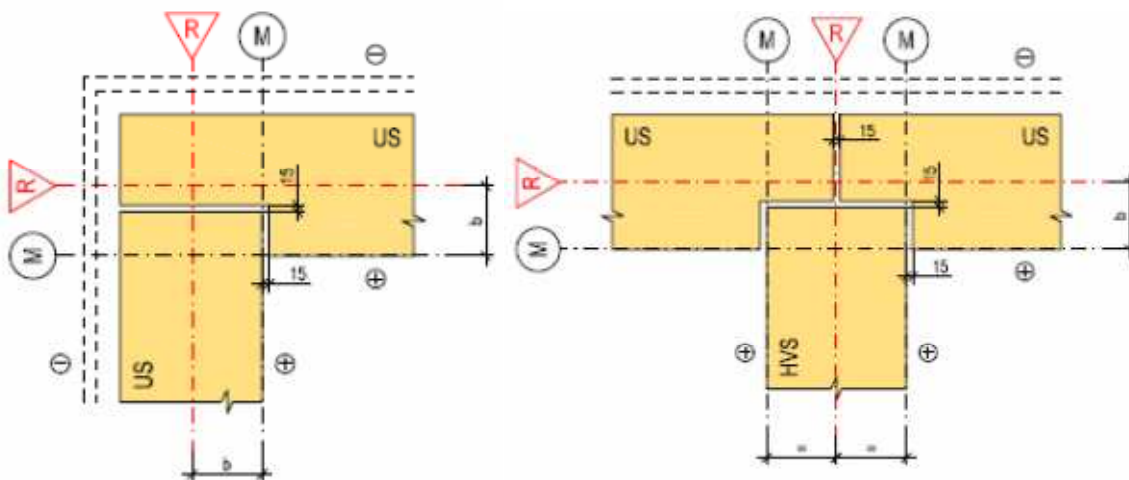
3 ELEMENTTIRAKENTEIDEN LIITOKSET

Elementtien liitokset suunnitellaan niin, että ne ovat yhteensopivia myös muiden valmistajien tuotteiden kanssa. Siksi kaikissa rakenteiden liitoksissa käytetään pohjana puurakenteiden puuelementtistandardin eli RunkoPES- järjestelmän mukaisia liitoksia. Lisäksi huomioon otetaan elementtien tiivistysvaatimukset ja etenkin hirsielementille tyypilliset kutistumiset ja turpoamiset.

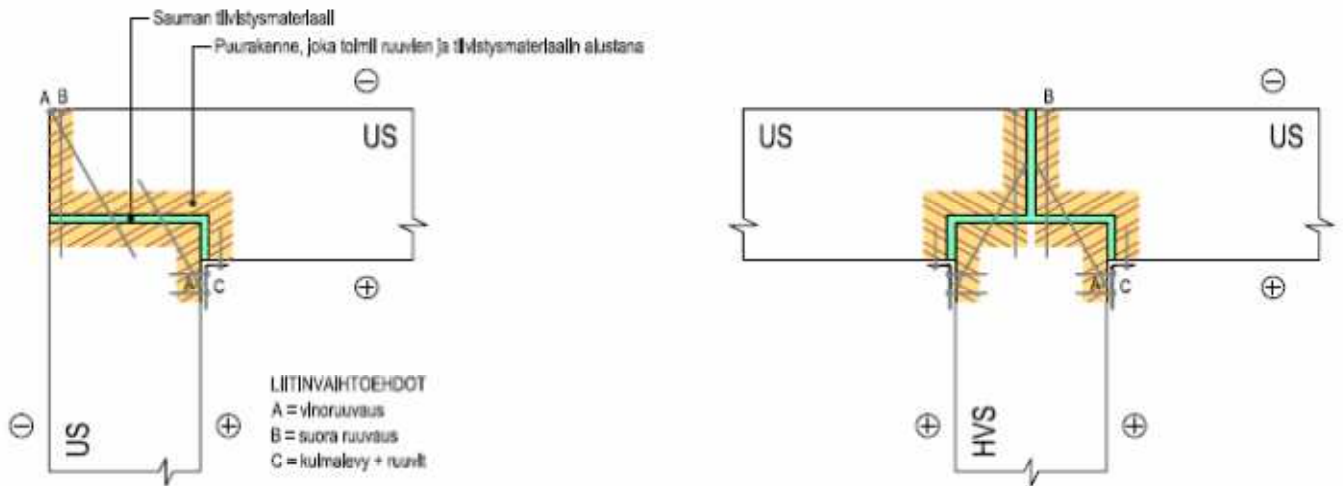
3.1 Elementtien väliset liitokset

3.1.1 Ulkoseinäelementtien liitokset

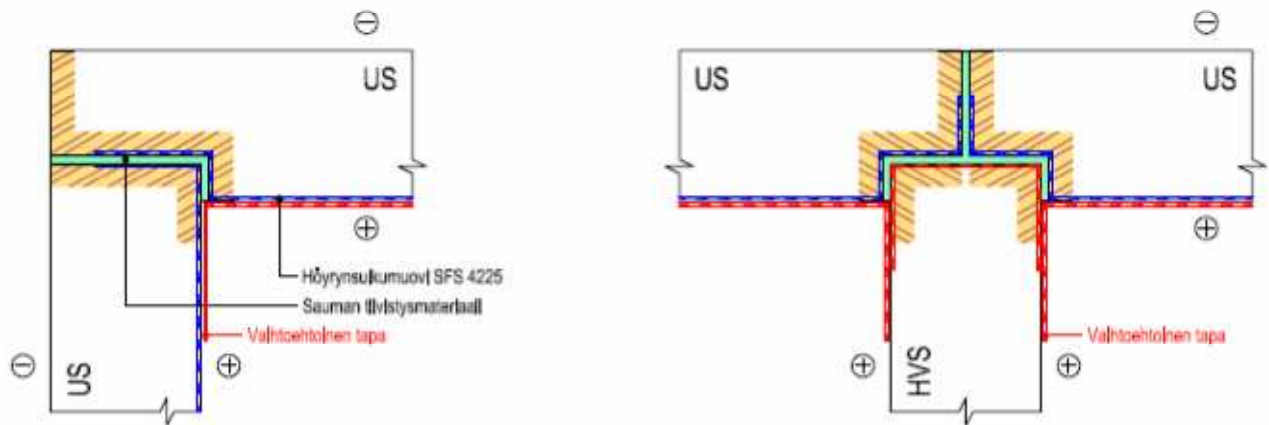
Ulkoseinien liitokset sijaitsevat pääasiassa rakennuksen nurkissa, koska elementit ovat yleensä rakennuksen koko seinän mittaisia. Poikkeuksena on kuitenkin huoneistojen välinen seinä (kuva 4), jolloin ulkoseinä täytyy katkaista huoneistojen välillä ääni- ja värähtelyteknisistä syistä. Jokainen elementtisauma täytyy tiivistää ja elementit täytyy kiinnittää toisiinsa kuvan 5 mukaisesti. Ilma- ja höyrysulut asennetaan elementtien saumoihin kuvan 6 mukaisesti. (RunkoPES.)



Kuva 4. Ulkoseinäelementtien liittymien geometria (RunkoPES)



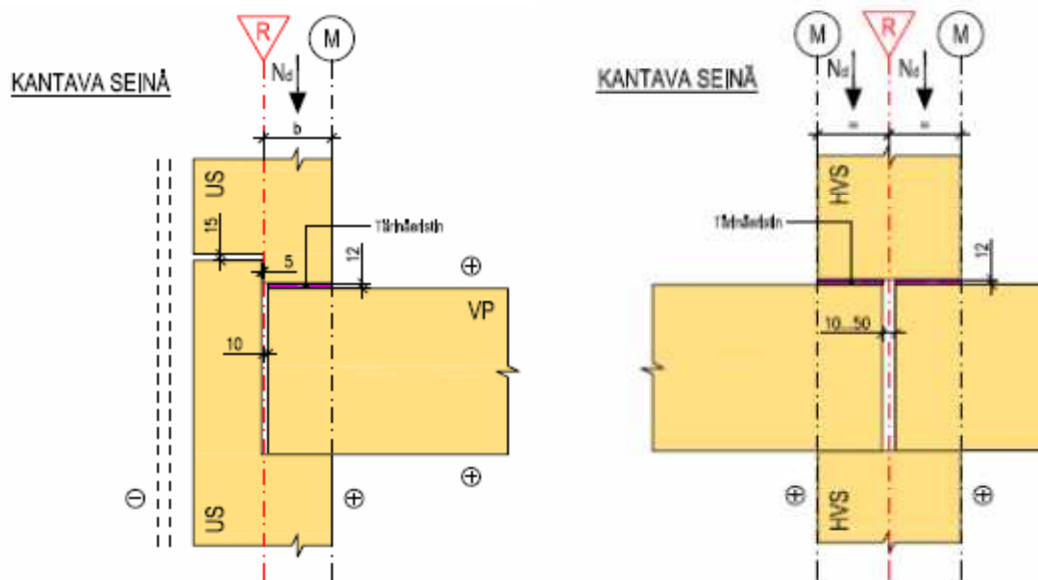
Kuva 5. Ulkoseinäelementtien kiinnitys- ja tiivistysperiaatteet (RunkoPES)



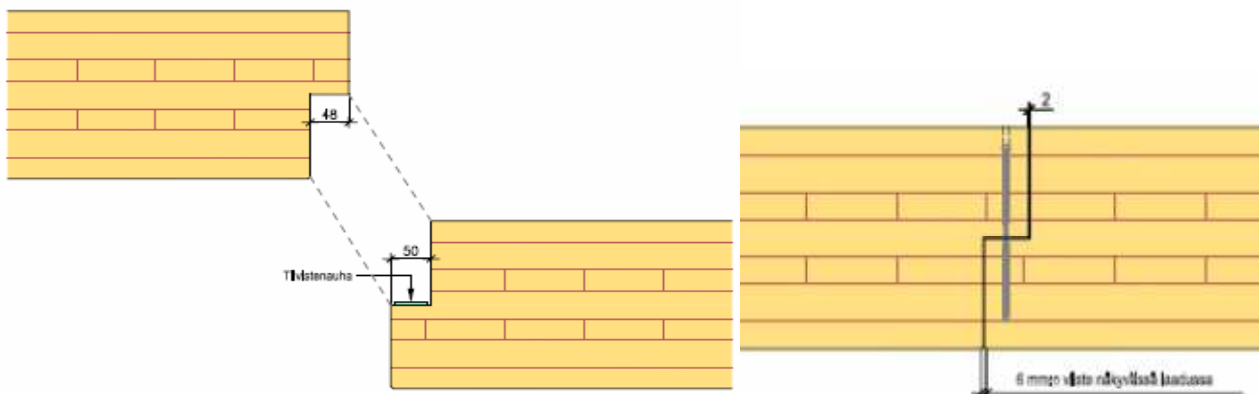
Kuva 6. Ilma- ja höyrysulun sijainti suurelementtien liittymissä (RunkoPES)

3.1.2 Välipohjan liitokset

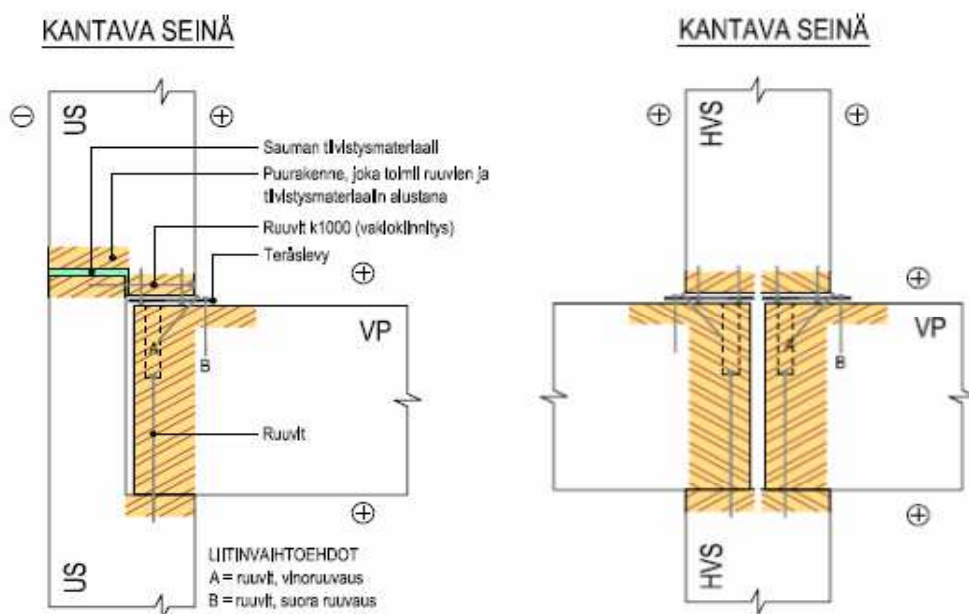
Välipohjaelementti tulee koko kantavan ulkoseinärakenteen päälle keskeisesti, jolloin välipohja ei aiheuta ulkoseinälle epäkeskeisiä voimia. Huoneistojen välissä välipohjaelementtien välille jätetään noin 50 mm:n rako kuvan 7 mukaisesti, jotta jokainen huoneisto voi toimia omana rakenteenaan. Välipohjaelementtien välinen liitos tehdään kuvan 8 mukaan, jolloin elementtien mahdollinen kutistuminen tapahtuu jokaisen elementin saumassa. Välipohjaelementti kiinnitetään ulkoseinäelementtiin ruuveilla, joille on tehty valmiiksi reikä välipohjaelementtiin (kuva 9). Lisäksi välipohjan päälle asennetaan tärinäeristimet kuvan 10 mukaisesti. (RunkoPES.)



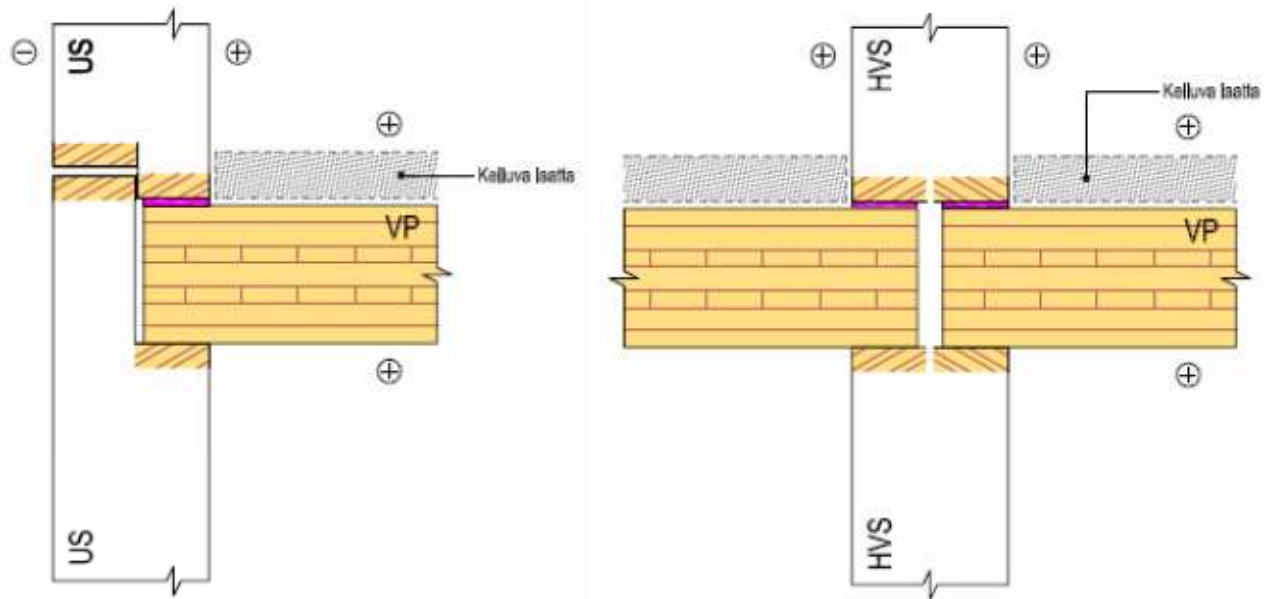
Kuva 7. Ulkoseinäelementtien liittyminen välipohjaan (RunkoPES)



Kuva 8. Välipohjaelementtien välinen liitos (RunkoPES)



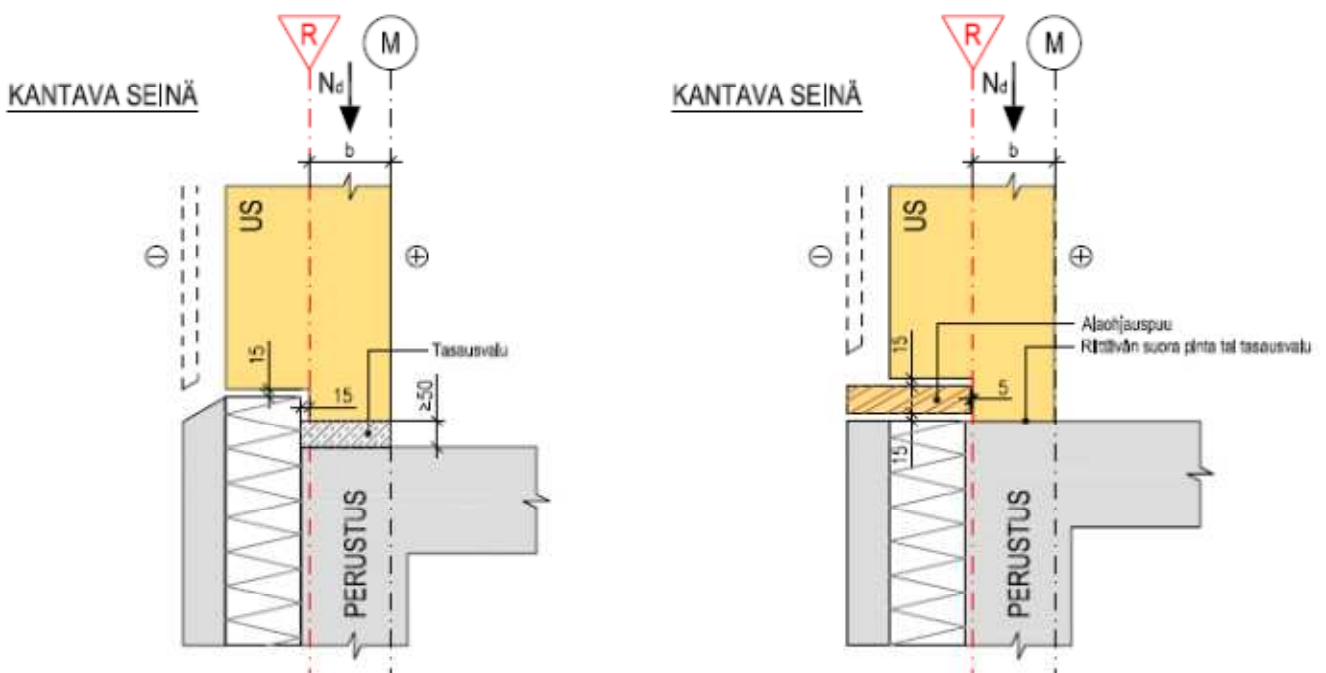
Kuva 9. Ulkoseinäelementin ja välipohjan liitoksen tiivistysperiaatteet (RunkoPES)



Kuva 10. Tärinäeristimien sijainti välipohjan liittymässä (RunkoPES)

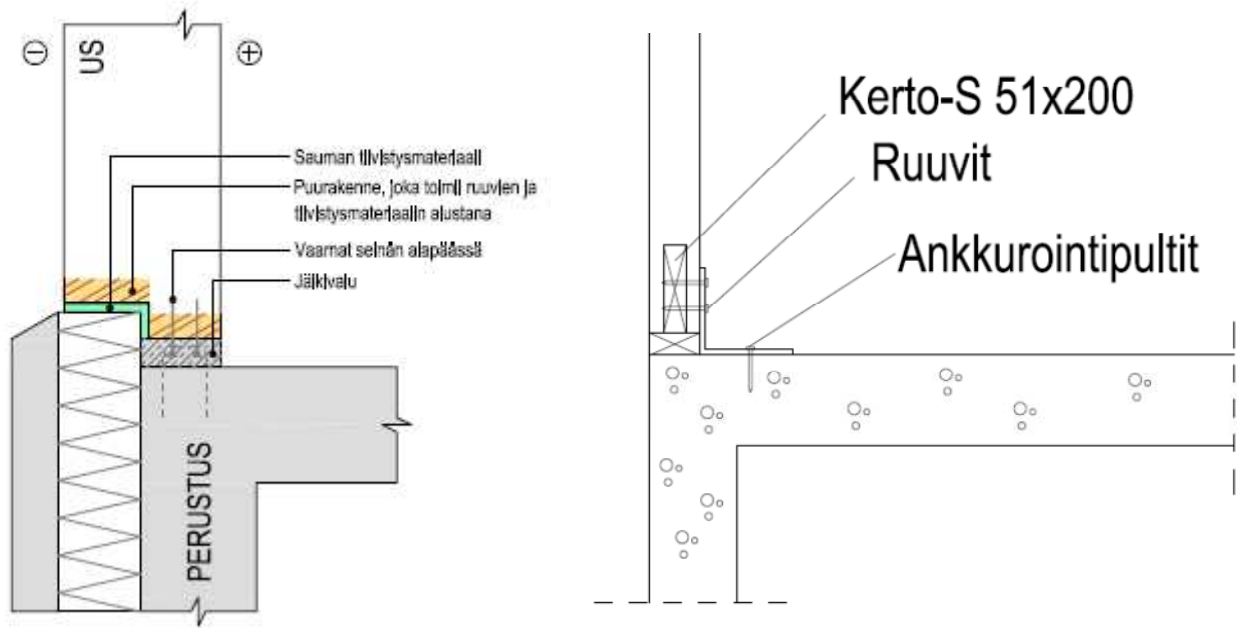
3.2 Elementtien liitokset perustuksiin

Elementit liittyvät perustuksiin pääasiassa kuvan 11 mukaisesti. Kantavat ulkoseinät ovat myös jäykisteseiniä, joten niiden pitää kestää niille tulevat vaaka- ja pystyvoimat ja viedä ne perustuksille. Jokainen pienenälementti pitää kiinnittää jäykästi perustuksiin esimerkiksi kuvan 11 mukaisella ruuviliitoksella. (RunkoPES.) Tarvittaessa voidaan käyttää kulmateräksiä vahvistamaan liitosta (kuva 12).



Kuva 11. Kantavien seinien liittyminen perustuksiin (RunkoPES)

KANTAVA SEINÄ



Kuva 12. Ulkoseinän ja perustusten välinen kiinnitys ja tiivistäminen (RunkoPES)

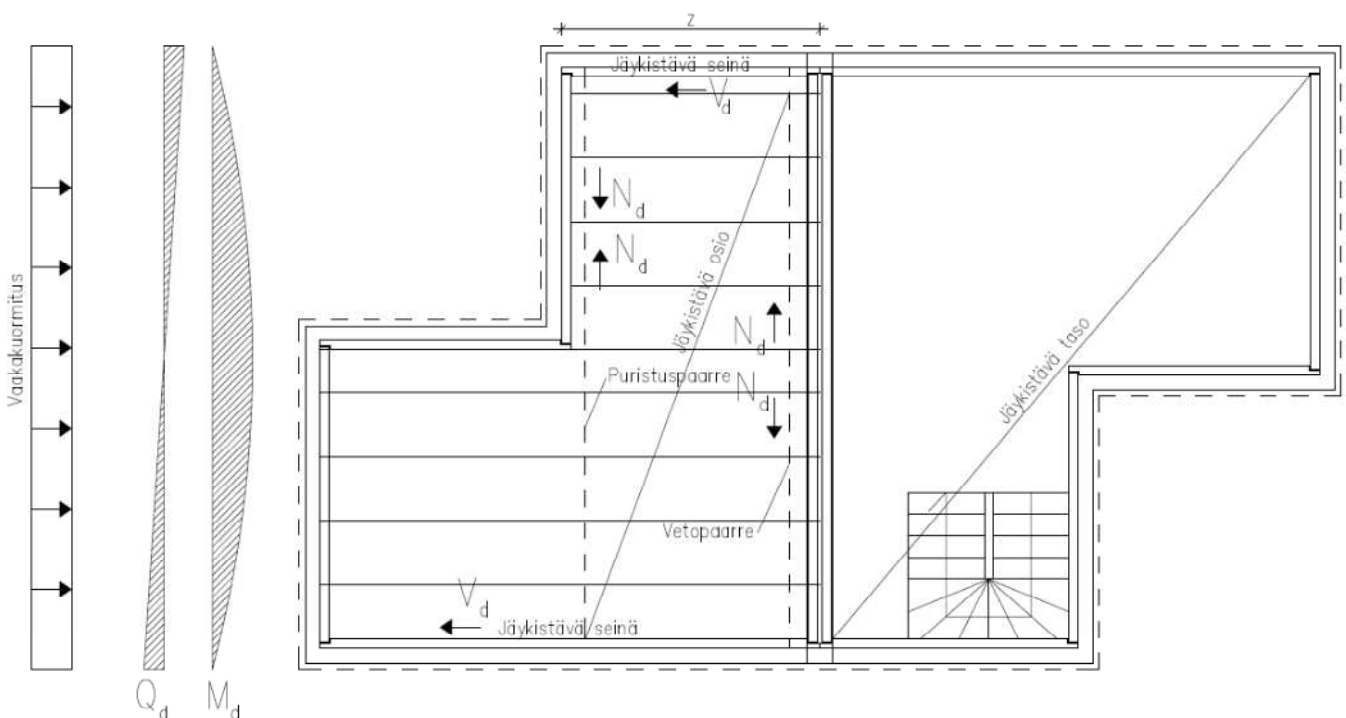
4 RAKENNUKSEN JÄYKISTYS

4.1 Välipohjan toimintaperiaate jäykistävänä rakenteena

Puukerrostalon jäykistäminen eroaa perinteisen betonikerrostalon jäykistämisestä. Puukerrostalon välipohjaa ei voida olettaa äärettömän jäykäksi koko rakennuksen kokoiseksi rakenteeksi, joka jakaisi kuormat kaikille jäykistävälle seinille. Tämä johtuu siitä että, puukerrostalon välipohja joudutaan katkaistamaan jokaisen huoneiston kohdalla ääni- ja värähtelyteknisistä syistä. Puukerrostalossa jokainen huoneisto muodostaa oman jäykistyskenttensä, jotka kytketään toisiinsa pistemäisesti siten, että vaakakuormat jakautuvat eri huoneistoille. (RunkoPES.) Tässä kohteessa välipohja on tarkoitus tehdä samoista pienenlementeistä, kuin ulkoseinäelementti. Välipohja kasataan 795 mm levyisistä hirsielementeistä ja niiden paksuus on noin 300 mm, välipohjajamitoituksen mukaan.

4.2 Levyjäykisteisen tason toimintaperiaate

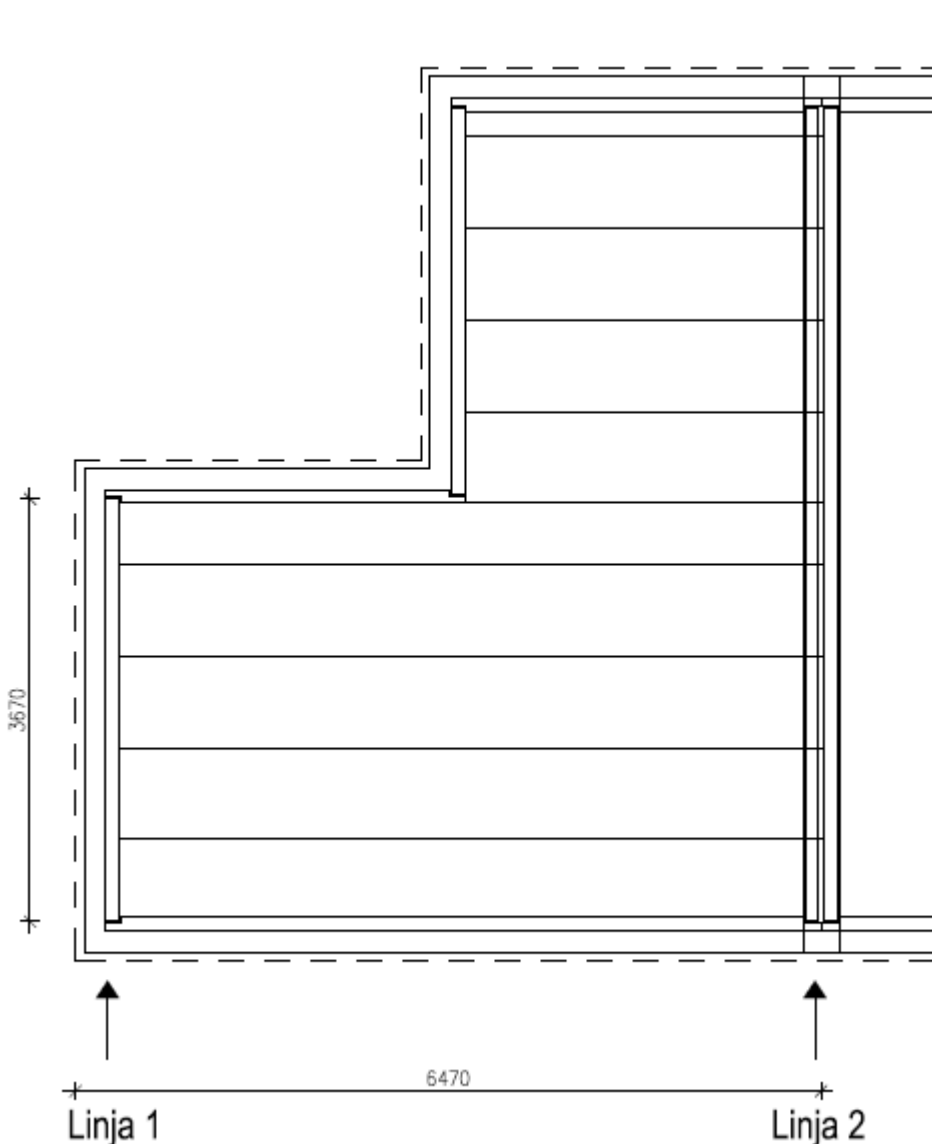
Välipohja, joka on jäykistetty levyjäykisteillä, mitoitetaan tasoon kohdistuvalle leikkausvoimalle ja tasossa vaikuttavalle taivutusmomentille. Nämä kuormitukset vastaanotetaan tasossa olevalla paarrerakenteella. Paarre voi olla joko puu- tai teräsrakenteinen (kuva 13). Isoin hyöty tasoperiaatteesta saadaan puukerrostalon palotilanteessa. Kun jokainen välipohjataso koostuu toisistaan riippumattomista jäykistystasoisista, voidaan palotilanteessa sallia yhden jäykistystason toimivuuden loppuminen vaikuttamatta muihin jäykistyskenttiin. Lisäksi tulee varmistaa, että viereiset huoneistot vastaanottavat palotilanteessa olevan huoneiston mahdolliset vaakakuormat. (RunkoPES.)



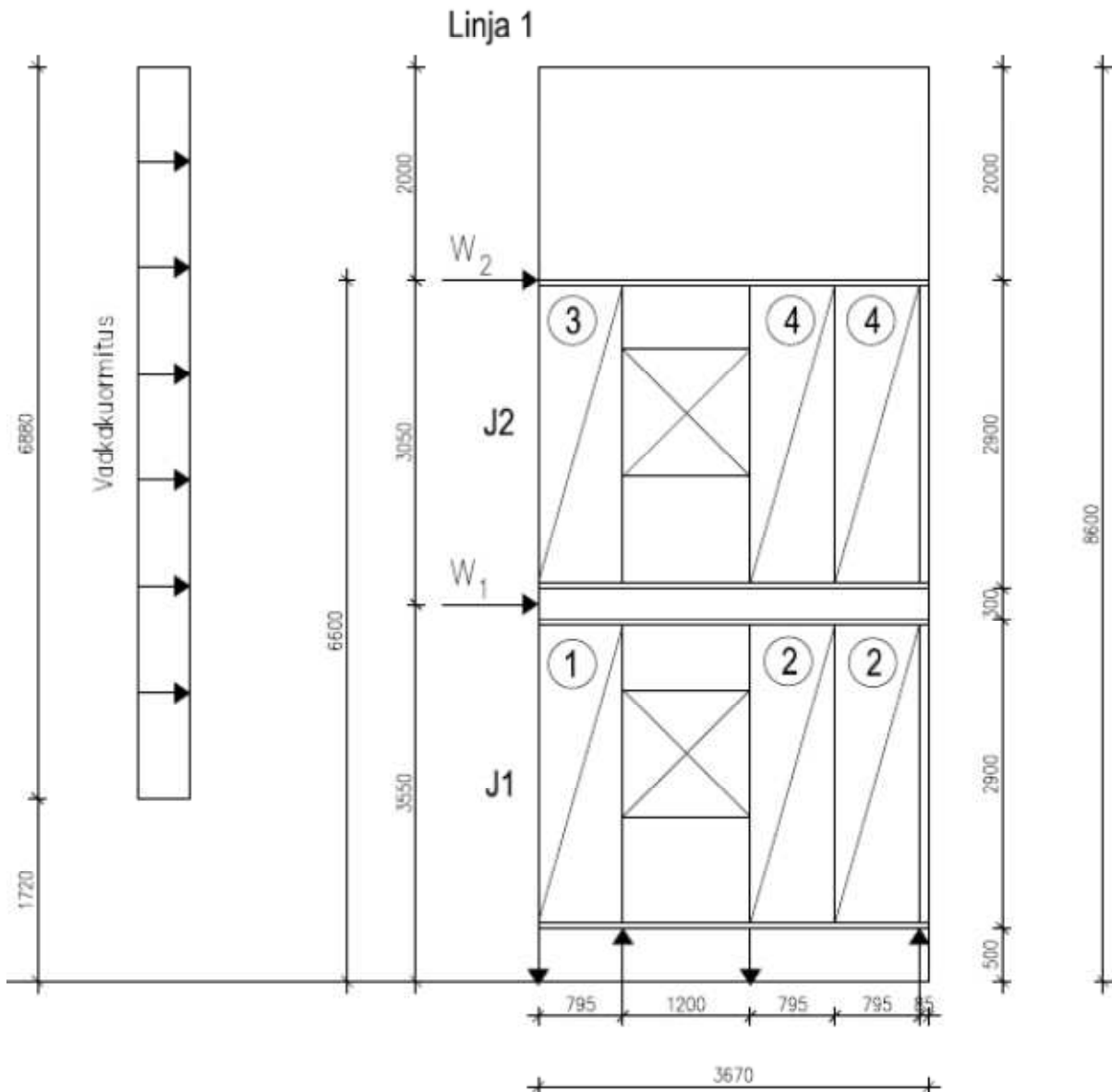
Kuva 13. Levyjäykisteisen tason toimintaperiaate esimerkkitalossa

4.3 Ulkoseinäelementti jäykistävänä rakenteena

Ulkoseinäelementin jäykistämistä tutkittaessa käytetään lähteenä Puuinfon Eurocode 5 mukaan tehtyä asuinrakennuksen sovelluslaskelmia. Näissä sovelluslaskelmissa kyseessä on kuitenkin rankarakenteinen talo, joka on jäykistetty levyjäykistykseen avulla. Rankaseinässä levytyksen ja ruuvauksen avulla saadaan jäykistelohkoja, jotka muodostavat jäykistävän rakenteen. Massiivipuuelementtiseinässä levytystä ei tarvita, vaan jokainen pienenä elementti itsessään muodostaa jäykistelohkot (kuvio 2). Levyjäykistysteorian mukaan jokaisen jäykistyslohkon täytyy kuitenkin olla vähintään korkeus $h/4$ ja elementissä olevia aukkoja ei myöskään lasketa mukaan jäykistäviksi lohkoiksi. Jokainen jäykistysseinässä oleva jäykistyslohko täytyy ankkuroida perustuksiin. Jäykisteseinät mitoitetaan hetkellisessä aikaluokassa ja jäykistysseinien mitoituksessa voidaan huomioida stabiloivana vaikutuksena yläpuolelta tulevan kuorma rakenteiden omasta painosta. Työssä tutkitaan linjalla 1 (kuvio 1) olevat jäykistysseinät ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa. Jäykistysseinän mitoitus löytyy liitteestä 3.



Kuvio 1. Jäykistysseinien lähtötilanne



Kuvio 2. Jäykistysseinien lähtötilanne

Jäykistysmitoitus alkaa tuulen aiheuttaman viivamaisen käyttörajatilakuorman w_1 ja w_2 (kuvio 15) laske-
misella kaavasta: (EC5, sovelluslaskelmat, asuinrakennus)

$$w_{k,1} = 1,25 * c_f * q_k(h) * \left[(c + h - 0,2 * H) + b + \left(\frac{h}{2} \right) \right] \quad (1)$$

,jossa

c_f = voimakerroin, umpinainen rakennus 1,3 (RIL 205-1-2009,39)

$q_k(h)$ = tuulen nopeuspaine

c = perusmuurin korkeus

h = elementin korkeus

H = rakennuksen korkeus

b = välipohjan paksuus

$$w_{k,2} = 1,25 * c_f * q_k(h) * (a + \frac{h}{2}) \quad (2)$$

,jossa

a = yläpohjan projektion korkeus

Niiden avulla saadaan laskettua Jäykisteseinien J1 ja J2 yläreunassa vaikuttavat vaakavoimat murtoraja-tilassa kaavasta:

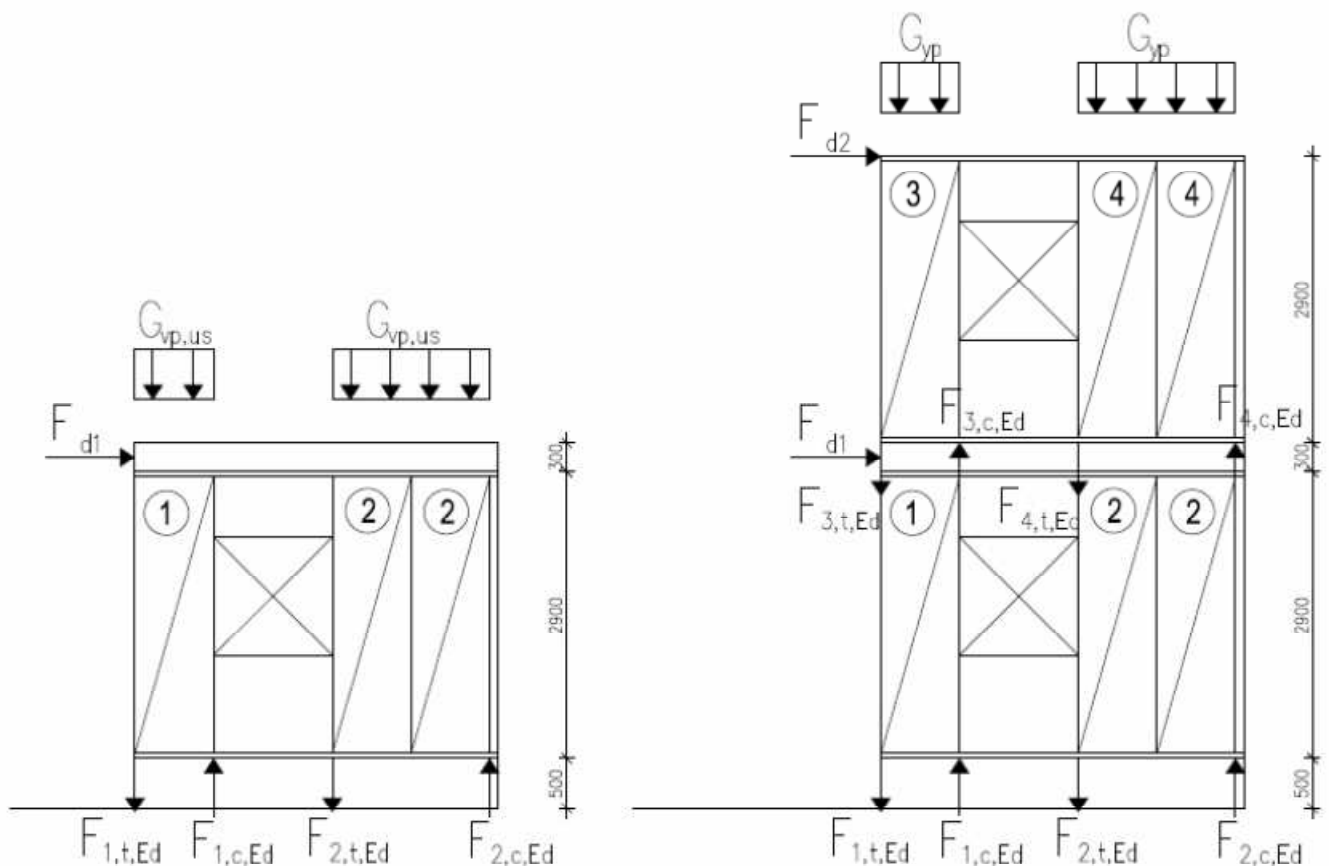
$$F_d = 1,5 * w_k * \frac{L}{4} \quad (3)$$

,jossa

L = Rakennuksen pidemmän sivun mitta

w_k = J1 ($w_{,1} + w_{k,2}$), J2 ($w_{k,2}$)

Jäykisteseinässä J1 voidaan vähentää vaakakuormasta välipohjan- ja ulkoseinän omapaino. Jäykisteseinässä J2 voidaan vähentää yläpohjan omapaino. Omapainon vähennykset lasketaan kuvion 3 mukaisesti jokaiselle lohkolle erikseen. (Eurocode 5, sovelluslaskelmat, asuinrakennus)



Kuvio 3. Seinälohkoissa vaikuttavat voimat

Pystykuorman vähennys saadaan kaavasta:

$$G_o = (G_{us} + G_{vp}) * b \quad (4)$$

, jossa

G = rakenteiden omapainosta syntyvä pystykuorma

b = lohkon leveys

Seuraavaksi lasketaan omapainon vaadittava kuorma, joka tarvittaisiin jäykistämään elementti vaakavoimaa vastaan. Se saadaan kaavasta:

$$G_v = 2 * (F_d * l_o) / k \quad (5)$$

,jossa

F_d = jäykistysseinään kohdistuva vaakavoima

l_o = seinälohkon osuus koko seinästä

k = kaavan varmuutta lisäävä kerroin

Kun vaadittavasta G_v :n arvosta vähennetään omapaino, saadaan vaadittavan ankkurointivoiman suuruus

$F_{t,Ed}$ ja $F_{c,Ed}$.(kuvio 3)

$$F_{t,Ed} = F_{c,Ed} = G_v - G_o \quad (6)$$

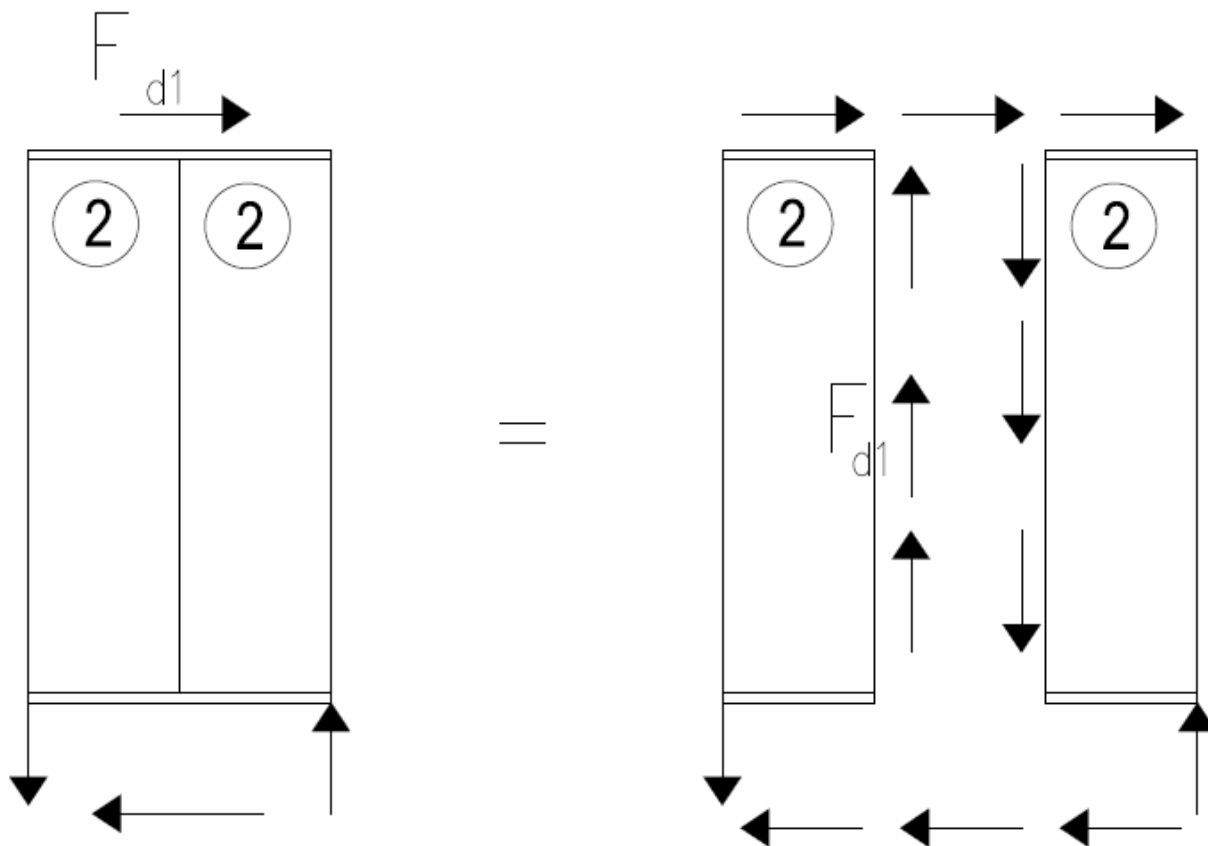
Suomessa massiivipuelementin jäykistyksestä löytyy suhteellisen vähän tietoa. Jussi Kakkonen käsittelee Pohjois-Karjalan ammattikorkeakouluun tekemässään opinnäytetyössä *sovelluslaskelmat jäykistävään CLT-elementtiseinään toteutettavasta tappivaarnaliitoksesta ja ruuviliitoksesta* CLT- elementtiseinän jäykistysmitoitusta, jossa on huomioitu elementtien saumoissa vaikuttava leikkausvoima. Siinä elementtien jäykistystä tarkastellessa on käytetty lähteenä Ruotsissa tehtyä Martinssonin massiivipuukäsikirjaa. Sen mukaan elementin ylä- ja alapäässä vaikuttava vaakavoima on yhtä suuri kuin elementtien saumassa vaikuttava kuormitus (kuvio 4). Lisäksi leikkausvoima on jokaisessa saumassa yhtä suuri, jos elementit ovat identtisiä. Leikkausvoiman suuruus saadaan laskettua kaavasta: (massivträ handboken, 2006, 74)

$$F_v = F_d * \frac{h}{b} \quad (7)$$

,jossa

F_d = elementtiin vaikuttava vaakavoima

h = elementin korkeus
 b = koko elementtilohkon leveys



Kuvio 4. Elementissä olevat vaaka- ja pystyvoimat ovat samansuuruiset (Massivträ handboken, 2006,75)

Tässä työssä elementtisauman leikkausvoima otetaan vastaan ylä- ja alareunassa sijaitsevilla karapuilla, joten seuraavan ehdon tulee täyttyä.

$$V_{max,k} \geq F_v \quad (8)$$

,jossa

$V_{max,k}$ = Karapuun maksimi leikkausvoima

$$V_{max,k} = \frac{2}{3} * b_{ef} * h * f_{v,d} \quad (9)$$

,jossa

b_{ef} = palkin tehollinen paksuus

h = palkin korkeus

$f_{v,d}$ = leikkauslujuuden ominaislujuus

5 RAKENTEIDEN MITOITUS

5.1 Eurokoodit

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia yleisiä standardeja. Eurokoodien käyttö vaatii jokaiselta maalta kuitenkin kansallisen liitteen laatimisen. Suomen kansallisista liitteistä vastaa pääasiassa ympäristöministeriö. Poikkeuksena ovat esimerkiksi siltarakenteet, joista vastaavat muut hallinnonalat. Eurokoodit koostuvat kokonaisvarmuuden määrittämisperiaatteista, erilaisista kuormista, kuormitustapauksista ja yksityiskohtaisista ohjeista eri rakennusmateriaaleille. Suomessa eurokoodien julkaisusta huolehtii Suomen Standardisoimisliitto SFS. Suomessa eurokoodit otettiin virallisesti käyttöön vuonna 2007, mutta niiden todellinen käyttöönotto on ollut hidasta ja niitä on käytetty päällekkäin rakentamismääräyskokoelman B-osan määräysten ja ohjeiden kanssa. (ympäristöministeriö)

Suomen Standardisoimisliitto SFS on luonut seuraavat Eurokoodi-esistandardien kansalliset soveltamisasiakirjat (eurocodes):

Eurokoodi 0: Suunnitteluperusteet

Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat

Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu

Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu

Eurokoodi 4: Betoni-teräслиittorakenteiden suunnittelu

Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu

Eurokoodi 6: Muurattujen rakenteiden suunnittelu

Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu

Eurokoodi 8: Maanjäristysmitoitus

Eurokoodi 9: Alumiinirakenteet

Tässä tutkimuksessa massiivipuulementille tulevien kuormien määrittämiseen käytetään Eurocode 1 standardia EN1991, Rakenteiden kuormat ja massiivipuulementtien mitoittamiseen Eurocode 5 standardia EN1995, Puurakenteiden suunnittelu

5.2 Kuormat

5.2.1 Pysyvät kuormat

5.2.1.1 Omapaino

Rakennuskohteen omapainon ominaisarvo lasketaan nimellismittojen ja nimellisten tilavuuspainojen perusteella. Tehdasvalmisteisille rakennusosille ja laitteille käytetään valmistajan ilmoittamia arvoja. Kuivalle havupuutavaralle ja siitä liimaamalla valmistetuille rakennusmateriaaleille (mm. liimapuu, LVL ja vaneeri) käytetään tilavuuspainoa 5,0 kN/m³. Rakennuskohteen omaan painoon kuuluvat kantavat ja ei-kantavat rakennusosat, kiinteät laitteet sekä maakerrosten ja sepellysten painot. (Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 10.)

5.2.2 Muuttuvat kuormat

5.2.2.1 Hyötykuorma

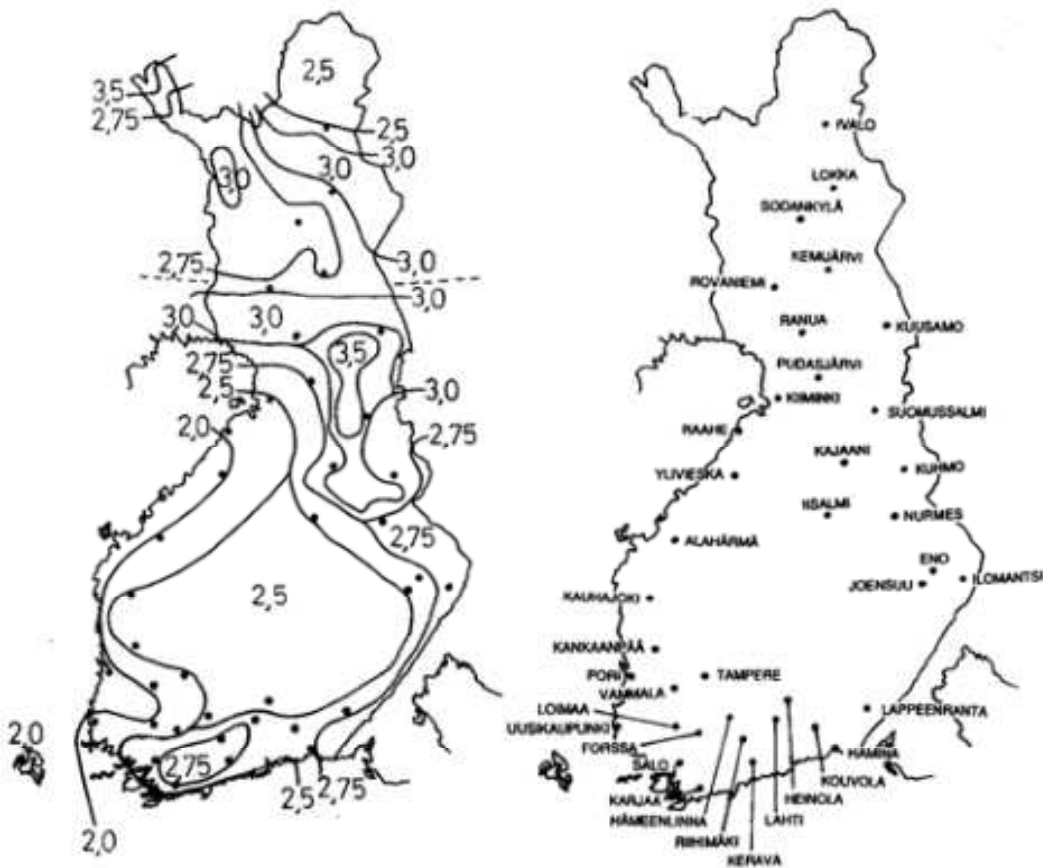
Rakennusten hyötykuormat aiheutuvat tilojen käytöstä. Hyötykuormina käytetään tilan käyttötarkoituksesta riippuvia tasan jakautuneita kuormia, pistekuormia ja vaakasuuntaisia viivakuormia. Hyötykuorma oletetaan liikkuvaksi kuormaksi, joka vaikuttaa tarkasteltavan rakenteen kannalta epäedullisimmassa osassa. Hyötykuormat ovat muuttuvia kuormia. Niitä ovat esimerkiksi henkilökuormat, liikuttavat väliseinät, ajoneuvot ja huonekalut. Taulukossa 1 on esitetty tavallisempien hyötykuormien ominaisarvot. (Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 10.)

Taulukko 1. Hyötykuormien ominaisarvoja (RIL 205-1-2009,32)

Käyttötarkoitukseluokka ja tila	Tasainen Kuorma q_k (kN/m ²)	Pistekuorma Q_k (kN)	vaakakuorma q_k (kN/m)
Luokka A: asuintilat			
Lattiat	2,0	2	0,5
Portaat	2,5	2	0,5
Parvekkeet	2,5	2	0,5
Luokka B: Toimistotilat	2,5	2	0,5
Luokka C: Kokoontumistilat			
C1:Pöytäalueet	2,5	3	0,5
C2:Kiinteiden istuimien alueet	3,0	3	1
C3:Esteettömät alueet	4,0	4	1
C4:Liikuntatilat ja näyttämöt	5,0	4	1
C5:Tungokselle alttiit alueet	6,0	4	3

5.2.2.2 Lumikuorma

Lumikuormaa määritettäessä täytyy tietää maassa olevan lumikuorman ominaisarvo s_k . Maassa olevan lumikuorman ominaisarvo perustuu keskimääräiseen 50 vuoden toistumis- tai ylittymisaikaan. Kuviossa 5 on esitetty maanpinnan lumikuorman ominaisarvoja. (RIL 201-1-2011 Osa 1.3, 91)



Kuvio 5. Maanpinnan lumikuorman ominaisarvot (RIL 201-1-2011 Osa 1.3, 92)

Kattojen lumikuormaa määritettäessä tulee ottaa huomioon lumen kinostuminen katolle. Kinostumista voivat aiheuttaa esimerkiksi katon muoto, pinnan karheus, katon lämpöominaisuudet ja viereisten rakennusten läheisyys. (RIL 201-1-2011 Osa 1.3, 94)

Katon lumikuorma s lasketaan seuraavasti:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (10)$$

,jossa

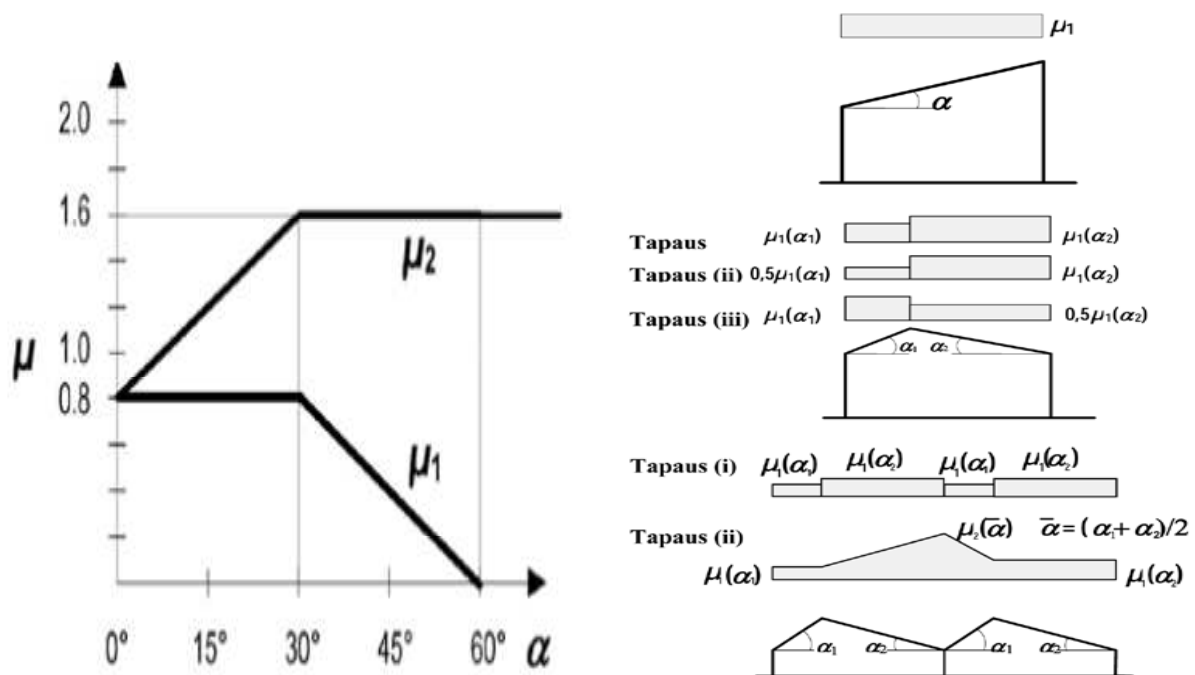
- μ_i Lumikuorman muotokerroin (taulukko 2)
- s_k maassa olevan lumikuorman ominaisarvo (kN/m²)

C_e tuulensuojakerroin (tuulinen maasto 0,8 muuten 1,0)

C_t lämpökerroin, jonka arvo tavallisesti 1,0

Taulukko 2. Lumikuorman muotokertoimet. (RIL 201-1-2011 Osa 1.3,95)

Katon kaltevuuskulma α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8 * \alpha/30$	1,6	1,6



Kuvio 6. Lumikuorman muotokertoimet (RIL 201-1-2011 Osa 1.3,95)

Jos katto on korkeampaa rakennuskohdetta vasten, katon muotokertoimet ovat seuraavanlaiset: (RIL 201-1-2011 Osa 1.3, 100)

$$\mu_1 = 0,8$$

$$\mu_2 = \mu_s + \mu_w, \text{ jossa}$$

μ_s = ylemmältä katolta liukuvan lumen aiheuttaman lumikuorman muotokerroin

μ_w = tuulesta johtuvan lumikuorman muotokerroin

μ_s :n arvo saadaan seuraavasti:

Kun $\alpha \leq 15^\circ$, $\mu_s = 0$

Kun $\alpha > 15^\circ$, $\mu_s =$ määrittäminen lisäkuormasta, joka on 50 % ylemmän katon viereisen lappeen lasketusta maksimilumikuormasta.

μ_w :n arvo saadaan seuraavasti:

$$\mu_w = (b_1 + b_2)/2h < \gamma h/s_k \quad (11)$$

, jossa

h = kattojen tasoero (kuvio 7)

b_1 ja b_2 = rakennuksen osien pituus (kuvio 7)

γ = lumen tilavuuspaino (2kN/m^3)

s_k = ominaislumikuorma maassa (kN/m^2)

Kertoimen μ_w vaihteluväli määräytyy pinta-alan mukaan:

$0,8 \leq \mu_w \leq 2,5$, jos alemman katon pinta-ala $\geq 6\text{m}^2$

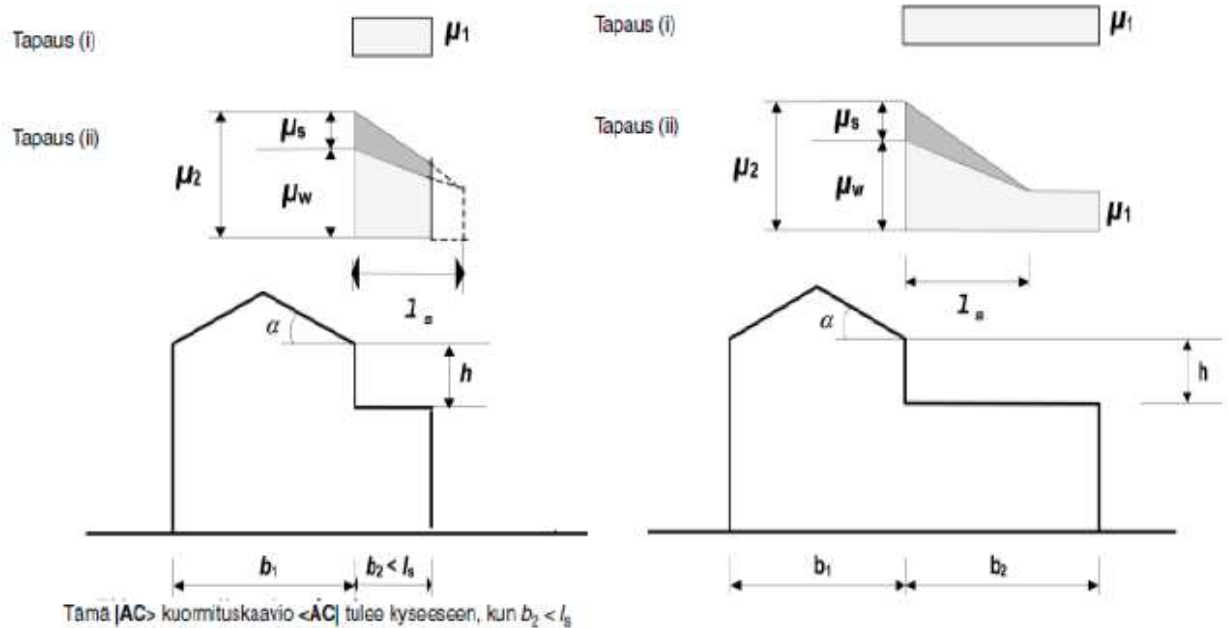
$0,8 \leq \mu_w \leq 1,5$, jos alemman katon pinta-ala $= 2\text{m}^2$

$\mu_w = 0,8$, jos alemman katon pinta-ala $\leq 1\text{m}^2$

Kinostumis pituus l_s määritetään kaavasta (kuvio 7)

$$l_s = 2 \cdot h$$

Kinostumis pituuden vaihteluväli on $2\text{m} \leq l_s \leq 6\text{m}$



Kuvio 7. Lumikuorman muotokertoimet korkeampaa rakennuskohdetta vasten (RIL 201-1-2011 Osa 1.3, 100)

5.2.2.3 Tuulikuorma

Tuulikuormaa määrittäessä tärkeä tieto on rakennuksen sijainti. Tuulikuorman määrittäminen alkaa maastoluokan määrittämisellä, joka määräytyy sijaintipaikan mukaan. Seuraavaksi arvioidaan pinnanmuodon vaikutus kuormitukseen ja määritetään puuskanopeuspaine, koska tuulen nopeus vaihtelee. Mitoitustilanteissa lasketaan joko kokonaistuulivoima jäykistystä varten tai tuulipaine yksittäiselle rakenneosalle. Tässä opinnäytetyössä lasketaan yhdelle seinälle tuleva tuulikuorma. Vaakasuurteen kokonaistuulikuorman ominaisarvo saadaan kaavasta: (RIL 201-1-2011 Osa 1.4, 136)

$$F_{w,k} = c_f * q_k(h) * A_{ref} \quad (12)$$

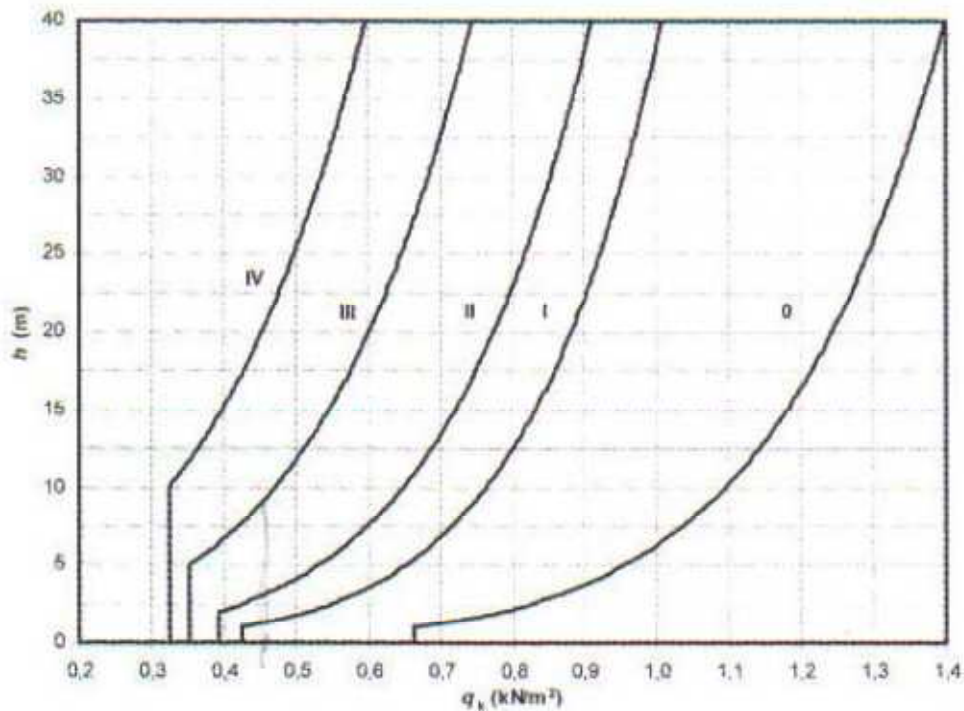
,jossa

$F_{w,k}$ = kokonaistuulikuorma, joka vaikuttaa $0,6 * h$ korkeudella

c_f = rakenteen voimakertoimen, umpinainen rakennus 1,3

$q_k(h)$ = rakennuksen korkeutta h vastaava nopeuspaine

A_{ref} = rakenteen tuulta vastaan kohtisuora projektiopinta-ala



Kuvio 8. rakennuksen korkeutta h vastaava nopeuspaine eri maastoluokissa.
(Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 10)

5.2.3 Kuormitusyhdistelmät

5.2.3.1 Murtorajatila

Murtorajatilamitoituksen tarkoitus on selvittää, että kyseinen rakenneosasto kestävä kuormitukset, kun sitä kuormitetaan mahdollisimman vaarallisella tavalla. Niinsanotusti vaarallisin tapa ei ole aina kuormitustapa, jossa tulee eniten esimerkiksi pystykuormaa, vaan jokainen kuormitusyhdistelmä täytyy analysoida erikseen. Tässä työssä tarkastellaan tilannetta, jossa rakenteen kestävyys pettää tai rakenteeseen syntyy vaurioituminen, kun rakenteen rakennusmateriaalien lujuus on määräävä tekijä. Tällöin rakenteen kestävyys murtorajatilassa lasketaan kaavasta:

$$\begin{cases} 1,15K_{FI} \\ 0,9 \end{cases} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_P P + 1,5K_{FI} Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i > 1} \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (13)$$

Kuitenkin vähintään (RIL-201-1-2011, 38)

$$\begin{cases} 1,35K_{FI} \\ 0,9 \end{cases} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \quad (14)$$

,jossa

$G_{k,j}$ = pysyvät kuormat

$Q_{k,1}$ = määräävä muuttuva kuorma

- $Q_{k,i}$ = muut samanaikaisen muuttuvat kuormat
 K_{FI} = kulmakerroin, joka määräytyy seuraamusluokan mukaan (taulukko)
 P = esijännitysvoima
 Ψ = yhdistelykerroin taulukon mukaisesti

Taulukko 3. Seuraamusluokat (RIL-201-1-2011, 37)

Kuormakerroin K_{FI}	Seuraamusluokka
1,1	CC3
1,0	CC2
0,9	CC1

Taulukko 4. Yhdistelykertoimien Ψ arvot rakennuksille (RIL-201-1-2011, 36)

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuorma rakennuksissa, luokka			
Luokka A:asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B:toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C:kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D:myymälätilat	0,7	0,7	0,3
Luokka E:varastotilat	1	0,9	0,3
Luokka F:liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Luokka G:liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Luokka H:vesikatot	0	0	0
Lumikuormat, kun			
$s_k < 2,75\text{kN/m}^2$	0,7	0,4	0,2
$s_k > 2,75\text{kN/m}^2$	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma (jäänpainosta johtuva)	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila	0,6	0,5	0

5.2.3.2 Käyttörajatila

Käyttörajatilamitoituksessa otetaan huomioon rakenteiden siirtymät ja värähtelyt, jotka voivat rajoittaa rakenteen käyttökelpoisuutta käyttötarkoitukseensa. Otetaan huomioon myös vauriot, jotka vaikuttavat kielteisesti ulkonäköön ja rakenteen säilyvyyteen. Palautuva ja palautumaton käyttörajatila on erotettava toisistaan. Esimerkiksi taipumaa laskettaessa käytetään murtorajatilamitoituksen sijasta käyttörajatilamitoitusta. (RIL-201-1-2011, 40)

5.3 Ulkoseinän mitoitus

Tässä työssä käsitellään massiivipuulementtiä erillisrakenteena. Ulkoseinäelementti oletetaan päistään nivelellisesti tuetuksi. Elementin päällä oleva välipohjan kuorma oletetaan sijaitsevan keskeisesti elementtiin nähden, joten epäkeskeisyyttä ei tässä rakenteessa synny. Ulkoseinä mitoitetaan nurjahdusta vastaan ja tarkastetaan puristuskestävyys (liite 1). Lisäksi mitoitetaan ikkuna-aukon ylityspalkki. Elementti mitoitetaan pysyvässä-, keskipitkässä- ja hetkellisessä aikaluokassa. Ulkoseinän mitoituksessa käytetään hyödyksi Puuinfon asuinrakennuksen sovelluslaskelmia Eurokoodi 5:n mukaan.

5.3.1 Nurjahduskestävyys

Ensimmäiseksi lasketaan sauvan hoikkuusluku, joka saadaan kaavasta (RIL 205-1-2009,73):

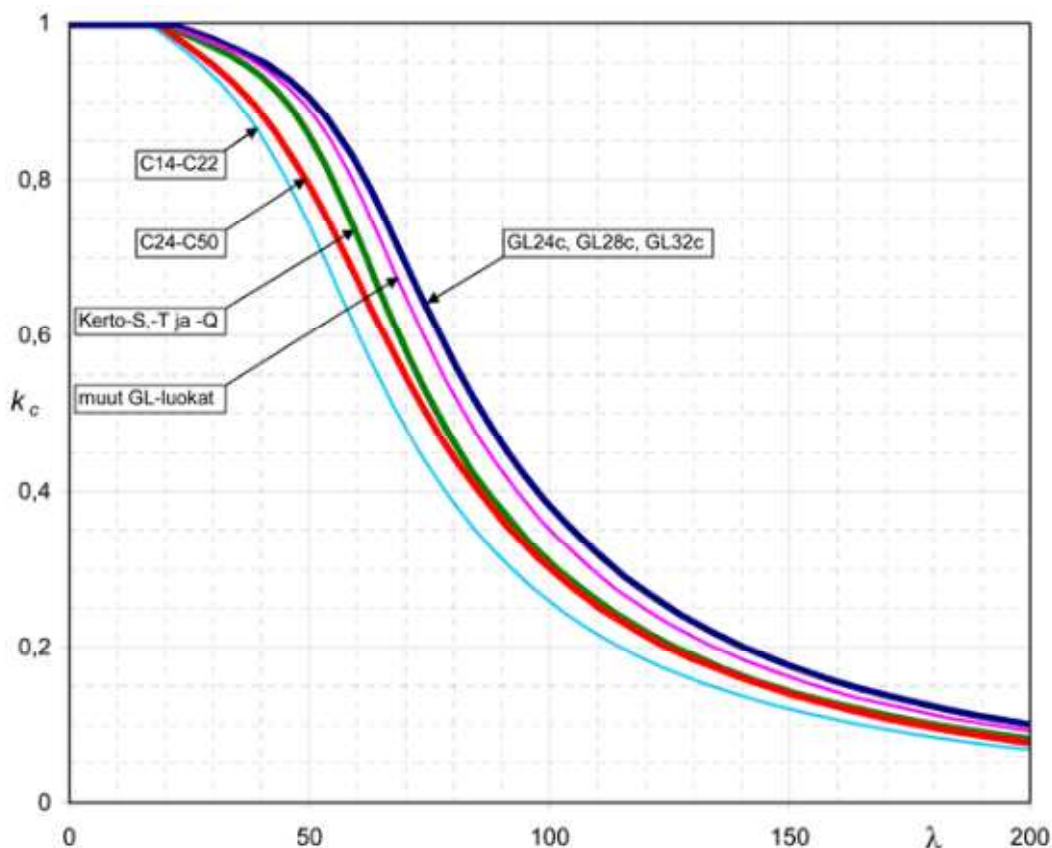
$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad (15)$$

,jossa

$L_{c,z}$ = nurjahduspituus z-akselin suuntaisessa nurjahduksessa, joka on tässä tapauksessa $1,0 \cdot L$

i_y = poikkileikkauksen jäyhyyssäde y-akselin suhteen, joka on suorakaidepoikkileikkauksella $i_y = h/\sqrt{12}$, kun sivunmitta h on nurjahduksen suuntaan.

Kun tiedetään elementin hoikkuusluku, saadaan nurjahduskertoimen $k_{c,y}$ kuviosta 9 (RIL 205-1-2009,73)



Kuvio 9. Nurjahduskertoimen k_c riippuvuus hoikkuusluvusta λ (RIL 205-1-2009,73)

Seuraavaksi lasketaan elementille tuleva puristusjännitys kaavasta (RIL 205-1-2009,66):

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{b \cdot h} \quad (16)$$

,jossa

N_d = Elementille tuleva maksimi normaalivoima

h = Elementin poikkileikkauksen korkeus

b = Elementin poikkileikkauksen leveys

Elementillä oleva puristuslujuus lasketaan kaavasta:

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} \quad (17)$$

,jossa

$f_{c,0,k}$ = Puumateriaalin ominaislujuus (taulukko 5)

k_{mod} = Materiaalin muunnoskerroin (taulukko 7)

γ_m = Materiaalin jäykkyy- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluku (taulukko 8)

Taulukko 5. Sahatavaran ja liimapuun ominaislujuudet, jäykkyysoinaisuudet ja tiheydet yleisimmissä lujuusluokissa (EC 5, puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 17)

Lujuusluokka	Sahatavara			Liimapuu		
	C18 (T1)	C24 (T2)	C30 (T3)	GL28c	GL32c	
Ominaislujuudet (N/mm ²)						
Taivutus	$f_{m,k}$	18	24	30	28	32
Veto	$f_{t,0,k}$	11	14	18	16,5	19,5
	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,45
Puristus	$f_{c,0,k}$	18	21	23	24	26,5
	$f_{c,90,k}$	2,2	2,5	2,7	2,7	3,0
Leikkaus	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	2,7	3,2
Jäykkyysoinaisuudet (N/mm ²)						
Kimmomoduuli	E_{mean}	9000	11000	12000	12600	13700
	$E_{90, mean}$	300	370	400	390	420
Liikumoduuli	G_{mean}	560	690	750	720	780
Tiheydet (kg/m ³)						
Ominaiistiheys	ρ_k	320	350	380	380	410
Tiheyden keski-arvo	ρ_{mean}	380	420	460	430	470

Taulukko 6. Kertopuun ominaislujuudet, jäykkyysominaisuudet ja tiheydet (EC 5, puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 18)

Tyyppi		Kerto-S	Kerto-T	Kerto-Q
Paksuus (mm)		21 - 90	27 - 75	27 - 69
Ominaislujuudet (N/mm²)				
Taivutus syrjällään	$f_{m,k}$	44	27	32
Kokovaikutuseksponentti	α_s	0,12	0,15	0,12
Taivutus lappeellaan	$f_{m,0,flat,k}$	50	32	36
Veto syysuuntaan	$f_{t,0,k}$	35	24	26
Veto poikittain syrjällään	$f_{t,90,edge,k}$	0,8	0,5	6,0
Puristus syysuuntaan	$f_{c,0,k}$	35	26	26
Puristus poikittain syrjällään	$f_{c,90,edge,k}$	6	4	9
Puristus poikittain lappeellaan	$f_{c,90,flat,k}$	1,8	1,0	2,2
Leikkaus syrjällään	$f_{v,k}$	4,1	2,4	4,5
Lappeellaan pintaviilun suuntaan	$f_{t,0,k}$	2,3	1,3	1,3
Jäykkyysominaisuudet (N/mm²)				
Kimmoduuli	E_{mean}	13800	10000	10500
Liukumuodi	$G_{edge, mean}$	600	400	600
Tiheydet (kg/m³)				
Ominaisstiheys	ρ_k	480	410	480
Tiheyden keskiarvo	ρ_{mean}	510	440	510

Taulukko 7. Muunnoskerroimen k_{mod} arvot (EC 5, puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 17)

Materiaali	Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka		
		Pysyvä	Keskipitkä	Hetkellinen
Sahatavara, Pyöreä puu, Liimapuu, LVL, Vaneri	1	0,60	0,80	1,10
	2	0,60	0,80	1,10
	3	0,50	0,65	0,90
Lastulevy P4 ¹⁾ , OSB/2 ¹⁾ , Kova kuitulevy EN 622-2	1	0,30	0,65	1,10
	2	0,20	0,45	0,80
Lastulevy P6 ¹⁾ , OSB/3 ja OSB/4	1	0,40	0,70	1,10
	2	0,30	0,55	0,90
Puolikovat kuitulevyt: MBH.LA ¹⁾ , MBH.HLS, MDF.LA ¹⁾ ja MDF.HLS	1	0,20	0,60	1,10
	2	-	-	0,80

Taulukko 8. Materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluvut (RIL 205-1-2009,43)

Perusyhdistelmät:	
Sahatavara ja pyöreä puutavara yleensä	1,4
Havusahatavara, jonka lujuusluokka \geq C35	1,25
Liimapuu, LVL	1,2
Puulevyt	1,25
Liitokset	*)
Naulalevyliitokset: - tartuntalujuus	1,25
- levyn lujuus (teräs)	1,1
Onnettomuusyhdistelmät	1,0

Puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusehto saadaan kaavasta (RIL 205-1-2009):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (18)$$

5.3.2 Elementin aukkopalkin mitoitus

Elementin aukonylitykset hoidetaan pääasiassa elementin yläpään kiinnitetyn karapuun avulla. Aukon kohdalla olevat pystyhirren on ripustettuna yläkarapuuhun. Aukon yläreunaan laitetaan kuitenkin ohut palkki, joka pitää ripustetut pystyhirret kasassa (kuva 1). Tarvittaessa aukon päälle asetetaan lisäpalkki. Aukkopalkin materiaalina on tässä työssä kertopuu. Aukkopalkin Mitoituksessa Tarkastellaan leikkausvoimakestävyys ja taivutuskestävyys (liite 2).

5.2.2.1 Aukkopalkin leikkausvoimakestävyys

Elementin aukonylityspalkissa on tilanne, jossa leikkausjännityskomponentit ovat kohtisuorassa syysuuntaa vastaan, jolloin RIL 205-1-2009 mukaan, seuraavan ehdon tulee toteutua:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (19)$$

,jossa

τ_d = leikkausjännityksen mitoitusarvo

$f_{v,d}$ = leikkauslujuuden mitoitusarvo

Leikkauskestävyyssuoritusmitoituksessa on otettava huomioon halkeamien vaikutus käyttämällä tehollista leveyttä, joka lasketaan kaavasta:

$$b_{ef} = k_{cr} * b \quad (20)$$

,jossa

- b = tarkasteltavan sauvan leveys
 k_{cr} = kerroin kosteusoloista, kertopuulla 1,0

Leikkausjännityksen mitoitusarvo lasketaan kaavalla:

$$\tau_d = \frac{3}{2} * \frac{V_d}{b_{ef} * h} \quad (21)$$

, jossa

- V_d = Maksimi leikkausvoima
 b_{ef} = Tehollinen leveys
 H = palkin korkeus

Leikkauslujuuden ominaisarvo saadaan kaavasta:

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} * k_{mod}}{\gamma_m} \quad (22)$$

,jossa

- $f_{v,k}$ = Kertopuun (kerto-S) leikkausvoimalujuus syrjällä (taulukko 6)
 k_{mod} = Materiaalin muunnoskerroin (taulukko 7)
 γ_m = Materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluku (taulukko 8)

5.2.2.2 Aukkopalkin taivutuskestävyys

Palkille tuleva taivutuskestävyyden mitoitusehto (RIL 205-1-2009,68) saadaan kaavasta:

$$\sigma_{m,y,d} \leq f_{m,d} \quad (23)$$

,jossa

- $\sigma_{m,y,d}$ = Taivutusjännitys palkissa
 $f_{m,d}$ = Palkin taivutuslujuus

Palkin taivutusjännitys saadaan kaavasta:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} \quad (24)$$

,jossa

M_d = Palkille tuleva maksimi taivutusmomentti

b = palkin leveys

h = palkin korkeus

Kertopuupalkin korkeus $h \leq 300$ mm, joten taivutuslujuutta ei tarvitse pienentää k_{η} -kertoimella. Palkin taivutuslujuus lasketaan kaavasta:

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} \quad (25)$$

,jossa

$f_{m,k}$ = Kertopuun ominaistaivutuslujuus syrjällä (taulukko 6)

k_{mod} = Materiaalin muunnoskerroin (taulukko 7)

γ_m = Materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluku (taulukko 8)

6 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia massiivipuisen pystyhirsielementin rakenneteknisiä ratkaisuja. Tässä työssä kohteena oli kantava ulkoseinäelementti ja sen liitokset rakennuksen muihin rakenneosiin. Lisäksi tutkittiin ulkoseinäelementtiä jäykistävänä rakenteena. Ulkoseinän mitoituksessa luotiin Excel-pohjaiset Eurokoodin mukaiset sovelluslaskelmat, joita voi käyttää myöhemmin massiivipuulementtejä mitoittaessa. Excel-laskelma on kuitenkin vain suuntaa antava ja sopii vain pääasiallisesti esimerkkikohteen ulkoseinäelementtien mitoitukseen. Vaatisi vielä paljon lisätyötä, että saataisiin laskentataulukko, joka laskee kaikki mahdolliset massiivipuulementit.

Massiivipuun ulkoseinäelementin kehityksessä oli tarkoituksena luoda kokonaisuus, joka ottaa huomioon puun muodonmuutokset kuten kutistumisen ja turpoamisen. Pienelementtien kokoaminen kertopuisten karapuiden väliin oli ratkaisu, joka huomioi kutistumisen, mutta sen ansiosta voitiin tehdä koko seinän mittaisia elementtejä. Tämä oli myös tilaajan puolelta yksi pääkriteeri, jotta rungon pystytys olisi mahdollisimman nopeata, joka taas loisi hyvin kustannustehokkaan ja kilpailukykyisen ratkaisun. Toinen tilaajan toive oli saada elementti yhteensopivaksi muiden valmistajien tuotteiden kanssa. Tämän vuoksi elementin liitokset toteutettiin pääasiallisesti vuonna 2012 ilmestynyttä puuelementtirakentamisen yleistä teollisuusstandardia noudattaen. Liitoksissa olisi vielä paljon lisätarkasteltavaa esimerkiksi elementtien tiivistysperiaatteissa ja elementtien välisten saumojen käyttäytymisessä.

Ulkoseinäelementin mitoituksessa hankalimmaksi osa-alueeksi osoittautui sen jäykistysmitoitus. Suomessa ei nimittäin anneta eurokoodin mukaan jäykistysmitoitusohjeita massiivipuulementeille ollenkaan, vaan ainoa mitoitusperiaate on levyjäykistys. Tässä työssä jouduttiin käyttämään lähteenä ruotsalaista Martinsonin massiivipuukäsikirjaa ja lisäksi soveltamaan eurokoodista saatuja levyjäykistysperiaatteita.

Kaikeinkaikkiaan työ oli mielenkiintoinen ja samalla sopivan haastava. Oli mukava tutkia uutta asiaa, jossa kaikki asiat ei ollut heti itsestäänselvyksiä ja joutui myös soveltamaan jotakin valmista ja uutta keskenään. Massiivipuurakentaminen itsessään kiinnosti minua sen monien positiivisten suuntausten, kuten puukerrostalojen yleistymisen ansiosta. Työssä opin hyvin paljon puurakenteiden mitoituksesta ja puun käyttäytymisestä. Lisäksi pääsin syventymään rakennuksen jäykistämiseen, jota voisin pitää näin työn lopussa yhtenä tärkeimmistä asioista rakennuksen mitoituksessa yleisesti. Opinnäytetyöprosessi antoi myös kokonaisuudessaan taitoa etsiä tietoa eri lähteistä ja hyödyntää niitä sujuvasti omassa tuotoksessa.

LÄHTEET

Eurocodes. [viitattu 2013–29-01].

Saatavissa: <http://www.eurocodes.fi/>

Eurocode 5, sovelluslaskelmat – Asuinrakennus, Puuinfo [viitattu 2013–04-02]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/rakentaminen/eurokoodit/ec5-sovelluslaskelmat-asuinrakennus>

Eurokoodi 5, Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, kolmas painos [verkkodokumentti]. Puuinfo [viitattu 2013–03-03] saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodit/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi-5-lyhennetty-suunnitteluohje-www-kolmas-painos-1492011.pdf>

Martinsons Byggsystem AB. Massivträ Handboken 2006.

Byggsiljum, Sweden 2006.

RIL-201-1-2011, Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. 2011. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL-205-1-2009, Puurakenteiden suunnitteluohje. 2011. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RunkoPES 1.0, puuelementtirakentamisen teollisuusstandardi, Finnish Wood Research Oy [viitattu 2013–03-03] saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/rakentaminen/suunnitteluohjeet/runkopes-10>

Ympäristöministeriö. Eurokoodit. [viitattu 2013–29-01]. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=411522&lan=FI>

LIITE 1. ULKOSEINÄN MITOITUS

kuormat		
lumikuorma	2	kN/m ²
hyötykuorma	2	kN/m ²
tuulen nopeuspaine	0,45	kN/m ²
räystäs	0,2	kN/m ²
yläpohja	1	kN/m ²
välipohja	4,5	kN/m ²

Kuormitusyhdistelmät MRT	Aikaluokka	
ky1	pysyvä aikaluokka	1,35*omapaino
ky2	keskipitkä aikaluokka	1,15*omapaino+1,5*lumi+1,05*hyöty
ky3	keskipitkä aikaluokka	1,15*omapaino+1,5*hyöty+1,05*lumi
ky4	hetkellinen aikaluokka	1,15*omapaino+1,5*tuuli+1,05*lumi+1,05*hyöty
ky5	hetkellinen aikaluokka	1,15*omapaino+1,5*lumi+1,05*hyöty+0,9*tuuli
ky6	hetkellinen aikaluokka	1,15*omapaino+1,5*hyöty+1,05*lumi+0,9*tuuli

Ominaiskuormitusten Aiheuttamat Voimasuureet		
yp. Kuormitusleveys	3,1	m
räystään pituus	0,6	m
vp. Kuormitusleveys	2,9	m
elementin Korkeus	2,9	m
pystykuorma Yp ja vp. Omap.	16,27	kN/m
Pystykuorma Lumi	7,4	kN/m
Pystykuorma Hyöty	5,8	kN/m
Elementin Taivutusmomentti Tuulikuormasta	0,66	kN/m
Nurjahdus		
Nurjahduspituus Lc,z	2,9	m
jäyhyysäde iy	0,043	
hoikkuusluku λy	66,973	
Puumateriaalin ominaislujuus Fc,0,k	21	N/mm ²
Materiaalin muunnoskerroin ym	1,2	
Taivutus syrjällä Fm,k	24	N/mm ²

	max. Normaalivoima kN/m	nurjahduskerroin $k_{c,y}$ kuvasta 10
ky1	21,96	0,74
ky2	35,90	0,74
ky3	35,18	0,74
ky4	32,57	0,74
ky5	35,90	0,74
ky6	35,18	0,74

	Puristusjännitys N/mm ²	Puristuslujuus N/mm ²	k_{mod}
ky1	0,191	10,5	0,6
ky2	0,312	14	0,8
ky3	0,306	14	0,8
ky4	0,283	19,25	1,1
ky5	0,312	19,25	1,1
ky6	0,306	19,25	1,1

mitoitus				
0,0246	< 1	OK!	2,46	%
0,0301	< 1	OK!	3,01	%
0,0295	< 1	OK!	2,95	%
0,0199	< 1	OK!	1,99	%
0,0219	< 1	OK!	2,19	%
0,0215	< 1	OK!	2,15	%

	max. Taivutusmomentti kNm	Taivutusjännitys N/mm ²	Taivutuslujuus N/mm ²
ky1	0		
ky2	0		
ky3	0		
ky4	0,993	0,451	22
ky5	0,596	0,270	22
ky6	0,596	0,270	22

mitoitus				
0				
0				
0				
0,065	< 1	OK!	6,50	%
0,049	< 1	OK!	4,90	%
0,049	< 1	OK!	4,86	%

LIITE 2. ULKOSEINÄN KARAPALKIN MITOITUS

kuormat		
lumi	2	kN/m ²
hyöty	2	kN/m ²
tuulen nopeuspaine	0,45	kN/m ²
räystäs	0,2	kN/m ²
yläpohja	1	kN/m ²
välipohja	4,5	kN/m ²
Leveys b	51	
palkki kerto-s h/b	200/51	mm
Korkeus h	200	
Ominaiskuorm. Aih. Voimas.		
yp. Kuormitusleveys	3,1	m
räystään pituus	0,6	m
vp. Kuormitusleveys	2,9	m
elem. Pituus	2,9	m
ikkuna-aukon leveys	1,2	m
kuormitusleveys pistekuormalle	0,6	
tasainen kuorma palkille vp:n omap.	13,05	kN/m
tasainen kuorma palkille vp:n hyötyk.	5,8	kN/m
Tukireaktio A omapaino	7,83	kN
Tukireaktio A hyötykuorma	3,48	kN
kehäpalkin momentti vp:n omapaino	2,349	kNm
kehäpalkin momentti hyötykuorma	1,044	kNm
Taivutus syrjällään (Kerto-S) $f_{m,k}$	44	N/mm ²

Kuormitusyhdistelmät MRT	Aikaluokka	
ky1	pysyvä aikaluokka	1,35*omapaino
ky2	keskipitkä aikaluokka	1,15*omapaino +1,05*hyöty
ky3	keskipitkä aikaluokka	1,15*omapaino+1,5*hyöty

	max. Leikkausvoima	$b_{ef}=b$ (kerto-s)	leikkausjännitys τ_d N/mm²		
ky1	10,5705	51	1,55		
ky2	12,6585	51	1,86		
ky3	14,2245	51	2,09		
	k_{mod}	leikkauslujuus $F_{v,d}$	Mitoitus $\tau_d \leq F_{v,d}$		
ky1	0,6	2,05	OK	75,83	%
ky2	0,8	2,73	OK	68,11	%
ky3	0,8	2,73	OK	76,53	%

	max. Taivutusmomentti M_d	taivutusjännitys	taivutuslujuus	
ky1	3,17	9,33	22	
ky2	4,27	12,55	29,33	
ky3	3,68	10,82	29,33	
	k_{mod}	Mitoitus		
ky1	0,6	ok	42,40	%
ky2	0,8	ok	42,79	%
ky3	0,8	ok	36,90	%

LIITE 3. ULKOSEINÄN JÄYKISTYSMITOITUS

kuormat		
lumi	2	kN/m ²
hyöty	2	kN/m ²
tuulen nopeuspaine	0,45	kN/m ²
räystäs	0,2	kN/m ²
yläpohja	1	kN/m ²
välipohja	4,5	kN/m ²
seinän omapaino	0,575	kN/m ²
Ominaiskuorm. Aih. Voimas.		
yp. Kuormitusleveys	3,1	m
räystään pituus	0,6	m
vp. Kuormitusleveys	2,9	m
elementin Pituus	2,9	m
pystykuorma Yp ja vp. Omapaino	16,27	kN/m
Pystykuorma Lumi	7,4	
Pystykuorma Hyöty	5,8	
elem. Taivutusmom. Tuulik.	0,662	kN/m
elementin leveys	3,67	m
h	8,6	m
0,8h	6,88	m
0,2h	1,72	m
sahatavara C24		
$f_{c,0,k}$	21	N/mm ²
$f_{m,k}$	24	N/mm ²
γ_m	1,4	
yp:n korkeus	2	m
vp:n paksuus	0,3	m
perusmuurin korkeus c	0,5	m
Huonekorkeus h	2,9	m
rakennuksen korkeus H	8,6	m
rak. pidemmän sivun mitta	6,47	m
seinälohkon leveys b	0,795	m
C_f	1,3	
vp:hen kohdistuva viivak. KRT $w_{k,1}$	2,51	kN/m
yp:hen kohdistuva viivak. KRT $w_{k,2}$	2,52	kN/m
jäykisteseinän j1 kuorma MRT F_d	12,206	kN
jäykisteseinän j2 kuorma MRT F_d	6,121	kN
seinälohkon minimileveys $b_i=h/4$	0,725	m

Jäykistysseinä J1		
Omapainon vaadittu G lohkolla 1	9,042	kN
Omapainon vaadittu G lohkolla 2	18,084	kN
pystykuorman aih. Vähennys vp G_{vp}	3,578	kN
pystykuorman aih. Vähennys us G_{us}	2,110	kN
vähennys lohkolla 1	4,522	kN
vähennys lohkolla 2	9,044	kN
kerto S leikkaus V_{max}	18,587	kN
lohkon 2 vaikuttava leik. Voima fv	14,842	kN
lohkolla 1 otettava ankkuroinnilla	4,520	kN
lohkolla 2 otettava ankkuroinnilla	9,040	kN
$V_{max} > f_v$	79,854	%
Jäykistysseinä J2		
pystykuorman aih. Vähennys 3	0,795	kN
pystykuorman aih. Vähennys 4	1,590	kN
Omapainon vaadittu G lohkolla 3	4,534	kN
Omapainon vaadittu G lohkolla 4	9,068	kN
lohkolla 3 otettava ankkuroinnilla	3,739	kN
lohkolla 4 otettava ankkuroinnilla	7,478	kN
lohkon 4 vaikuttava leik. Voima fv	7,443	kN
kerto S leikkaus V_{max}	18,587	kN
$V_{max} > f_v$	40,043	%