



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

PUUKERROSTALON JÄYKISTÄMINEN

TEKIJÄ: Reetta Mäklin

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Reetta Mäklin			
Työn nimi Puukerrostalon jäykistäminen			
Päiväys	28.5.2017	Sivumäärä/Liitteet	65
Ohjaaja(t) Rakennetekniikan yliopettaja, TkT Arto Puurula ja lehtori, DI Matti Mikkonen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu			
Tiivistelmä			
<p>Tämän työn tavoitteena oli koostaa teoriakokonaisuus puukerrostaloista sekä esittää käytännön laskuesimerkkejä puukerrostalon jäykistämisestä. Puukerrostaloja on rakennettu Suomessa 1990-luvulta alkaen vasta 52 kappaletta ja Savonia-ammattikorkeakoulussa puukerrostalojen rakennesuunnittelun opintojaksoja on tarjottu kahdelle vuosikurssille. Puukerrostalojen rakentamisen vauhdittamista pidetään ekologisista syistä välttämättömänä, mutta niiden rakennesuunnittelusta on tietoa saatavilla vain yksittäisten opinnäytetöiden verran ja Puuinfon rakennesuunnittelijoina työskenteleville tarkoitetun Vaativien puurakenteiden -kurssin avulla. Puukerrostalon jäykistäminen eroaa välipohjarakenteen sekä puun rakenteellisen keveyden vuoksi huomattavasti betonirakenteisista kerrostaloista, joten materiaalia aiheesta tarvittiin oppimisen tueksi lisää.</p> <p>Työssä perehdyttiin ensin teoriatietoon puurakentamisen historiasta ja nykypäivästä sekä puusta rakennusmateriaalina. Puukerrostalon jäykistämistä koskevien laskuesimerkkien taustaksi tehtiin lisäksi teoriatiivistelmät tärkeimmistä puukerrostalon rakennesuunnittelua ohjaavista rakennusmääräyksistä sekä rakennejärjestelmistä. Tämän jälkeen keskityttiin jäykistämisen lähtökohtiin teoriassa sekä jäykistysuunnittelun läpikäyntiin laskuesimerkkien avulla. Jäykistettävän kerrostalon esimerkkitaloksi valittiin Puuinfon mallikerrostalo sekä Puuinfon yleisen rakennetyyppikirjaston mukaiset ulkoseinä-, katto- ja välipohjarakenteet. Jäykistyslaskuissa rankarunkoisen jäykisteseinän laskennan lähteenä oli Puuinfon julkaisemat Eurokoodin lyhennetty suunnitteluohje sekä Asuintalon sovel-luslaskelmat. CLT-rakenteisen seinän jäykistysmitoituksessa seurattiin CrossLam Kuhmon internetsivuillaan julkai-semia esimerkilaskelmia.</p> <p>Työn tuloksena muodostui materiaalikokonaisuus puukerrostaloista ja niiden jäykistämisestä erityisesti rakennesuunnittelua ammattikorkeakoulussa opiskeleville.</p>			
Avainsanat Puukerrostalo, jäykistäminen, rakennesuunnittelu, CLT, Puuinfo, CrossLam Kuhmo			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Reetta Mäklin			
Title of Thesis Stiffening of Wood-Built Apartment Blocks			
Date	May 28, 2017	Pages/Appendices	65
Supervisor(s) Mr Arto Puurula, PhD, Principal Lecturer and Mr Matti Mikkonen, MSc, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to gather theoretical information and present examples for calculating the stiffening of wood-built apartment blocks. There are only 52 wood-built apartment blocks in Finland but using wood, a renewable material, in construction needs to be increased. Because there is still only a little education and few theses discussing structural engineering in wood-built apartment blocks, more information was required.</p> <p>First, theoretical information was studied to find out what a wood-built apartment block actually is and how it should be stiffened. The theoretical part consists of information about Finnish wooden buildings and wood as a structural material. Wood-built apartment blocks differ from concrete-built apartment blocks in many ways so information about the most important valid standards and regulations related to designing wooden structures as well as construction systems in wood-built apartment blocks were also included. The model apartment block for calculation examples is a public model house of Finnish Timber Council called Puuinfo. Help and background information for stiffening calculations was found in Puuinfo's and CLT manufacturer CrossLam Kuhmo's public example calculations.</p> <p>As a result of the thesis there is an up-to-date information package about stiffening wood-built apartment blocks and wood-built apartment blocks in Finland.</p>			
<p>Keywords wood-built apartment block, stiffening, structural engineering, CLT, Puuinfo, CrossLam Kuhmo</p>			

ALKUSANAT

Tämä insinöörityö on opinnäytetyö, eikä tätä voi käyttää rakennesuunnitelmien asiakirjana eikä puukerrostalojen rakennesuunnitteluohjeena.

Haluan kiittää ohjaajaani, rakennetekniikan yliopettaja Arto Puurulaa työn pitkäjänteisestä ohjauksesta.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	PUURAKENTAMINEN	8
2.1	Puurakentaminen ennen ja nyt.....	8
2.2	Puurakentaminen ja kestävä kehitys	10
3	RAKENNUSMATERIAALIT	11
3.1	Sahatavara	11
3.2	Insinööripuutuotteet.....	12
3.2.1	CLT	12
3.2.2	Viilupuu	13
3.2.3	Liimapuu	14
4	RAKENNUSMÄÄRÄYKSET JA OHJEET	15
4.1	Eurokoodit.....	15
4.2	Ääneneristysmääräykset	16
4.3	Palomääräykset	18
4.4	Energiatehokkuus	19
5	PUUKERROSTALOT JA NIIDEN SUUNNITTELU.....	21
5.1	RunkoPES.....	21
5.2	Rakennejärjestelmät.....	22
5.2.1	Kantavat seinät -järjestelmä	22
5.2.2	Pilari-palkkijärjestelmä	25
5.2.3	Tilaelementit	26
6	PUUKERROSTALON JÄYKISTYS, LASKUESIMERKKI	27
6.1	Mallikerrostalo	28
6.2	Rankarunkoisen seinän levyjäykistys.....	30
6.2.1	Rakennetyypit	30
6.2.2	Vaakakuormat.....	34
6.2.3	Ankkuroitava voima	40
6.2.4	Vetotangon kestävyys.....	42
6.2.5	Jäykisteseinän vaakaleikkauvoimakestävyys	43
6.2.6	Seinälohkojen välisen pystyliitoksen ruuvaustarve	45

6.2.7	Jäykisteseinän puristuspuolen runkotolpan nurjahduskestävyys	47
6.2.8	Jäykisteseinän runkotolpan puristuspuolen tukipainekestävyys alaohjauspuussa.....	51
6.3	CLT-rakenteisen seinän jäykistyskestävyys	53
6.3.1	Seinän rakenne	53
6.3.2	CLT-seinän leikkauskestävyys	54
6.3.3	CLT-seinän puristus 1. kerroksen betonilaattaa vasten	58
6.3.4	CLT-seinän ankkurointi alustaan	61
7	POHDINTA	62
	LÄHTEET	63

1 JOHDANTO

Puurakentaminen elää Suomessa murrosvaihetta. Tietoisuus luonnonvarojen rajallisuudesta haastaa myös rakennusteollisuutta vastaamaan kestäväen kehityksen haasteisiin ja yhtenä ratkaisuna on ehdotettu puurakentamisen voimakasta kasvattamista. Puurakentamisella on vahvat perinteet pientalojen alalla, mutta puukerrostalojen rakentaminen on Suomessa vielä hyvin alkutekijöissään. Viranomais määräyksiä päivitetään kuitenkin kaiken aikaa vastaamaan käytännön tarpeita ja teollisen puurakentamisen hidasteita pyritään ratkaisemaan. Tämä asettaa suunnittelijoille haasteita tietojen ja taitojen päivittämiseksi.

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tehdä läpileikkaus puurakentamisen lähihistoriaan sekä nykypäivään ja tarkastella puukerrostalorakentamista Suomessa rakennesuunnittelijan näkökulmasta. Puukerrostalon suunnittelu eroaa betonikerrostalon suunnittelusta erityisesti jäykistyssuunnittelun sekä palomääräysten ja ääneneristysten osalta ja rakennesuunnittelijoiden kouluttautuminen puurakentamisen haasteisiin on välttämätöntä tuotannon lisäämiseksi. Betoninen kerrostalo jäykistetään yhteinäisten välipohjien ja hissikuilujen avulla, mutta puukerrostalossa tämä ei erilaisen ääneneristystekniikan vuoksi ole taloudellista. Puukerrostalossa välipohja on usein katkaistava huoneistojen välillä ja tämä asettaa haasteita välipohjan jäykkyydelle ja kuormien liitossiirtymille. Puu on myös materiaalina betonia paljon kevyempää ja vaikka tämä on ekologisessa mielessä monessakin mielessä etu, aiheuttaa sekin jäykistyssuunnittelulle oman erikoispiirteensä. Opinnäytetyössä esitetään esimerkkejä puukerrostalon jäykistyssuunnittelusta ranka- ja clt-rakenteisten jäykistysseinien osalta. Mallina käytetään Puuinfon avointa mallikerrostalo- sekä rakennetyyppiaineistoa.

2 PUURAKENTAMINEN

Suomalaisella puulla on hyvät rakennustekniset ominaisuudet. Se kasvaa lyhyen kesäkauden ansiosta hitaasti ja on suorutensa, vähäoksaisuutensa ja tiheiden vuosirenkaidensa ansiosta luonnostaan luja ja laadukas materiaali. Puu omaa myös hyvän lämmönvarauskyvyn ja on muotoiltavissa arkkitehtonisesti hyvin vapaasti. Puu on materiaalina kevyt, sitä on saatavilla runsaasti, siitä ei haihdu terveydelle vaarallisia aineita ja siitä rakentamista pidetään ekologisena. Toisaalta puun käyttö asettaa suunnittelijalle vaatimuksia mm. materiaalin kosteuselämisen, paloturvallisuuden, äänitekniikan, lahoamisalttiuden sekä anisotrooppisuuden suhteen. (Siikanen 2008, 8; Puuinfo.fi.)

2.1 Puurakentaminen ennen ja nyt

Puurakentamisella on Suomessa pitkät perinteet. Puu oli pitkään käytetyin materiaali rakentamisessa, kunnes 1960-luvulle tultaessa tiili, betoni ja teräs valtasivat kerrostalorakentamisen lisääntymisen ja tiukkojen palomääräysten myötä alaa niin, että vuonna 1967 puurakenteisia rakennuksia uudisrakentamisesta oli enää alle kolmannes. Hiljalleen lisääntyvästä pientalorakentamisesta johtuen puurakentaminen on jälleen lisääntynyt ja 1990-luvun alusta tähän päivään yli kaksinkertaistunut. 99 % suomalaisista vapaa-ajan asunnoista ja yli 75 % muistakin pientaloista on puurakenteisia. Hiljalleen puurakentaminen on alkanut yleistyä myös kerrostaloissa ja julkisissa rakennuksissa. Uudesta puukerrostalotuotannosta esimerkkinä on vuonna 2015 vuoden Puupalkinnon saanut Jyväskylään rakennettu As Oy Puukuokka (kuva 1). (Siikanen 2008, 17-20; Puuinfo.fi.)

Vaikka puurakentamisella on Suomessa pitkät perinteet, on juuri puisten kerrostalojen historia muiden Pohjoismaiden tapaan lyhyt. Puurakentamisen lisäämisen tarpeisiin herättiin vasta 1990-luvun alussa ja samalla alkoi selvitystyö puurakenteisten kerrostalojen mahdollisuudesta. Koska perinteinen puurakentaminen on hyvin erilaista kuin moderni puukerrostalorakentaminen, on mm. palo-, ääni- ja kosteusteknisiä asioita täytynyt tarkastella uudelleen. (Koiso-Kanttila 2000, 106.)



KUVA 1. As Oy Puukuokka (Puuinfo.fi)

2.2 Puurakentaminen ja kestävä kehitys

Ympäristöministeriön (Ympäristöministeriö.fi) määritelmän mukaan kestävän kehityksen peruseh-
tona on biologisen monimuotoisuuden ja ekosysteemien toimivuuden säilyttäminen sekä ihmisen
taloudellisen ja aineellisen toiminnan sopeuttaminen pitkällä aikavälillä luonnon kestävykseen. Rakennusmateriaalituotanto, erityisesti sementin valmistus, ja rakentaminen kuluttaa Euroopassa enem-
män raaka-aineita ja energiaa kuin mikään muu teollisuuden ala. Lisäksi rakentaminen aiheuttaa
valtavasti hiilidioksidipäästöjä ja n. 40 - 50 % Euroopan jätteistä. Myös rakennuksen käyttö kuormit-
taa ympäristöä; rakennuksen käytön osuus energiankulutuksesta on laskelmien mukaan 40 %, sa-
malla kun se aiheuttaa 30 % hiilidioksidipäästöistä. Kun rakentamisen voidaan väestönkasvun myötä
olettaa vain kasvavan, on rakentamisen valinnoilla ekologista merkitystä. Ei kuitenkaan ole olemassa
yksiselitteistä tapaa mitata eri osa-alueiden merkitystä kokonaisuuden kannalta ja tämä altistaa ai-
heen suurelle variaatiolle tulkintoja. (Tolppanen ym. 2013, 127; Puuinfo.fi.)

Puun käytöllä rakennusmateriaalina on monia ekologisia ja taloudellisia vaikutuksia. Puu on uusiu-
tuva materiaali, se sitoo itseensä jo kasvuvaiheessa paljon hiilidioksidia, kevyen puun kuljetus tuo-
tantolaitokseen ja rakennustyömaalle on edullisempaa ja ekologisempaa, pitkälle viety teollinen puu-
tuotteiden valmistus lisää mittatarkkuutta ja vähentää näin jätteen määrää ja toisaalta puujätettä
voidaan käyttää energian tuotannossa. Puurakentamisen lisääminen lisää hyvin hiilidioksidia sitovan
nuoren puun käyttöä ja näin ehkäisee metsien vanhenemista. Samaan aikaan puutuoteteollisuuden
maantieteellinen sijoitusvapaus aiheuttaa positiivisia työllisyysvaikutuksia ympäri maata ja aluesidon-
naisen sekä kasvukeskuspainotteisen, rakennustyömaalla tehtävän työn väheneminen taas tasaa
työvoimapulasta kärsivien alueiden painetta. Työllisyysvaikutukset ulottuvat myös paljon pidem-
mälle, puun käytön lisäämisellä on positiivinen vaikutus myös metsien kasvattamiselle ja sahateollii-
suudelle. (Tolppanen ym. 2013, 127 - 133; Puuinfo.fi e, 3,5.)

Asiantuntijoiden mukaan puun käyttöä rakennusmateriaalina on väistämättä lisättävä. Uusiutumatto-
mien luonnonvarojen määrä ei yksin riitä ja toisaalta puun käyttöä lisäämällä vähenee myös uusiutu-
mattomien luonnonvarojen käytön tarve. Puukerrostalojen ja julkisten rakennusten uudistuotannon
lisäksi puun käytön lisäämiselle on valtavat markkinat lähiötalojen korjaamisessa. 2011 uudistuneet
määräykset sallivat puurunkoisen korjausrakentamisen vanhojen lähiötalojen energiakorjauksissa.
Kevytrakenteisia, rankarunkoisia julkisivuelementtejä on käytetty onnistuneesti korjausrakennuskoh-
teissa ja myös yhden puurakenteisen lisäkerroksen rakentaminen enintään seitsemänkerroksiseen
kerrostaloon on nykyään mahdollista ilman automaattista sammutusjärjestelmää. (Tolppanen yms.
2013, 101 - 110; Puuinfo.fi.)

3 RAKENNUSMATERIAALIT

3.1 Sahatavara

Sahatavara on yleisnimitys kaikilta sivuiltaan sahatulle puutavaralle (kuva 2). Sahatessa puun sisäiset jännitykset poistetaan joko halkaisemalla puun sydän tai poistamalla ydin. Erilaisiin tarpeisiin käytettävää puuta sahataan erilaisilla sahausmenetelmillä, kuten ristosahattua puuta puusepänteollisuuteen. Sahauksen jälkeen puutavara särmätään, esisahataan, lajitellaan ja kuivataan sekä höylätään tarvittaessa. Sahatavaran hintaan vaikuttaa merkittävimmin puun laatuluokka ja rakentamista varten on taloudellista selvittää puutavaran laatuluokka tarkoituksen mukaan. Laatuluokkaan vaikuttavat mm. oksaisuus, lahoviat, vajaasärmäisyys, vinosyisyys sekä latvamurtuma ja se jaetaan pääluokkiin A, B, C ja D. Puun ominaisuuksiin vaikuttaa eniten kasvumaaperä sekä maantieteellinen sijainti. (Siikanen 2008, 54, 58.)



KUVA 2. Sahatavara (MetsäWood.fi)

Kantavissa rakenteissa käytetyltä sahatavaralta vaaditaan lujuusluokka, joka voidaan jaotella koneellisesti tai visuaalisesti. Visuaalisista valintakriteereistä n. 90 % liittyy oksiin, muita kriteereitä ovat mm. halkeamat, kierous, ja hyönteisten aiheuttamat vauriot. Koneellisessa lajittelussa puuta taivutetaan ja näin selvitetään sen kimmomoduuli. Puun lujuus selviää vertaamalla kimmomoduulin riippuvuutta lujuuteen. Lujuuden ja jäykkyyden lisäksi koneellisessa lajittelussa arvioidaan sahatavaran geometrisiä ominaisuuksia antamalla niille sekä lape- ja syrjäväärtydelle ja kieroudelle raja-arvot. Lujuuslajittelua perustuu lajittelusääntöjen mukaan epäedullisimpaan poikkileikkaukseen. (Siikanen 2008, 59 - 62; Puuinfo.fi.)

3.2 Insinööripuutuotteet

Insinööripuutuotteet ovat puusta liimaamalla valmistettuja rakennuskomponentteja (Metsäyhdistys.fi). Yhteistä insinööripuutuotteille on niiden teollinen esivalmistus tuotantolaitoksissa, jossa niiden huolellinen laadun tarkkailu on mahdollista. Puutuotteet pystytään myös kuivattamaan vastamaan n. 15 % kosteuspitoisuutta, jolloin kosteuselämisestä johtuva rakenteiden painuminen pienee rakennusvaiheen jälkeen. Tuotteet ovat myös mittatarkkoja, jolloin tiiviiden liitosten tekeminen on helppoa ja rakentamisen laatu paranee. Puukerrostalon suunnittelussa mittatarkkuudesta on erityisesti hyötyä liitosten suunnittelussa ja näin esimerkiksi painumien hallinnassa. Insinööripuutuotteita ovat mm. CLT-levyt, viilupuu ja liimapuu. (Tolppanen yms 2013, 32, 42 - 43; Metsäyhdistys.fi.)

3.2.1 CLT

CLT (cross laminated timber) on ristikkäin liimatuista lamelleista valmistettu massiivipuulevy, josta voidaan tehdä kaikki maanpäälliset kantavat pysty- ja vaakarakenteet. CLT-levyssä voi olla 3, 5, 7 tai 8 eri paksuista kerrosta. CLT:stä saadaan lujia ja helposti toisiinsa litettäviä rakennusosia, jotka pitävät hyvin muotonsa. Levy toimii samalla myös jäykistävänä rakenteena, eikä erillistä jäykistystä tarvita. Lämmöneristeen tarve on myös vähäisempi, koska CLT toimii itsessään lämmöneristeenä. StoraEnso valmistaa CLT-levyjä Itävallan tehtaallaan ja mm. CrossLam kotimaisena valmistajana Kuhmossa. (Clt.info.fi; CrossLam.fi.)

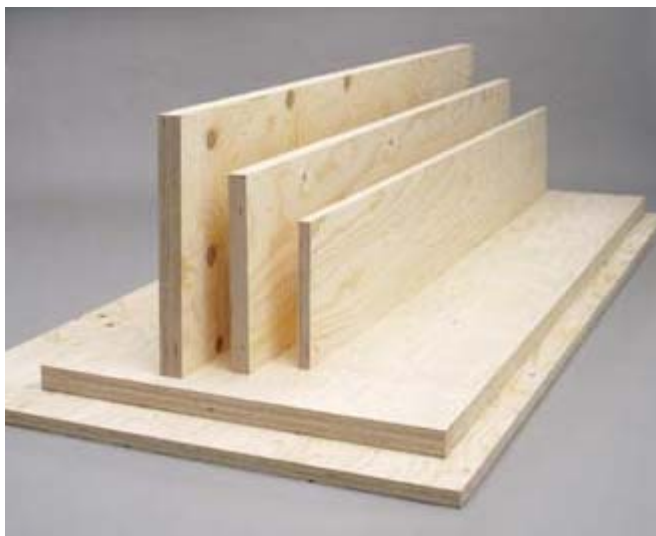


KUVA 3. CLT levy (Clt.info.fi)

Kerroksellisen rakenteen mitoitus eroaa rankarakenteen mitoituksesta huomattavasti, kun sen kerroksista voidaan huomioida kulloinkin vain kantavassa suunnassa olevat osat. Mitoituksessa apua on esim CrossLam Kuhmon tuottamat CLT-elementtien kestävyyslaskelmaesimerkit, joista myöhemmin esimerkkilaskut seinän nurjahduskestävyydestä sekä jäykistävän seinän kestävyyydestä puukerrostalossa.

3.2.2 Viilupuu

Viilupuulla tarkoitetaan standardin SFS-EN 14374 mukaista, kuudesta sorvatuista viiluista yhteen liimaamalla valmistettua viilupuuta. Sitä valmistetaan yleensä rakenteen pituuteen nähden pitkittäisellä syysuunnalla (Kerto-S ja Kerto-T), mutta myös osittain ristikkäisillä viilujen syysuunnilla (Kerto-Q/LVL). Puukerrostalon rakentamisessa painumien hallinta on tärkeää. Ristikkäisistä syysuunnista valmistettu viilulaminaatti LVL vähentää heikompaa vaakasuunnassa olevaa syyn määrää, parantaen samalla mm. painumien hallintaa. Viilupuuta käytetään kantavana palkkirakenteena sekä rakenteen jäykistävänä osana. Viilupuusta saadaan myös mm. näyttäviä kattokannattajia esimerkiksi teräksen kanssa liittorakenteena. (Tolppanen yms 2013, 87 - 88; Puuinfo.fi.)



KUVA 4. Viilupuu (Puuinfo.fi)

3.2.3 Liimapuu

Liimapuu on painoonsa nähden yksi lujimmista rakennusmateriaaleista. Liimapuuta voidaan esteettisyytensä ansiosta käyttää kantavien rakenteiden lisäksi myös ei-kantavissa rakenteissa, huonekaluissa ja sisustuksissa. Liimapuu koostuu vähintään neljästä päällekkäin pinotusta ja toisiaan vasten liimatusta puulamellista. Näistä koostuu rakennusosa, jonka kokoa rajoittaa pääasiassa valmistustilat. Sormijatkoksilla jatkettuna liimapuusta saadaan aikaan suuria pituuksia, joka osaltaan vapauttaa arkkitehdeille ja rakennesuunnittelijoille lähes vapaat kädet muotoiluun ja suunnitteluun (kuva 5). (Puuinfo.fi b, 15 - 25.)



KUVA 5. Liimapuusta valmistettu Gardermoen lentokentän laajennuksen pääpalkki (Puuinfo.fi b, 14)

4 RAKENNUSMÄÄRÄYKSET JA OHJEET

Monet lait, määräykset sekä standardit ja ohjeet määrittävät rakentamista. Ylin on Maankäyttö- ja rakennuslaki, jonka tavoitteena on mm. ohjata maan käyttöä ja rakentamista terveellisen, turvallisen ja viihtyisän elinympäristön saavuttamiseksi, edistää kestävästä kehitystä rakentamisprosesseissa ja turvata kansalaisten osallistumismahdollisuus asioiden valmistelussa. Maankäyttö- ja rakennuslain ohella rakentamista ohjaa Maankäyttö- ja rakennusasetus, joka antaa säännöksiä mm. kaavoituksesta, ranta-alueiden rakentamisesta ja rakentamisen luvista. (Maankäyttö- ja rakennuslaki 1999/132.)

Nykyisin kantavien rakenteiden suunnittelua ohjaa pääosin, ympäristöministeriön asetuksen perusteella, eurooppalaiset suunnittelustandardit eli eurokoodit. Lisäksi asuintalon rakentajaa velvoittaa Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) määräykset ja standardit. RakMK sisältää määräyksiä mm. rakenteiden lujuuden, rakennuksen esteettömyyden ja käyttöturvallisuuden, kiinteistön vesi- ja viemärlaitteistojen sekä kaavamerkintöjen suhteen. (Siikanen 2008, 126 - 128.)

4.1 Eurokoodit

Eurokoodit ja niiden kansalliset liitteet ohjaavat rakenteiden suunnittelua Euroopassa. Eurokoodit ovat yhteisiä suunnittelustandardeja ja niiden suunnittelusta vastaa Euroopan komission toimeksiantosta eurooppalainen standardisoimisjärjestö CEN. Eurokoodien historia ulottuu vuoteen 1975 saakka, jolloin Euroopan yhteistö päätti rakennustekniikkaan liittyvästä toimintaohjelmasta. Eurokoodien tarkoitus oli saada yhdenmukaistetut tekniset säännöt rakennusten sekä maa- ja vesirakennuskohteiden suunnittelua varten. Aluksi ohjeet olivat vain vaihtoehtoja kansallisille säädöksille ja ohjeita käytettiin suunnittelussa rinnakkain, lopulta vuonna 2014 eurokoodeista tuli Ympäristöministeriön antaman asetuksen mukaan vaatimukset täyttäviä suunnitteluohjeita. (Eurocodes.fi; Puuinfo.fi.)

Nykymuotoiset eurokoodit muotoutuivat vuosien 2002 ja 2007 välillä ja jakautuvat standardeihin

- EN 1990:2002 Eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet
- EN 1991 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat
- EN 1992 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu
- EN 1993 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu
- EN1994 Eurokoodi 4: Betoni-teräs liittorakenteiden suunnittelu
- EN1995 Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu
- EN1996 Eurokoodi 6: Muurattujen rakenteiden suunnittelu
- EN1997 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu
- EN1998 Eurokoodi 8: Maanjäristysmitoitus
- EN1999 Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu,

joihin jokaiseen kuuluu useita osia.

Puurakenteiden suunnittelua koskeva Eurokoodi 5 ”koskee rakennusten sekä maa- ja vesirakennuskohteiden suunnittelua käytettäessä puuta (sahatavaraa sahattuna, höylättyä tai pyöreänä puutavarana, liimapuuta tai puisia rakennetuotteita, kuten LVL:ää) tai puulevyjä, jotka on koostettu liimaamalla tai mekaanisin liittimin” (Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu, 11). Standardiin kuuluvat osat

- EN 1995 1-1: Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
- EN 1995-1-2: Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus
- EN 1995-2: Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 2. Sillat.

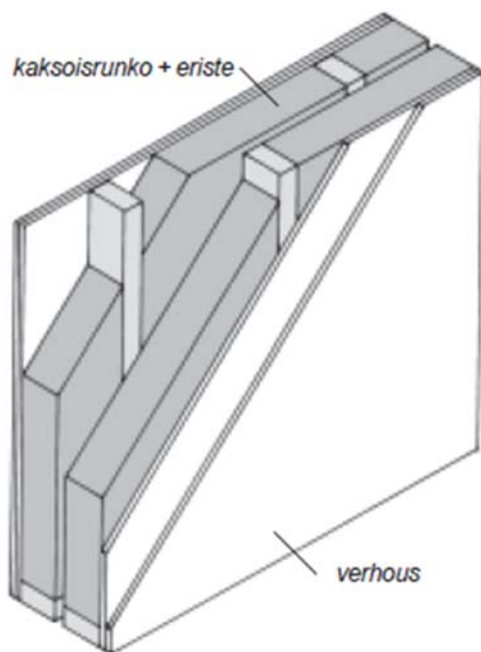
Suomessa otettiin käyttöön eurokoodien ensimmäinen paketti 2007 ja tämän jälkeen eurokoodeja otettiin käyttöön sitä mukaan, kun niiden käännökset ja kansalliset liitteet ovat valmistuneet. Eurokoodien lisäksi muiden suunnitteluohjeiden käyttöä ei suljeta pois, mutta niiden käyttö on hyväksyttävä hankekohtaisesti valvovalla viranomaisella. Talonrakennuksen osalta kansallisten liitteiden julkaisusta on vastuussa Ympäristöministeriö. 1.1.2017 käyttöön otettu uusi rakentamismääräyskokoelman osa ”Rakenteiden lujuus ja vakaus” kokoaa kaikki eurokoodien kansalliset valinnat eurokoodeittain. (Sumkin 2015-05-24; Eurokoodi help desk.)

Eurokoodeja on kritisoitu osin niiden vaikealukuisuudesta ja käytön helpoittamiseksi RIL on julkaissut Suomessa käyttäjätavallisia ja tiiviitä suunnitteluohjeita (RIL 201-207). RIL:n kuormitus- ja varmuustoimikunnan puheenjohtaja Hemmo Sumkinin (2015) Rakennuslehden nettisivuilla julkaistun näkökulmakirjoituksen mukaan ”Eurokoodit luovat oikein käytettynä luotettavan pohjan suunnittelulle. Luotettavien rakenteiden kannalta on oleellista, että lisäksi varmistutaan suunnittelun lähtöoletusten oikeellisuudesta, rakennetta oikein kuvaavien mallien valinnasta, osasuunnitelmien muodostamasta toimivasta kokonaisuudesta ja suunnitelmien tarkastamisesta.” (Sumkin 2015-05-24.)

4.2 Ääneneristysmääräykset

Rakentamismääräyskokoelman 1.10.1998 päivityksessä osassa C1 käsitellään rakennuksen ääneneristystä. Ääneneristystä suunniteltaessa tulee huomioida sekä ilmaääneneristys että askeläänentaso. Ilmaääneneristyksestä huolehtii puurakenteisessa kerrostalossa yleensä huoneistojen väliset kaksoisrunkoiset seinät sekä niiden joustavat liitososat. Seinän ääneneristysominaisuudet perustuvat niiden erillisiin rakennusmassoihin ja väliin jäävään ilmatilaan, jota täytetään seisovia aaltoja absorvoivalla kevyellä materiaalilla, kuten mineraalivillalla. Rakenteiden ja niiden liitosten sekä läpivientien tulee olla riittävän tiiviitä, jottei ilmavuoto pääse heikentämään ääneneristystä. Huomiota tulee kiinnittää myös siihen, etteivät rungot kosketa toisiaan missään vaiheessa (kuva 6). Tämä toteutetaan rankarunkoisessa seinärakenteessa Avoimen puurakennusjärjestelmän (Puuinfo.fi a, 59) mukaan

siten, että runkojen väliin jätetään vähintään 5 millimetrin rako ja [runko]tolpat asennetaan runkopuoliskoilla eri kohtiin. Äänieristysmääräysten ulkopuoliset huoneistojen sisäiset seinät suositellaan rakennettavan lattiarakenteen päältä katon levytyksen alapintaan, jotteivät ne riko välipohjarakennetta ja aiheuta sinne ääneneristyksen kannalta ongelmakohtia. Ilmaääneneristysluku R_w on huoneistojen välillä oltava vähintään 55 desibeliä. Tämä koskee sekä huoneistojen välisiä seinä- että välipohjarakenteita. (Suomen RakMK C1 1998; Puuinfo.fi a; Tolppanen ym. 2013, 158 - 164.)



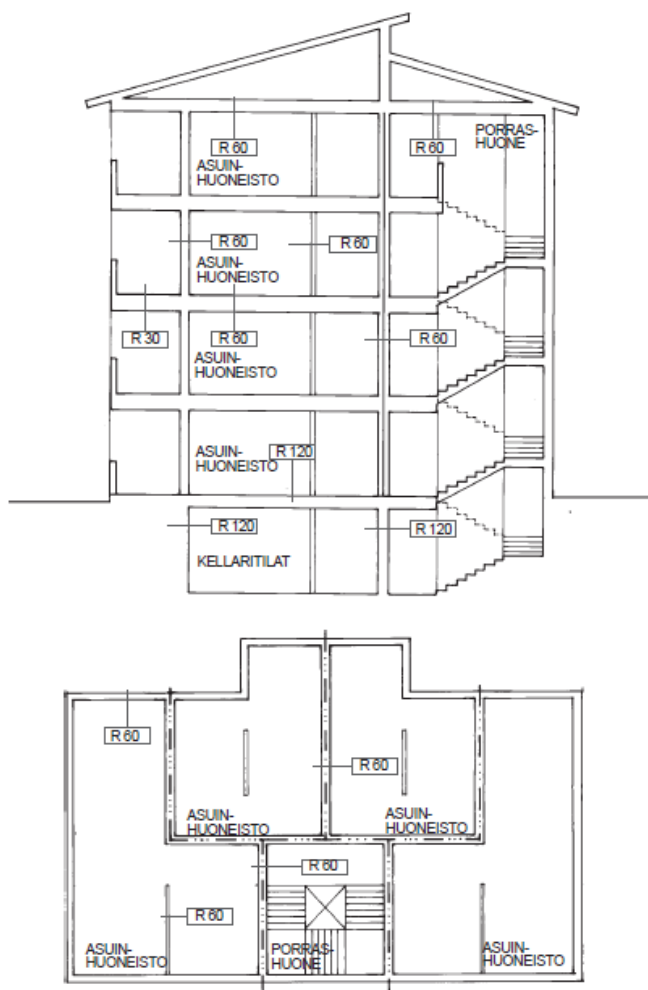
KUVA 6. Huoneistojen välinen seinä (Puuinfo.fi a, 13)

Rakenteiden tulee ilmaäänien lisäksi eristää askelääniä. Askelääniksi kutsutaan rakennuksen rungon välittämiä matalataajuuksisia ääniä, joita puurakenteet eristävät huomattavasti korkeita taajuuksia huonommin. Tällaisia matalataajuuksisia ääniä aiheuttaa askelten lisäksi mm. tavaroiden siirtely. Välipohjan välittämä askeläänitasoluku $L_{n,w}$ voi olla enintään 53 desibeliä ja portaista ja käytävistä huoneistoihin kulkeutuva äänentaso enintään 63 desibeliä. Huoneistojen välisten seinien tapaan välipohjien äänieristys perustuu ilmapölyllä varustettuun kaksoisrunkoon, niin sanottuun jousi-massayhdistelmään. Välipohjarakenteessa massat koostuvat alakattolevytyksestä ja lattian pintarakenteesta ja ilmapöly palkkivälitilasta, jonne syntyviä seisovia aaltoja vaimennetaan väliseinän tapaan pehmeällä, absorboivalla materiaalilla. Välipohjan askelääneneristysominaisuuden kannalta rakenteen massalla ja ilmatilan suuruudella on kuitenkin merkittävin vaikutus. Massan lisäys onnistuu helposti kelluvalla betonipintalaatalla, jonka reunat jätetään irti seinästä äänisillan syntymisen ehkäisemiseksi. Ilmatilan suuruus taas määräytyy kantavan palkkirakenteen mitoituksen mukaan, mutta korkeuden tulee kuitenkin olla ääneneristysvaatimusten vuoksi vähintään 200 millimetriä. (Suomen RakMK C1 1998; Tolppanen ym. 2013, 164 - 168.)

Rakennuksen sisäisten rakenteiden lisäksi myös rakennuksen ulkovaipan tulee eristää ympäristön aiheuttamaa melua. Rakennusmääräyskokoelma ei kuitenkaan ota kantaa ulkovaipan ääneneristysvaatimukseen, tarvittaessa tästä määrätään kaavassa. Tolppasen ym (2013, 170) mukaan ulkoa tulevia ääniä pidetään asukaskyselyissä häiritsevinä, joten myös ulkoseinien ääneneristystasoon on syytä kiinnittää huomiota.

4.3 Palomääräykset

Rakennusten paloturvallisuudesta määrää RakMK:n osa E1, jossa rakennukset jaetaan kolmeen paloluokkaan P1, P2 ja P3. Lisäksi kantavat ja osastoivat rakennusosat jaetaan palonkestoajan mukaan luokkiin kantavuuden (R) (kuva 7), tiiviyyden (E) sekä eristävyvyyden (I) perusteella, rakennustarvikkeet, lattianpäällysteitä lukuunottamatta, luokkiin A1, A2, B, C, D, E ja F sen mukaan kuinka ne vaikuttavat palon syttymiseen ja leviämiseen sekä lisämääreillä s1, s2 ja s3 savun tuoton ja d0, d1 ja d2 pisaroinnin mukaisiin luokkiin. Katteiden paloluokat sekä arviointiperusteet on esitetty erikseen komission päätöksessä 2001/671/EY. (Suomen RakMK E1 2011.)



KUVA 7. Kantavien rakennusosien palonkestovaatimukset P2 -paloluokan 3- ja 4 – kerroksisessa rakennuksessa (Puuinfo.fi a, 56)

Puukerrostalojen rakentamisessa palomääräykset ovat vielä varsin tiukat. Vuonna 2011 uudistuneiden määräysten mukaan 3-8 kerroksiset asuin- ja työpaikkarakennuksena käytettävät puukerrostalot kuuluvat paloluokkaan P2 ja betonirakenteisia taloja vastaavan rakenteiden 60 minuutin palonkestojen lisäksi niiden kaikki huoneistot tulee varustaa omalla automaattisella sammutuslaitteistolla sekä asuintiloissa että lasitetulla parvekkeella. Niissä tulee olla vähintään varmennetut vesilähteet ja niiden kantavia ja osastoivia rakenteita, eristeitä, sisäpintoja, suojaverhouksia ja räystäitä koskevat 60 minuutin paloturvallisuusvaatimukset. (Suomen RakMK E1 2011.)

Suomessa ei puupintoja voi olla juurikaan näkyvillä, vaikka esimerkiksi ruotsalaisissa puukerrostaloissa se onkin mahdollista. Puurakenteet on verhoiltava kerrosluvusta ja sammutusjärjestelmästä riippuen 10 tai 30 minuutin palamattomalla suojaverhouksella, sisätiloissa yleensä kipsilevyllä. Näiden lisäksi palomääräyksissä määrätään julkisivuverhouksen tuuletusraon pysty- ja vaakasuuntaisista palokatkoista ulkopuolisen palon leviämisen torjumiseksi ja palon leviäminen julkisivusta ullakkoon ja yläpohjaan on estettävä EI30 luokan paloräystäällä. Jokaisesta huoneistosta on myös järjestettävä vähintään kaksi poistumistietä, joista toinen on yleensä parveke. Palomääräysten seuraava päivitys on tarkoitus tulla vuoden 2017 aikana, tällöin erityisesti sammutusjärjestelmävaatimuksiin odotetaan muutoksia. (Suomen RakMK E1 2011; Puuinfo.fi)

4.4 Energiategokkuus

1.7.2012 voimaan tulleen RakMK D3 energiatehokkuusvaatimuksen seurauksena asuinkäyttöön tarkoitettujen uudisrakennusten energiatehokkuutta parannetaan noin 20 % entiseen verrattuna. Parannusta haetaan määrittämällä kokonaisenergiankulutus (E-luku), mittaamalla ulkovaipan ilmatii-veyttä (q_{50} -luku), säätelemällä huonetilan lämpötilavaihtelua ja ilmanvaihdon suunnittelun uusilla vaatimuksilla. Uusien määräysten lisäksi rakennuksen energiankulutusta seurataan edelleen rakenteiden U-arvolla, joka kuvaa rakennusosien lämmönläpäisevyyttä. U-arvon avulla lasketaan kokonaislämpöhäviö, jossa rakenteiden U-arvot suhteessa rakenteen pinta-alaan lasketaan yhteen. Tämä RakMK osan C4:n tai SFS-EN standardien mukaan määritettyjen U-arvojen avulla laskettu kokonaislämpöhäviö ei saa ylittää vertailuarvojen mukaan laskettua lämpöhäviötä. (Tolppanen ym. 2013, 120 - 125; Suomen RakMK D3 2012.)

Kokonaisenergiankulutusta mittaava E-luku koostuu rakennuksen laskennallisesta primäärienergiankulutuksesta. Siinä huomioidaan standardikäytön mukaan lämmitettyä nettoalaa kohden laskettu ostoenergiankulutus energiamuodon mukaisella kertoimella painotettuna sekä vähentävänä tekijänä mahdollinen uusiutuva, itse tuotettu omavaraisenergia. Energiamuotokertoimet ovat sähkö 1.7, kaukolämpö 0.7, kaukojäähdytys 0.4, fossiiliset polttoaineet 1.0 ja uusiutuvat polttoaineet (kuten puu) 0.5. (Tolppanen ym. 2013, 120 - 121.)

Puurakerrostalojen energiatehokkuusvaatimukset ovat samat kuin muillakin kerrostaloilla. Puukerrostalon energiatehokkuutta voidaan parantaa eristepaksuutta kasvattamalla. Myös tehdasolosuhteissa mittatarkoiksi valmistetut puurakenteet ja sen myötä rakenteiden kasvava tiiviys vähentää energiahävikkiä puurakenteisissa kerrostaloissa. (Puuinfo.fi.)

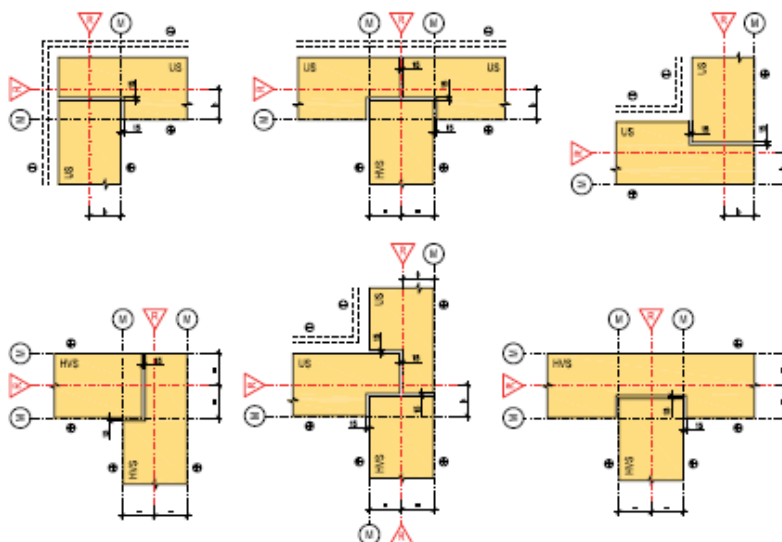
5 PUUKERROSTALOT JA NIIDEN SUUNNITTELU

Puufon mukaan ”hyvin suunniteltu on puoliksi tehty”. Puukerrostalon rakennesuunnittelu vaatiikin aivan omanlaistaan ammattitaitoa, kun sekä mittatarkkuus, että pitkälle viety esivalmistus asettaa suunnittelun tarkkuudelle betonirakentamiseen verrattuna aivan uudenlaisia haasteita. Haasteisiin on pyritty vastaamaan osaltaan RunkoPES:n yleisillä suunnitteluperiaatteilla sekä monipuolisesti käytettävillä rakennejärjestelmillä. (Puuinfo.fi)

5.1 RunkoPES

Betonielementtistandardin (BES) mukainen, standardoidun tuotantojärjestelmän avulla kustannusten alentamiseen pyrkivä teollisuusstandardi, RunkoPES julkaistiin vuonna 2012. 1960- ja 1970-lukujen vaihteessa kehitetty BES mahdollisti aikanaan 1970-luvun ennätysmäisen asuntotuotannon, mahdollistamalla yhtenäisillä elementeillä ja liitososilla urakoitsijalle valmisosien kilpailuttamisen ja hankinnan yhtä aikaa useilta toimittajilta. Samanlaisen standardoidun järjestelmän puuttuminen puurakentamisessa on asiantuntijoiden mukaan hidastanut puurakentamisen läpimurtoa Suomessa ja tämän vuoksi 2009 perustettu Finnish Wood Research Oy kehitti, osana laajempaa Teollisen puuelementtirakentamisen tutkimushanketta, järjestelmän myös puurakentamiselle. (Tolppanen ym. 2013, 34 – 39; Puuinfo.fi)

PuuElementtiStandardin (PES) tarkoituksena on nopeuttaa elementtien asennusta, antaa pelisäännöt elementtien toimitussisältöihin ja -ehtoihin, varmistaa laadunhallinta mm. kosteus-, lämpö ja palotekniikassa sekä suunnittelussa että toteutuksessa ja edesauttaa tietomallinnuksen kehittämistä vakioimalla rakenteiden väliset liittymät (kuva 8). Ranka- ja massiivipuorakenteet sekä pilari-palkkirakenteet käsittävässä avoimessa järjestelmässä on vakioitu elementtien reunojen muoto, kiinnitys- ja tiivistysperiaatteet sekä moduuliviivastojen sijainti suhteessa rakenteeseen niin, että erilaisten elementtien käyttäminen yhdessä on myös mahdollista. Standardisoidut ratkaisut mahdollistavat teollisessa puurakentamisessa toiston myötä myös kokemusten siirtämisen hankkeesta seuraavaan. Samalla on kiinnitetty erityistä huomiota mm. rakennettavuuteen sekä laadunvarmistukseen. (Tolppanen ym. 2013, 34 – 39; Puuinfo.fi)



KUVA 8. RunkoPES, Suurelementtien liittymien geometria (Puuinfo.fi)

RunkoPES-järjestelmän suurimmat odotukset ovat puukerrostalorakentamisen ohella käynnissä olevan valtavan betonikerrostalokannan korjaus- sekä täydennysrakentamisessa. Lisäksi järjestelmän toivotaan kannustavan yrityksiä kehittämään yhtenäisten laatuksien pohjalta omia suunnitteluratkaisujaan sekä lisäämään rakennusosien tuotekehitystä. RunkoPES aineistot on saatavilla eri ohjelmille sopivina rakennekirjastoina puuinfo.fi -palvelusta. (Puuinfo.fi.)

5.2 Rakennejärjestelmät

Puukerrostalon teollisessa rakentamisessa on rakenteille useita vaihtoehtoja. Rakennejärjestelmät jaotellaan kantavan rakenteen mukaan kantavaseinäisiin ja pilari-palkkirakenteisiin sekä elementoinnin mukaan taso- ja tilaelementteihin. RunkoPES:n ansiosta tilaajan ei tarvitse sitoutua järjestelmävalintaan vielä hankkeen alkuvaiheessa, vaan rakennus voidaan suunnitella ottamatta kantaa rakennuksen toteuttajaan tai rakennejärjestelmään. (Tolppanen ym. 2013, 30.)

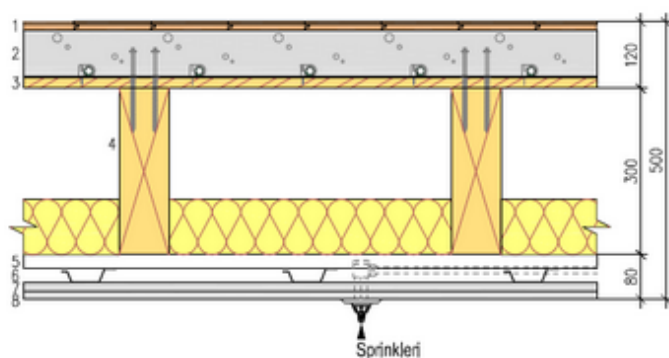
5.2.1 Kantavat seinät -järjestelmä

Kantavat seinät -järjestelmään kuuluvat sekä rankarunkoiset suurelementti- että massiivipuurunkoiset CLT-seinät. Yleisin seinävaihtoehto puurunkoiselle kerrostalolle on perinteisestä pientalorakentamisesta tuttu rankarunkoinen seinä (kuva 9), jonka runko tehdään kerrostalossa sahatavaran sijaan määrämittäisestä liima- tai kertopuusta. Seinä koostuu runkokuusta, runkopuiden alapuolella kulkevasta alaohjauspuusta, rungon yläpuolisesta yläsidepuusta sekä rungon molemminpuolin asennettavasta jäykistelevystä. Ulkoseinäelementit rakennetaan yleensä kerroksen korkuisina ja seinän pituisina suurelementteinä, joihin asennetaan valmiiksi ulkoverhoukset sekä ikkunat ja ovet tarvikkeineen ja listoituksineen. Huoneistojen väliset seinät poikkevat äänieristyksen vuoksi muista kantavista ja ei-kantavista seinistä kaksoisrungolla. (Tolppanen ym. 2013, 40 - 42; Puuinfo.fi.)



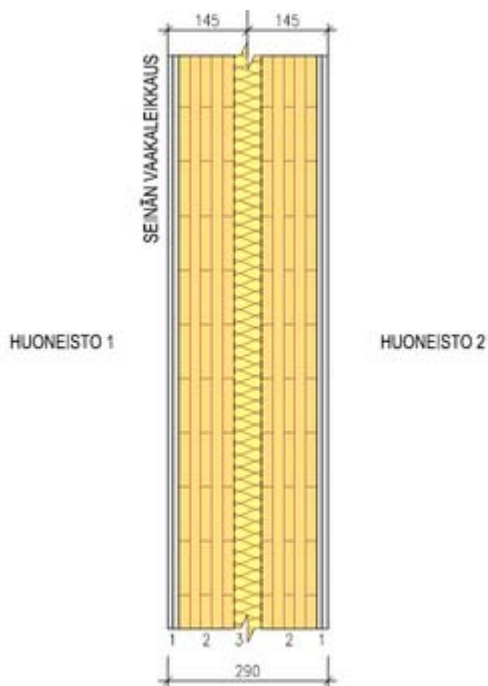
KUVA 9. Rankarunkoinen kantava seinä (Puuinfo.fi)

Rankarunkoisen seinän kanssa voi yhdistää erilaisia välipohjarakenteita ja myös puun ja betonin liittorakenteet eli ns hybridirakenteet (kuva 10) ovat mahdollisia ja kasvattavat tarpeen mukaan välipohjan jännemittaa sekä parantavat äänieristystä. Myös runkopuun korkeuden lisääminen pidentää välipohjan jännemittaa. Elementtien korkea esivalmistusaste edistää mittatarkkuutta, nopeuttaa pystytystä työmaalla ja vähentää rakenteiden altistumista vaihteleville sääolosuhteille. Pystytysvauhti on n. kerros viikossa. (Tolppanen ym. 2013, 40 - 42; Puuinfo.fi.)



KUVA 10. Puu-betoniliittorakenne REI 60 välipohja (Puuinfo.fi)

Rankarunkoisen seinän lisäksi seinärakenne voidaan toteuttaa myös massiivipuiseista CLT-levystä (kuvat 11, 12). CLT-rakenteen etu kerrostalorakentamisessa on sekä lujuus että helppo liitostekniikka ja teollisen jyräintätekniiikan ansiosta tavoitettava mittatarkkuus. Lisäksi rungon jäykistys tekee clt-rungosta kilpailukykyisen erityisesti korkeissa puukerrostaloissa. CLT-levyn uniikki ominaisuus on, että se toimii osaltaan lämmöneristeenä, jolloin erillisen lämmöneristeen paksuus jää tavallista ohuemmaksi. Myöskään erillisiä ilman- ja höyrönsulkukerroksia ei tarvita. (Tolppanen ym. 2013, 43 - 45.)



KUVA 11. Kantava massiivipuurakenteinen huoneistojen välinen REI 60 seinä (Puuinfo.fi)

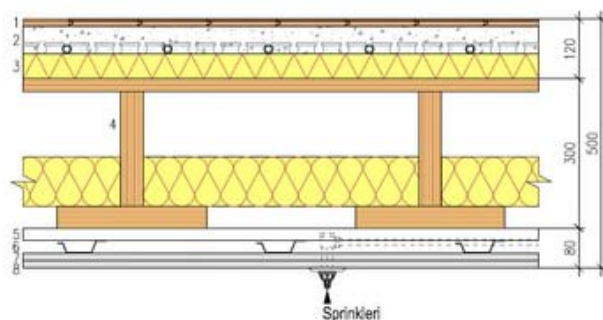
CLT-välipohjalle ominaista on suuret levykoot, jotka vähentävät puskuliitosten tarvetta ja parantaa täten rakenteen ilmatiivyyttä. Välipohjien levykoko on 2,95 x 16 metriä, mutta käytännössä välipohjan jänneväli on värähtelymitoitusvaatimusten vuoksi Suomessa 6 metriä. CLT-välipohja tehdään yleensä ripalaattarakenteena tai puu-betoni-liittorakenteena. Elementit esivalmistetaan halutun valmiusasteen mukaisiksi tehtaissa ja toimitetaan työmaalle tarvittaessa myös asennettuna. CLT-rakenne on yleinen saksankielisissä maissa, joissa se tunnetaan nimellä KLH (Kreuzlagenholz). (Tolpanen ym. 2013, 43 - 45.)



KUVA 12. CLT-rakenteinen seinä sekä ripalaatta (Puuinfo.fi)

5.2.2 Pilari-palkkijärjestelmä

Pilari-palkkijärjestelmä muodostuu liima- tai kertopuisista pilareista ja palkeista, joiden varaan tukeutuu rankarunkoisen seinän tavoin rakennetut suurelementit, jotka ovat kuitenkin ei-kantavia. Pilari-palkkirunko voidaan sijoittaa joko seinien sisään tai näistä erilleen rakennuksen sisätilaan. Vastavasti välipohjapalkisto voidaan sijoittaa joko välipohjalaataston tasoon tai sen alapuolelle. Pilari-palkkirunkoisen rakennuksen jäykistys tehdään mastopilarein ja vinositein sekä tarvittaessa lisäksi levyjäykistyksin. Järjestelmän etuja on kantavien väliseinien puuttumisella tavoitettava muunneltavuus koko rakennuksen elinkaaren ajan. Myös painumat on hallittavissa yhdenmittaisten pystyrakenteiden ansiosta. Tyypillinen välipohja järjestelmässä on ripalaattaelementti (kuva 13), jossa palkiston yläpuolelle asennetaan levyrakenne, jonka päälle tulee askeläänieristys ja betoninen tai kipsimassainen valukerros sekä lattian pintamateriaalit. Palkiston sisäpuolelle asennetaan pehmeä absorboiva materiaali ja sen alle äänieristystä parantava jousiranka sekä alakattolevytys. Rakenteen äänieristysominaisuuksia on käsitelty tarkemmin kohdassa 3.3.1 Ääneneristys. (Tolppanen ym. 2013, 46 - 48.)



KUVA 13. Ripalaatta REI 60 välipohjarakenne (Puuinfo.fi)



KUVA 14. Pilari-palkkirunkoinen seinä ja ripalaattavälipohja (Puuinfo.fi)

5.2.3 Tilaelementit

Tilaelementit (kuva 15) ovat tehtaalla valmiiksi koottuja yksiköitä, jotka käsittävät kiintokalusteita myöten valmiiksi varusteltuja tiloja rakennusten erilaisiin tarpeisiin. Tilaelementeillä voidaan rakentaa muiden rakennejärjestelmien käytön yhteydessä ainoastaan esim märkätilat tai niillä voidaan rakentaa koko talo. Ne koostuvat yleensä kantavasta rungosta, seinistä, lattiasta ja katosta ja muodostavat silloin automaattisesti mm. ääneneristävyyttä parantavan kaksoisrungon viereisen tilaelementin kanssa. Tilaelementin käyttö antaa varsin vapaat kädet kantavan rakenteen suhteen, vaikka useinmiten se rakennetaan rankarakenteisena. (Tolppanen ym. 2013, 48 - 49.)

Erittäin korkean esivalmistusasteen vuoksi tilaelementeillä rakennettaessa työmaavaihe on nopea. Tilaelementit ovat hyvä ratkaisu toistuvuutta omaavissa kohteissa, kuten asuntoloissa ja hotelleissa. Pitkät tuotantosarjat tuovat tällöin taloudellisuutta rakentamiseen. ”Nopeutensa vuoksi järjestelmä on erinomainen täydennysrakentamisessa ja esimerkiksi lisäkerrosten tekemisessä.” (Puuinfo.fi).

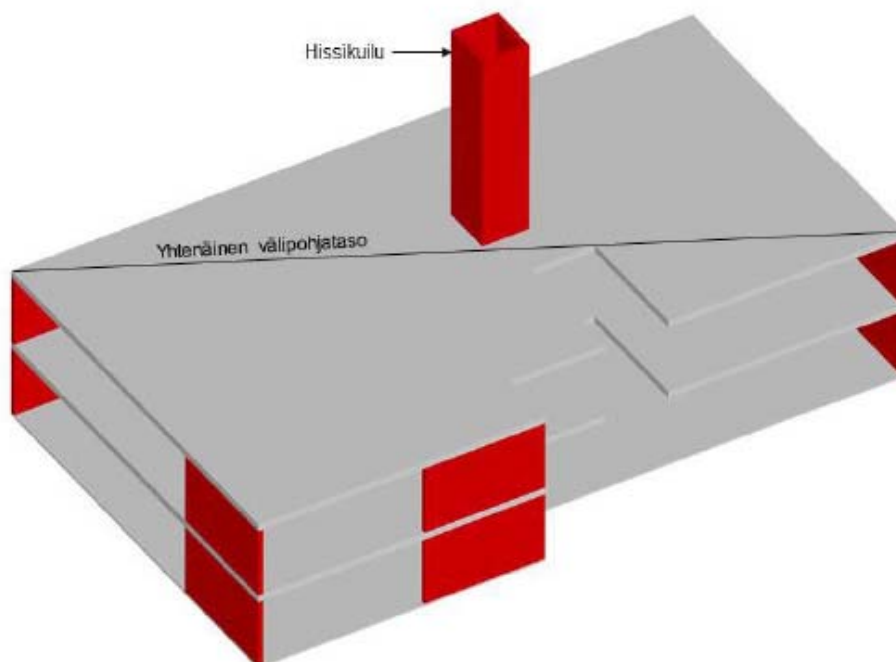


KUVA 15. Tilaelementti (Puuinfo.fi)

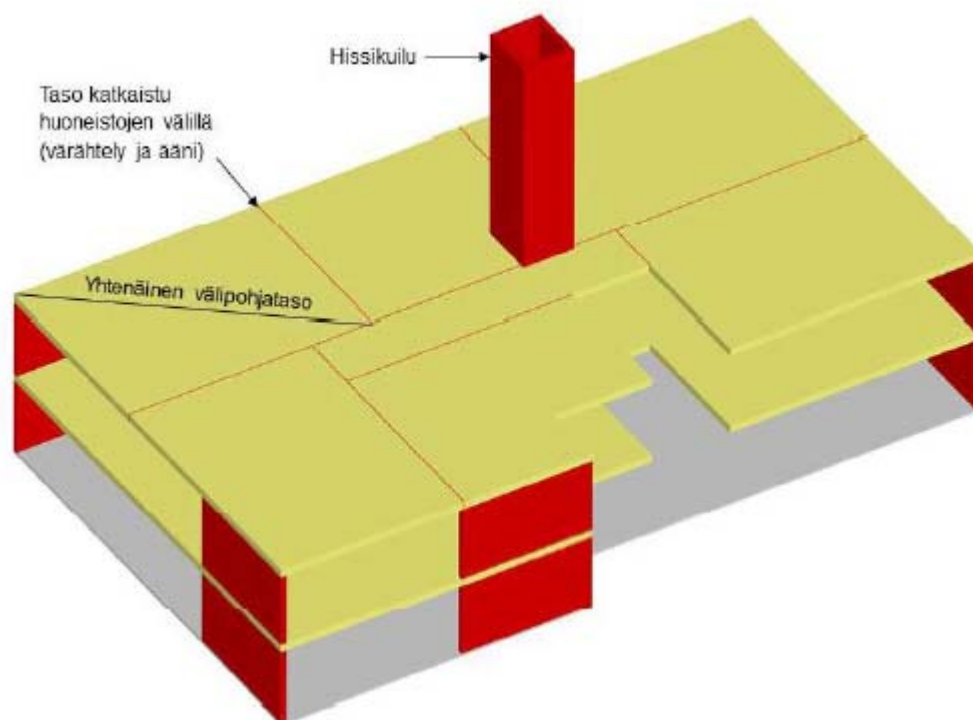
6 PUUKERROSTALON JÄYKISTYS, LASKUESIMERKKI

Rakennuksen jäykistykseen tarkoituksena on johtaa rakennukseen kohdistuvat pysty- ja vaakakuormat vaakarakenteilta jäykistävälle pystyrakenteille. Samalla on huomioitava, etteivät kuormat aiheuta rakenteisiin käyttörajatilan ylittäviä muodonmuutoksia tai murtorajatilan ylittäviä rakenteiden kestävyysongelmia. Vaakakuormia aiheuttavat tuuli sekä rakenteiden vinoudesta ja asennustoleranssista aiheutuva lisävaakavoima. Tilanteen mukaan suunnittelussa voidaan joutua huomioimaan myös onnettomuuskuorma ja ydinvoimaloissa myös maanjäristyskuorma. Pystykuormia aiheuttavat rakenteiden omapaino, hyötykuorma sekä lumikuorma. (Luntta 2013, 12.)

Puukerrostalon jäykistysuunnittelu poikkeaa olennaisesti betonirakenteisen kerrostalon jäykistysuunnittelusta. Betonisessa kerrostalossa välipohja toimii yhtenäisenä, kuormia jäykistävälle hissikuilulle siirtävänä rakenteena (kuva 16), kun taas puukerrostalossa rakenteen äänieristyksen takia vaakarakenteet on yleensä katkaistava huoneistojen kohdalla ja näin yhtenäistä rakennetta ei pääse syntymään (kuva 17). Luntan (2013, 18) mukaan välipohja olisi mahdollista toteuttaa myös huoneistojen läpi jatkuvana levynä. Tämä lisäisi tason jäykkyyttä, mutta käytännössä äänitekniikka vaatii tällöin joustinrankojen käyttämistä alakatoissa ja ratkaisu on niin kallis, ettei Suomessa sitä ole käytetty. Tämän vuoksi puukerrostalon jäykistys toteutetaan huoneistojen välisillä, kantavilla ja jäykistävillä pystyrakenteilla. Puukerrostalossa myös rakenteiden omapaino jää olennaisesti pienemmäksi kuin betonirakenteisessa kerrostalossa ja tämä aiheuttaa tarpeen ankkuroida rakenteet perustuksiinsa erillisellä vetotangolla.



KUVA 16. Betonikerrostalon välipohja (Lahtela 2015)



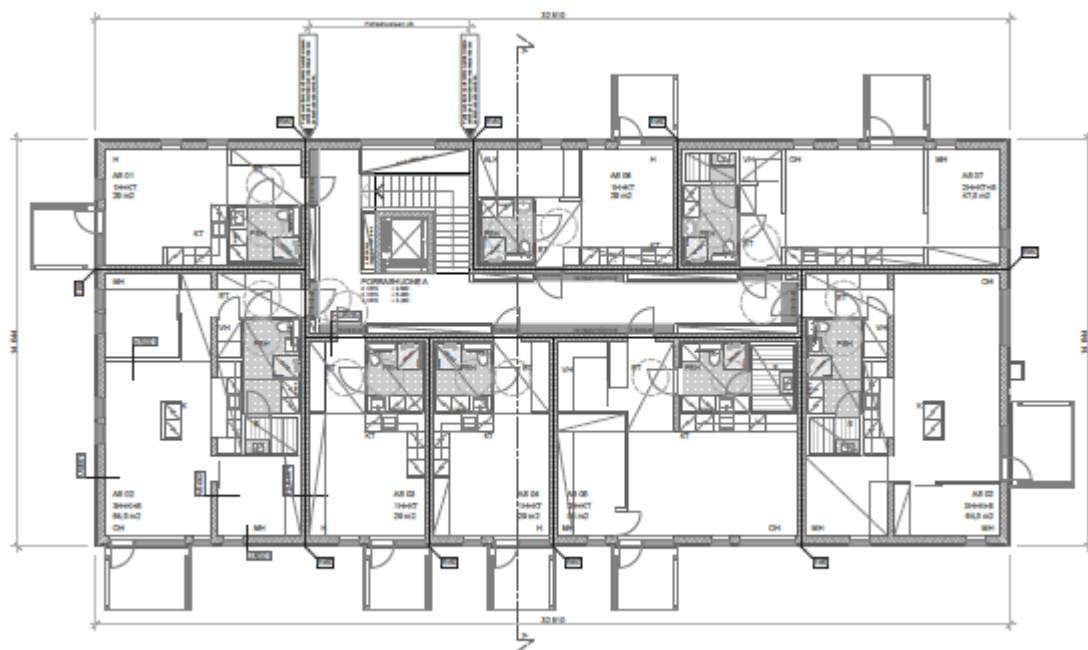
KUVA 17. Puukerrostalon välipohja (Lahtela 2015)

6.1 Mallikerrostalo

Laskuissa käytetään arkkitehtimallina Puuinfon mallikerrostaloa (kuvat 18 - 21) (Puuinfo.fi e). Talo on nelikerroksinen ja sen ensimmäinen kerros on betonirakenteinen.



KUVA 18. Havainnekuva (Puuinfo.fi e, 1)



KUVA 19. Pohjapiirustus (Puuinfo.fi e, 2)



KUVA 20. Julkisivu etelään (Puuinfo.fi e, 4)




KUVA 21. Julkisivut itään ja länteen (Puuinfo.fi e, 5)

6.2 Rankarunkoisen seinän levyjäykistys

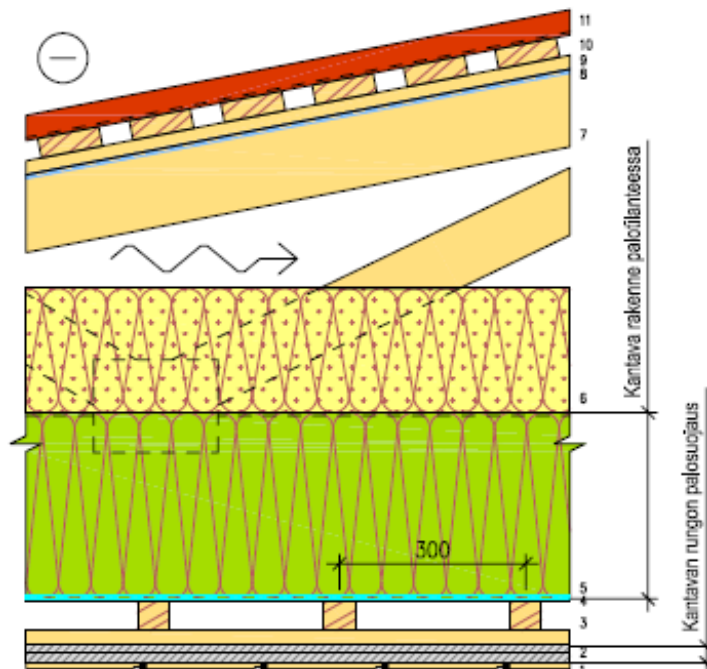
Mallikerrostalon alimman puurakenteisen kerroksen (krs 2) rankarunkoinen jäykistysseinä mitoitetaan ylhäältä kertyville kumulatiivisille vaakakuormille. Mitoituksessa varmistetaan rankarunkoisen jäykisteseinän ankkurointitarve ja ankkurointiin käytettävän vetotangon kestävyys, seinän vaakaleikkauksvoimakkestävyys, seinälohkojen välinen keskinäinen liitostarve, puristuspuolen runkotolpan nurjahdukkestävyys sekä tukipainekkestävyys alaohjauspuussa. Rankarunkoisen seinän laskujen kaava- viittaukset ja materiaaliominaisuudet perustuvat Puurakenteiden suunnitteluohjeeseen 205-1-2009 (Puurakenteiden suunnittelu RIL 2015-1-2017).

6.2.1 Rakennetyypit

Puuinfon avoimessa rakennetyypikirjastossa on saatavilla mallirakennetyyppejä puurakenteisille kerrostaloille. Rankarunkoisen puukerrostalon jäykistelaskuissa on oletettu ulkoseinä, välipohja- sekä yläpohjarakenteiden vastaavan kuvien 22 - 24 mukaisia rakenteita. Rakenteet täyttävät vuoden 2011 palomääräykset sekä vuoden 2012 energiatehokkuusvaatimukset. (Puuinfo.fi g).

	TYÖN NRO		TUNNUS
	PÄIVÄYS 2.1.2012	TEKIJÄ	YP401
RAKENNUSKOHTEEN NIMI JA OSIOITE P2-paloluokan asuin- ja työpaikkarakennus 3 - 4 kerrosta	PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ Yläpohja		

1:10



YP401	Uusiutuva	Uusiutumaton	Yhteensä
Luonnonvarojen kulutus	38...51 kg/m ²	70...130 kg/m ²	120...168 kg/m ²
Energiankulutus	133...166 MJ/m ²	606...672 MJ/m ²	772...804 MJ/m ²
Hilidioksidipäästöt			39...46 kg/m ²
Energiasisältö			530...745 MJ/m ²
Sitoutuneen hiilidioksidin määrä			43...63 kg/m ²
Rakenteen massa			94...139 kg/m ²

RAKENNUKSESSA AINA SPRINKLAUS

NRO	TARKOITUS	VAATIMUS	ESIMERKKITUOTE / -MENETELMÄ	PAKSUUS
1	Sisäverhous	D-s2, d2 *	ARK suunn. mukaan	
2	Suojaverhous K2 10 Palosuojaus 60 minuuttia Jäykistävä levytys	A2-s1, d0	Palokipsilevy	2x 15 mm
3	Ajakaton kantava rakenne Tila sähköasennuksille ja sprinklerille		Koolaus 48x48 k300 + 22x100 k400	70 mm
4	Ilman- ja höyrynsulun tukilevy		Kova puukuitulevy	3 mm
5	Ilman- ja höyrynsulku **		Höyrynsulkumuovi tai -kangas tai Ilmansulkupaperi	0,2...0,3 mm
6	Lämmöneristys	A2-s1, d0	Mineraalivilla (alapaarteiden tasossa kivi-levyty)	500 mm
7	Kantava rakenne		NR-ristikot k900 RAK suunn. mukaan	
8	Ajuskate		Diffuusioavoin kultukangaskate	
9	Tuuletus		Rako ***	
10	Ajuskatteen kiinnitys		Lauta tai soluristikon päällä	
11	Vesikatteen kiinnitysalusta		Kuormituksen ja vesikatteen mukaan	
11	Vesikate		ARK suunn. mukaan	

*) D-s2, d2-luokan tuote => O-s1-luokan sprinklauslaitteisto, B-s1, d0- tai A2-s1, d0-luokan tuote => 2-luokan sprinklauslaitteisto asuinrakennuksessa.


**) Ilman- ja höyrynsulkumateriaalilla valitaan siten, että sisäilman vesihöyrynsäätös on riittävä.

***) Määrittyy alus- ja vesikatetyylin sekä kattokaltevuuden mukaan.

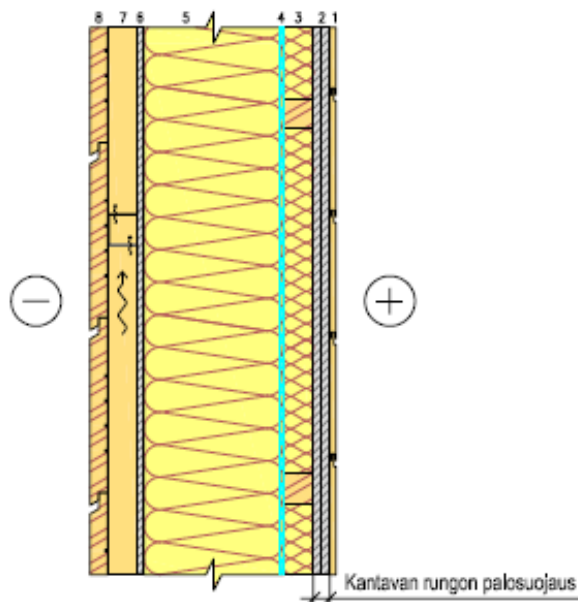
TEKNISET TIEDOT

U-arvo	0,09 W/m ² K (lämmöneristeen λ _d = 0,037 W/mK)
Paloluokitus	REI 60 => Hilittymämitoituksen perusteella

KUVA 22. Kattorakenne (Puuinfo.fi g)

	TYÖN NRO		TUNNUS
	PÄIVÄYS 2.1.2012	TEKIJÄ	US401
RAKENNUSKOHTIEN NIMI JA OSOITE P2-paloluokan asuin- ja työpaikkarakennus 3 - 4 kerrosta		PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ Kantava ulkoseinä	

1:10



US401	Uusiutuva	Uusiutumaton	Yhteensä
luonnonvarojen kulutus	41...49 kg/m ²	45...56 kg/m ²	95...97 kg/m ²
Energiankulutus	113...141 MJ/m ²	355...530 MJ/m ²	468...642 MJ/m ²
Hilidioksidipäästöt			22...33 kg/m ²
Energiasältö			666...757 MJ/m ²
Sitoutuneen hiilidioksidin määrä			57...64 kg/m ²
Rakenteen massa			77...79 kg/m ²

RAKENNUKSESSA AINA SPRINKLAUS

NRO	TARKOITUS	VAATIMUS	ESIMERKKITUOTE / -MENETelmä	PAKSUUS
1	Sisäverho	D-s2, d2 *	ARK suunn, mukaan	
2	Suojaverho Kz 10 Palosuojaus 30 minuuttia Jäykistävä levytys	A2-s1, d0	Kipsilevy	2x 13 mm
3	Lämmöneristys Tila sähköasennuksille	A2-s1, d0	Mineraalivilla (palomittituksen mukaan) Koclaus 48x48 k600	48 mm 48 mm
4	Ilman- ja höyrynsulku **		Höyrynsulkumuovi tai -kangas tai Ilmansulkupaperi	0,2...0,3 mm
5	Lämmöneristys Kantava runko	A2-s1, d0	Mineraalivilla (palomittituksen mukaan) Tolpat 48x223 k600 RAK suunn, mukaan	223 mm 223 mm
6	Tuulensuoja Suojaverho Kz 10 Jäykistävä levytys	A2-s1, d0	Kultukipsilevy	10 mm
7	Tuuletus Julksivun kiinnitysalausta Pystypalokatkot		Rako + palokatkot 1 kpl / kerros 48x48 k600	48 mm 48 mm
8	Julksivu	D-s2, d2 ***	Ulkoverhoalusta	≥ 28 mm

*) D-s2, d2-luokan tuote => OH-luokan sprinklaustilasto, B-s1, d0- tai A2-s1, d0-luokan tuote => Z-luokan sprinklaustilasto asuinrakennuksessa.

**) Ilman- ja höyrynsulkumateriaali valitaan siten, että sisäpuolelta tuleva vesihöyrynsulku suhteessa tuulensuojan vesihöyrynsulkuun on riittävä.

***) EHDOT: tuuletusraon palokatkot; riiyisyys EI 30; muut rakennukset väh. 8 mm etäisyydellä; rakennus ei ole 1. kerroksessa tai poltustilasta ylä- tai alapuolella.

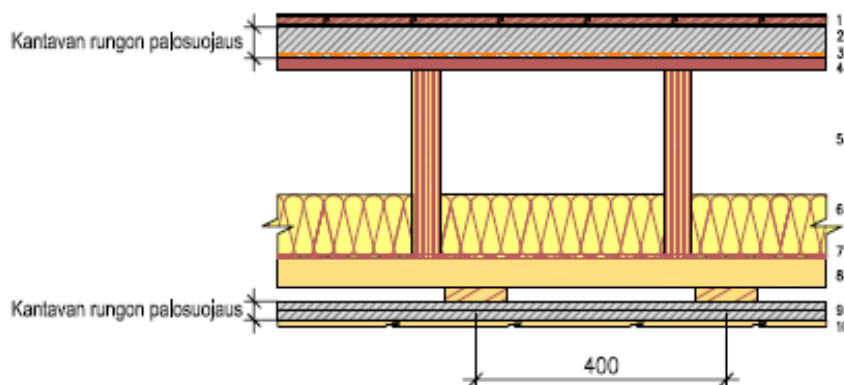
TEKNISET TIEDOT

U-arvo	0,16 W/m ² K (lämmöneristeen λ = 0,037 W/mK)
Paloluokitus	REI 60 => Hilittymättömyyden perusteella

KUVA 23. Ulkoseinärakenne (Puuinfo.fi g)

PUUINFO	TYÖN NRO		TUNNUS VP401
	PÄIVÄYS 2.1.2012	TEKIJÄ	
RAKENUSKOHTEEEN NIMI JA OSOITE P2-paloluokan asuin- ja työpaikkarakennus 3 - 4 kerrosta		PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ Huoneiston sisäinen välipohja	

1:10



VP401	Uusiutuva	Uusiutumaton	Yhteensä
Luonnonvarojen kulutus	55 .. 62 kg/m ²	132 .. 143 kg/m ²	194 .. 198 kg/m ²
Energiankulutus	150 .. 163 MJ/m ²	623 .. 658 MJ/m ²	786 .. 808 MJ/m ²
Hiihtidioksidipäästöt			38 .. 41 kg/m ²
Energiäsältö			886 .. 1003 MJ/m ²
Sitoutuneen hiilidioksidin määrä			75 .. 85 kg/m ²
Rakenteen massa			187 .. 190 kg/m ²

RAKENNUKSESSA AINA SPRINKLAUS

NRO	TARKOITUS	VAATIMUS	ESIMERKKITUOTE / -MENETelmä	PAKSUUS
1	Lattialaudoite		ARK suunn. mukaan	
2	Lattialämmitys rakenne		Floor 4320 Pikasaneeraus Plaanio * + lasikultuverkko	50 mm
3	Palosuojaus 60 minuuttia			
4	Valusuoja		Floor 4940 Erotuskangas (polypropeenikangas)	
5	Alustallelevytys **		Ympäripontattu kuusivaner RAK suunn. mukaan	18 mm
6	Jäykistävä levytys			
7	Kantava runko		Palkit 45x300 k400 RAK suunn. mukaan	300 mm
8	Ääneneristys	A2-s1, d0	Mineraalivilla	≥ 100 mm
9	Ilmansulku		Ilmansulkupaperi	0,2...0,3 mm
10	Alakaton kantava rakenne		Koolaus 22x100 k300 + 22x100 k400	44 mm
11	Tila sähköasennuksille ja sprinklerille			
12	Suojaverho Kz 10	A2-s1, d0	Palokipsilevy	2x 15 mm
13	Palosuojaus 60 minuuttia			
14	Sisäverho	D-s2, d2 ***	ARK suunn. mukaan	

*) Suositellaan, jotta valun vesimäärä saadaan minimoitua.

***) Levyn ponnissaumassa sekä levyjen välissä polyuretaanilla.

***) D-s2, d2-luokan tuote => OH-luokan sprinklauslaitteisto. B-s1, d0- tai A2-s1, d0-luokan tuote => 2-luokan sprinklauslaitteisto asuinrakennuksessa.

TEKNISEET TIEDOT

Ääneneristys	-
Paloluokitus	REI 60 => Kantava runko palosuojattu

KUVA 24. Välipohjarakenne (Puuinfo.fi g)

6.2.2 Vaakakuormat

Kokonaistuulikuorma

Määritetään rakennuksen pidemmän sivun kokonaistuulikuorma, josta päätyseinälle kohdistuu puolet. Tuulikuorma lasketaan yksinkertaisen menettelyn (Puuinfo.fi d, 12 - 14) mukaan. Kuorman ominaisarvoon vaikuttavat rakennuksen sijainnin maastoluokka, rakennuksen muodosta riippuva voimakkeroin, rakennuksen korkeutta sekä maastoluokkaa vastaava nopeuspaine sekä rakenteen tuulta vastaan kohtisuora projektiopinta-ala (kuva 25).



KUVA 25. Tuulikuorman projektion pinta-ala (Puuinfo.fi e, 4; muok. Mäklin 2017)

Lähtötiedot:

Rakennuksen korkeus maanpinnasta

$$H := 15.54\text{m}$$

Tuulipinta-alan leveys

$$b := 16.4\text{m}$$

Tuulipinta-alan korkeus

$$h := 13.7\text{m}$$

Projektion ala

$$A_{\text{ref}} := b \cdot h$$

$$A_{\text{ref}} = 224.7 \text{ m}^2$$

Maastoluokka

III

Tuulen nopeuspaine

$$q_k(h) := 0.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Voimakkeroin

$$c_f := 1.3$$

0.6H korkeudella maanpinnasta sijaitseva vaakasuuntainen kokonaistuulikuorman ominaisarvo

$$F_{w,k} := c_f q_k(h) A_{\text{ref}}$$

$$F_{w,k} = 160.6 \text{ kN}$$

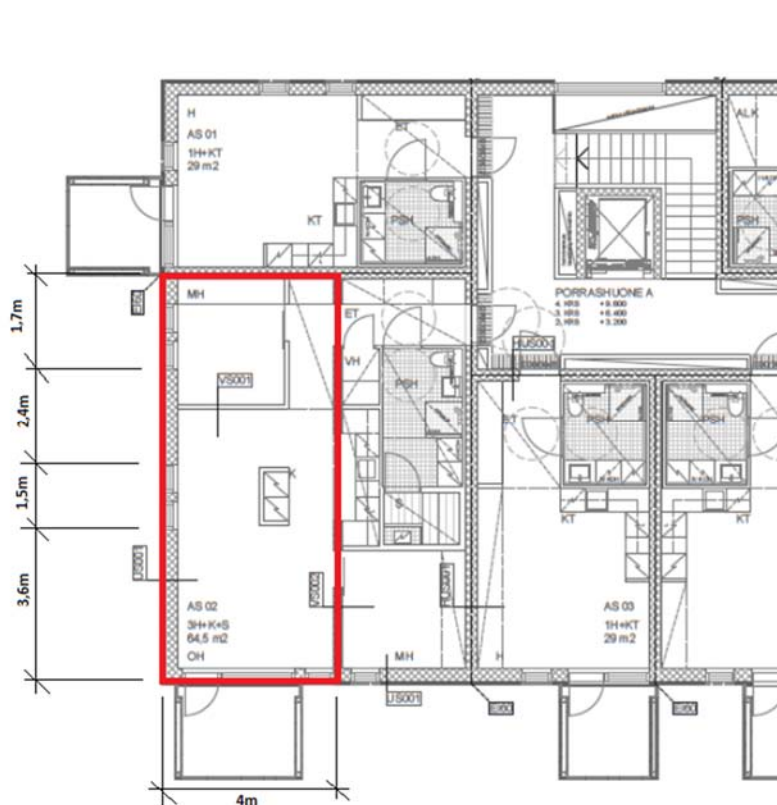
(1)

Kokonaistuulikuorman resultantti voidaan muuntaa tasaiseksi kuormaksi Asuinrakennuksen sovel-
luslaskelman mallin mukaan. (Puuinfo.fi c, 16.)

$$q_{w.k} := \frac{F_{w.k}}{0.8 \cdot A_{ref}} = 0.9 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

Kerroskohtainen tuulikuorma

Puukerrostalossa huoneistojen väliset seinät toimivat kukin jäykistävinä seininä. Tällöin reunimmai-
sen huoneiston leveydelle (8 m) kohdistuvasta tuulikuormasta puolet (4 m) kohdistuu rakennuksen
ulkoseinälle (kuva 26).



KUVA 26. Ulkoseinän kuormitusala (Puuinfo.fi e, 2; muok. Mäklin 2017)

Ylimmän kerroksen kerroskorkeus on mallitalon mittojen perusteella 4.34 m ja muut kerrokset kukin
3.2 m (kuva 27). Näillä mitoilla lasketaan kerroskohtaiset resultantit tuulikuormille.

Tuulikuorman leveys (kuvat 26 ja 27)

$$b_{tuuli} := 4.0m$$



KUVA 27. Kerroskohtaisten tuulikuormien kuormitusalat (Puuinfo.fi e, 4; muok. Mäklin 2017)

Tuulikuorman resultanttien käyttörajatilat kerroksittain

Katto, H4

kerroskorkeus

kuormitusala

$$h_4 := 4.34\text{m}$$

$$A_{H4} := h_4 \cdot b_{\text{tuuli}} = 17.4 \text{ m}^2$$

Tuulikuorman resultantti kerroksessa 4

$$H_4 := q_{w,k} \cdot A_{H4}$$

$$H_4 = 15.5 \text{ kN}$$

H3

$$h_3 := 3.2\text{m}$$

$$A_{H3} := h_3 \cdot b_{\text{tuuli}} = 12.8 \text{ m}^2$$

Tuulikuorman resultantti kerroksessa 3

$$H_3 := q_{w,k} \cdot A_{H3}$$

$$H_3 = 11.4 \text{ kN}$$

H2

$$h_2 := 3.2\text{m}$$

$$A_{H2} := h_2 \cdot b_{\text{tuuli}} = 12.8 \text{ m}^2$$

Tuulikuorman resultantti kerroksessa 2

$$H_2 := q_{w,k} \cdot A_{H2}$$

$$H_2 = 11.4 \text{ kN}$$

Tuulikuorman resultanttien murtorajatilat kerroksittain

$$H_{4.MRT} := 1.5 \cdot H_4 \quad H_{4.MRT} = 23.3 \cdot \text{kN}$$

$$H_{3.MRT} := 1.5 \cdot H_3 \quad H_{3.MRT} = 17.2 \cdot \text{kN}$$

$$H_{2.MRT} := 1.5 \cdot H_2 \quad H_{2.MRT} = 17.2 \cdot \text{kN}$$

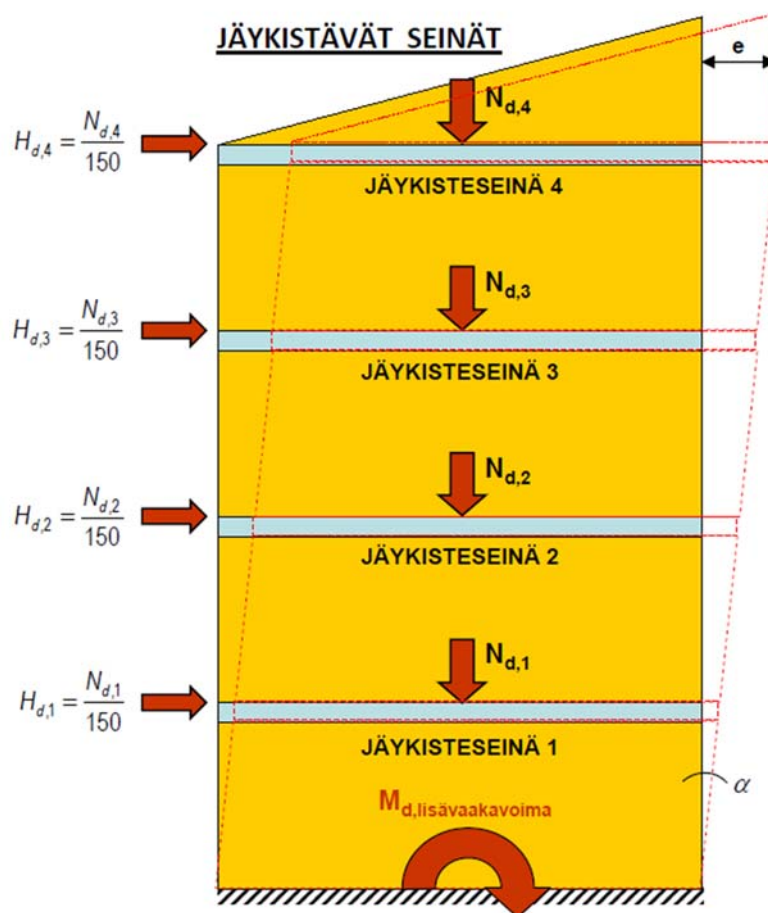
Tuulikuormat yhteensä

$$H_{MRT} := H_{4.MRT} + H_{3.MRT} + H_{2.MRT}$$

$$H_{MRT} = 57.6 \cdot \text{kN}$$

Rakenteiden vinoudesta aiheutuva lisävaakavoima

Rakenteiden vinoudesta ja asennustoleranssista johtuva kerroksittainen lisävaakavoima muodostuu rakenteiden omasta painosta $N/150$ (kuva 28).



KUVA 28. Rakenteiden vinoudesta aiheutuvan kerroksittaisen lisävaakavoiman kertymisen periaate (Lahtela 2015)

Lähtötiedot (kuva 26)

Jäykistävän seinän kokonaispituus

$$L := 3.6\text{m} + 1.5\text{m} + 2.4\text{m} + 1.7\text{m} = 9.2\text{m}$$

kuormitusleveys

$$b := b_{\text{tuuli}} = 4\text{m}$$

Rakenteiden painot esimerkkirakenteista (kuvat 22-24)

Ulkoseinän paino

$$us_{\text{rak}} := 0.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Yläpohjan paino

$$yp_{\text{rak}} := 1.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Välipohjan paino

$$vp_{\text{rak}} := 1.90 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Kerrosittainen lisävaakavoiman resultantti

$$N_4 := \frac{us_{\text{rak}} \cdot h_4 \cdot L + yp_{\text{rak}} \cdot b \cdot L}{150} = 0.6 \cdot \text{kN}$$

$$N_3 := \frac{us_{\text{rak}} \cdot h_3 \cdot L + vp_{\text{rak}} \cdot b \cdot L}{150} = 0.6 \cdot \text{kN}$$

$$N_2 := \frac{us_{\text{rak}} \cdot h_2 \cdot L + vp_{\text{rak}} \cdot b \cdot L}{150} = 0.6 \cdot \text{kN}$$

Vaakasuuntaiset kuormat yhteensä

Kerroskohtaiset vaakavoimat

$$H_{4,\text{yht}} := H_{4,\text{MRT}} + N_4 = 23.8 \cdot \text{kN}$$

$$H_{3,\text{yht}} := H_{3,\text{MRT}} + N_3 = 17.8 \cdot \text{kN}$$

$$H_{2,\text{yht}} := H_{2,\text{MRT}} + N_2 = 17.8 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoimat yhteensä

$$H := H_{4,\text{yht}} + H_{3,\text{yht}} + H_{2,\text{yht}} \quad H = 59.4 \cdot \text{kN}$$

Rakenteen päätyseinään yhden huoneiston alalle on hahmoteltu mahtuvan 5 kpl 1,2 m leveitä jäykistelevyjä (kuva 29). Kerroskohtainen tuulikuorma sekä rakenteiden vinoudesta aiheutuva lisävaa-kavoima jaetaan yhtä levyä kohti ja lasketaan alas. Voimien oletetaan siirtyvän symmetrisesti vaaka-rakenteilta pystyrakenteille.



KUVA 29. Vaakakuormien kertyminen ja jäykistyslevyjien jako (Puuinfo.fi e, 5; muok. Mäklin 2017)

Levykohtaiset vaakavoimat

$$H_{4.levy} := \frac{H_{4.yht}}{5} = 4.8 \cdot \text{kN}$$

$$H_{3.levy} := \frac{H_{3.yht}}{5} = 3.6 \cdot \text{kN}$$

$$H_{2.levy} := \frac{H_{2.yht}}{5} = 3.6 \cdot \text{kN}$$

$$H_{levy.yht} := H_{4.levy} + H_{3.levy} + H_{2.levy} \quad H_{levy.yht} = 11.9 \text{ kN}$$

Resultanttien korkeudet alimmaista betonirakenteisesta kerroksesta (kuva 29).

$$h_{H4} := 10.17\text{m} \quad h_{H3} := 6.4\text{m} \quad h_{H2} := 3.2\text{m}$$

Levykohtaiset vaakavoimat alas laskettuna

$$M_{H.4.levy} := H_{4.levy} \cdot h_{H4} = 48.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{H.3.levy} := H_{3.levy} \cdot h_{H3} = 22.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{H.2.levy} := H_{2.levy} \cdot h_{H2} = 11.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Levyä kohti kertyvä momentti alimmassa puurakenteisessa kerroksessa

$$M_{i.v.Ed} := M_{H.4.levy} + M_{H.3.levy} + M_{H.2.levy} \quad M_{i.v.Ed} = 82.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

6.2.3 Ankkuroitava voima

Puukerrostalossa rakenteiden omapainosta koostuva pystyvoima ei yleensä riitä vastaamaan edellä lasketuista vaakavoimista syntyvää kaatavaa momenttia ($M_{i.v.Ed}$) vastaan. Tämän vuoksi seinä on ankkuroitava perustuksiinsa ja tarvittaessa myös kerroksittain välipohjan läpi alempaan kerrokseen esimerkiksi jatkettavan kierretangon avulla (kuva 30). Seuraavassa tarkastellaan alimman puurakenteisen kerroksen jäykisteseinän ankkurointia betonisen kerroksen tasossa.



KUVA 30. Jäykisteseinien ankkurointi vetotangon avulla

Ankkuroitavasta voimasta (kuva 31) saadaan vähentää varmuuskertoimella vähennetty määrä rakenteiden omasta painosta. Lasketaan omapainon osuus yhtä jäykistelevyä kohti. Kuormitusleveys on puolet reunimmaisen huoneiston leveydestä (kuva 26) ja kattorakenteiden kuormalle käytetään samaa kuormitusalaa.

jäykistelevyn leveys

$$b_{\text{levy}} := 1.2\text{m}$$

Yläpohjan paino yhtä jäykistelevyä kohti

$$op_{\text{yp}} := b_{\text{levy}} \cdot b \cdot \nu_{\text{rak}}$$

Välipohjien paino yhtä jäykistelevyä kohti

$$op_{\text{vp}} := b_{\text{levy}} \cdot b \cdot \nu_{\text{rak}} \cdot 2$$

Omapaino varmuuskertoimella kerrottuna

$$op_{\text{rak}} := 0.9 \cdot (op_{\text{yp}} + op_{\text{vp}})$$

kuormitusleveys

$$b := 4\text{m}$$

$$op_{\text{yp}} = 6.7 \cdot \text{kN}$$

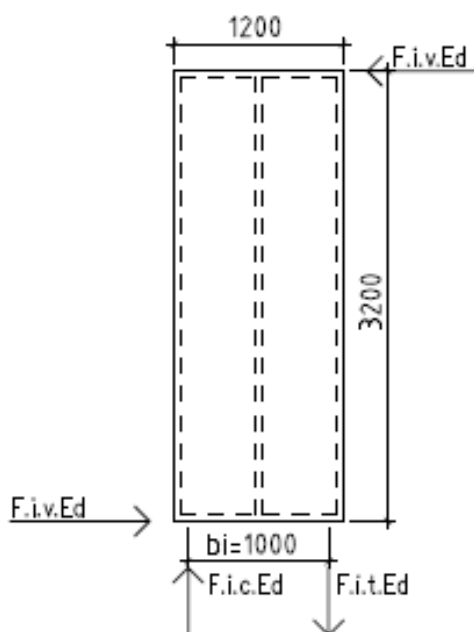
$$op_{\text{vp}} = 18.2 \cdot \text{kN}$$

$$op_{\text{rak}} = 22.4 \cdot \text{kN}$$

Ankkuroitava voima lasketaan kuvan 31 mukaan kaavasta

$$F_{i,c,Ed} = F_{i,t,Ed} = \frac{F_{i,v,Ed} \cdot h}{b_i}$$

missä h on seinän korkeus. (Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu, 90).



KUVA 31. Jäykistävän seinän ankkurointivoima (Mäklin 2017)

Ankkurointivoimaa laskettaessa on käytetty $b_i = 1$ m (kuva 31), johtuen siitä, että puristuspuolella on tietty leveys ja jos käytetään vetotankoa, ankkurointivoima on vedetty elementin sisään.

Ankkurointipisteiden välinen leveys jäykistelevyssä

$$b_j := 1\text{ m}$$

Ankkuroitava voima ennen omapainon vähennystä

$$F_{i.v.Ed} \cdot h := M_{i.v.Ed}$$

$$F_{i.t.Ed} := \frac{M_{i.v.Ed}}{b_j} \quad F_{i.t.Ed} = 82.6 \cdot \text{kN}$$

Lopullinen ankkuroitava voima

$$F_{i.t.Ed.tot} := F_{i.t.Ed} - \sigma_{rak} \quad F_{i.t.Ed.tot} = 60.2 \text{ kN}$$

6.2.4 Vetotangon kestävyys

Ankkuroitava voima on siirrettävä pystyrakenteista ensimmäisen kerroksen betonirakenteeseen vetotangon avulla. Mitoitetaan vetotankona käytettävän lujuusluokan 8.8 pultin paksuus.

Ankkuroitava maksimivetovoima

$$F_{i.t.Ed.tot} = 60.2 \cdot \text{kN}$$

Lujuusluokan 8.8 pultin vetolujuus

Teräksen osavarmuusluku

$$f_k := 640 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\gamma_M := 1.1$$

$$f_d := \frac{f_k}{\gamma_M} = 581.8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vaadittava tangon poikkipinta-ala

$$A_{8.8} := \frac{F_{i.t.Ed.tot}}{f_d} \quad A_{8.8} = 103.4 \cdot \text{mm}^2$$

Kierretangon tehollinen paksuus

$$d_{\text{eff}} := \sqrt{\frac{4 \cdot A_{8.8}}{\pi}} \quad d_{\text{eff}} = 11.5 \cdot \text{mm}$$

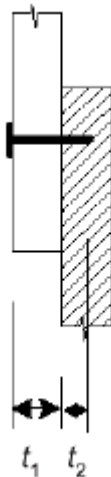
Kierretangon todellinen vähimmäispaksuus

$$d_{\text{min}} := \frac{d_{\text{eff}}}{0.82} \quad d_{\text{min}} = 14 \cdot \text{mm}$$

Valitaan alimman kerroksen ankkurointitangoksi M16 8.8.

6.2.5 Jäykisteseinän vaakaleikkausvoimakestävyys

Tarkastellaan sisäpuolisen, 15 mm paksun vanerisen jäykistevyn ja runkokuun välisen liitoksen (kuva 32) kestävyyttä. (Puuinfo.fi e, 31-32, 42.)



KUVA 32. Yksileikkeinen naulaliitos (Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu, 59)

Vanerit kiinnitetään runkotolppiin 5 mm ruuveilla

ruuviliittimen paksuus

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

vanerin paksuus

$$t := 15\text{mm}$$

Sahatavaran C24 ominaistiheys

$$\rho_k := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Sahatavaran osavarmuusluku

$$\gamma_M := 1.4$$

Puutavaran tiheysvaikutuskerroin

$$k_p := \sqrt{\frac{\rho_k \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{350}} \quad k_p = 1 \quad (2)$$

Korjauskerroin, kun $t > 2d$ ja $d < t_{ai} = 5\text{mm}$

$$2d = 10\text{-mm}$$

$$k_1 := \left(0.5 + \frac{t}{12d}\right) \cdot k_p \quad k_1 = 0.8 \quad (3)$$

Sahatavaran aikavaikutuskerroin

$$k_{\text{mod}} := 1.1$$

Yksittäisen liittimen leikkauskestävyyden mitoitusarvo, kun liitoksessa vaneri on läpinaulattu puuta-
varaan.

$$R_d := \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \cdot k_p \cdot 120 \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}} \right)^{1.7} \cdot \text{N} \quad R_d = 1.5 \cdot \text{kN} \quad (4)$$

Ruuvien tartuntapituus $> 12d$, joten leikkauskestävyyttä ei tarvitse pienentää

$$12d = 60 \cdot \text{mm}$$

Levyn reunoilla olevien liittimien leikkauskestävyyden mitoitusarvoa saadaan korottaa kertoimella
1.2. (Puuinfo.fi e, 42).

$$F_{f,Rd} := 1.2 \cdot R_d \quad F_{f,Rd} = 1.7 \cdot \text{kN}$$

Jäykisteseinän geometria

Korkeus

$$h := 3 \text{m}$$

Leveys

$$b := 1.2 \text{m}$$

$$b_0 := \frac{h}{2} = 1.5 \cdot \text{m}$$

$$c_i := \begin{cases} 1 & \text{if } b_i > b_0 \\ \frac{b}{b_0} & \text{if } b_i < b_0 \end{cases} \quad c_i = 0.8 \quad (5)$$

Seinälohkon liittimien väli

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

Seinälohkon vaakaleikkausvoimakestävyyden mitoitusarvo

$$F_{v,Rd} := \frac{F_{f,Rd} \cdot b_i \cdot c_i}{s} \quad (6)$$

Levylle kohdistuva vaakavoima (6.2.2 Kuormat – Vaakasuuntaiset kuormat yhteensä)

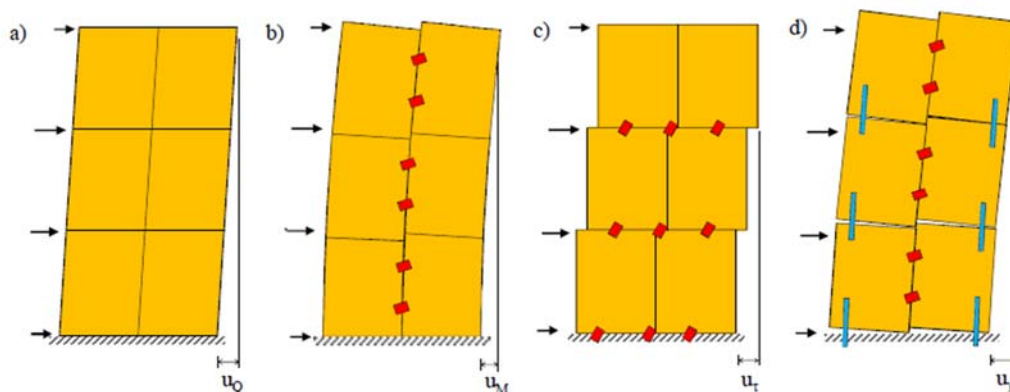
$$H_{\text{levy,yht}} = 11.9 \text{ kN}$$

Mitoitusehto

$$H_{\text{levy,yht}} = 11.9 \cdot \text{kN} < F_{v,Rd} = 14 \cdot \text{kN}$$

15 mm paksun vanerilevyn kapasiteetti lasketuilla liitoksilla riittää alimman kerroksen jäykisteeksi.

6.2.6 Seinälohkojen välisen pystyliitoksen ruuvaustarve



KUVA 33. Vaakakuormitetun levyseinän muodonmuutokset (Luntta 2013, 76)

Luntan (2013, 76) clt-levyseiä koskevassa kuvassa (kuva 33) käsitellään jäykisteseinän muodonmuutoksia. Muodonmuutokset ovat a) leikkausmuodonmuutos, b) taivutusmuodonmuutos, c) vaaka-
sauman leikkausliukuma sekä d) ankkurointiliittimien ja pystysauman liitossiirtymästä aiheutuva kiertäminen. Näin ollen myös seinälohkojen välisen pystyliitoksen ruuvaustarve tulee tarkastaa.

Alimman kerroksen kumuloitunut vaakavoima levyjen välisessä liitoksessa, tapauksessa jossa lohkojen reunarangat kiinnitetään toisiinsa (kuva 34):

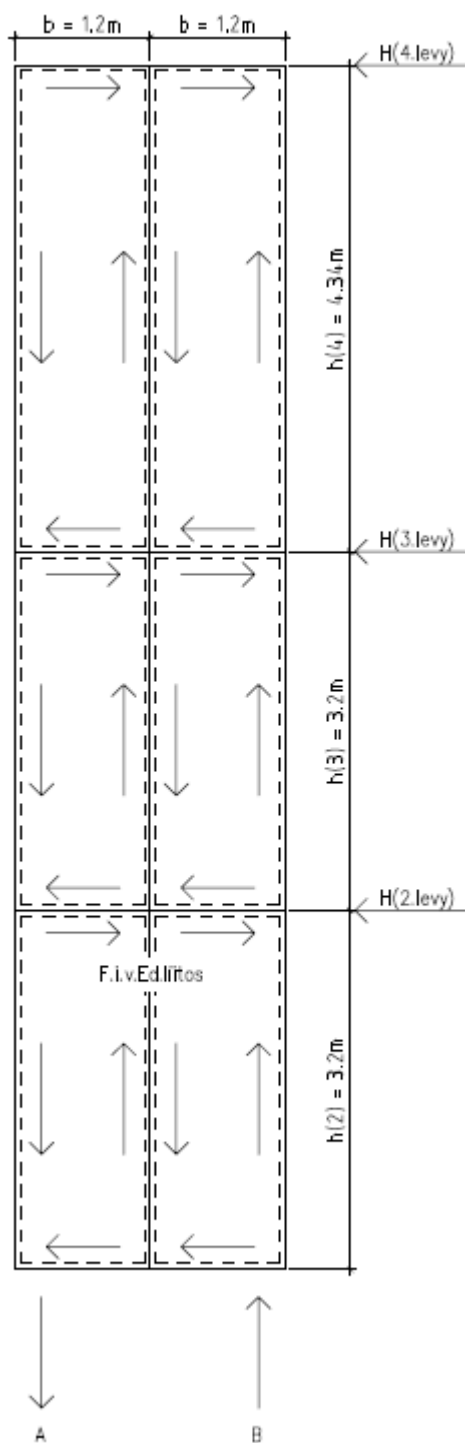
$$b := 1.2\text{m}$$

$$F_{i.v.Ed.liitos} := \frac{(H_{4.levy} + H_{3.levy} + H_{2.levy}) \cdot h \cdot H_2}{b}$$

$$F_{i.v.Ed.liitos} = 31.7 \cdot \text{kN}$$

TAULUKKO 1. Pyöreillä konenauiloilla kootun yksileikkeisen puutavaraliitoksen leikkauskestävyyden mitoitusarvoja (Puuinfo.fi d, 30)

Puutavara	Sahatavara C24 - C30; Liimapuu GL24, GL28c					
	Pysyvä		Keskipitkä		Hetkellinen	
Käyttöluokka	1 ja 2	3	1 ja 2	3	1 ja 2	3
Ø d x L						
Ø 2,1x50	200	170	270	220	360	300
Ø 2,5x60	270	230	360	300	490	410
Ø 2,8x75	330	280	440	360	590	490
Ø 3,1x90	390	330	520	420	710	590
Ø 3,4x100	460	380	610	500	830	680
Ø 3,8x120	550	460	730	600	1000	830
Ø 4,2x130	650	550	870	710	1150	980
Ø 4,6x145	760	640	1050	820	1350	1150
Ø 5,0x160	880	730	1200	950	1600	1350



KUVA 34. Kerroksittain kertyvä vaakavoima levyjen välisessä liitoksessa (Mäklin 2017)

Naulan $\phi 4.6 \times 130$ leikkausvoimakkestävyys hetkellisessä aikaluokassa, käyttöluokassa 3 (taulukko 1)

$$R_{d,\phi 4.6} := 1150\text{N}$$

Naulojen lkm

$$s := \frac{F_{i.v.Ed.liitos}}{R_{d,\phi 4.6}} \quad s = 28$$

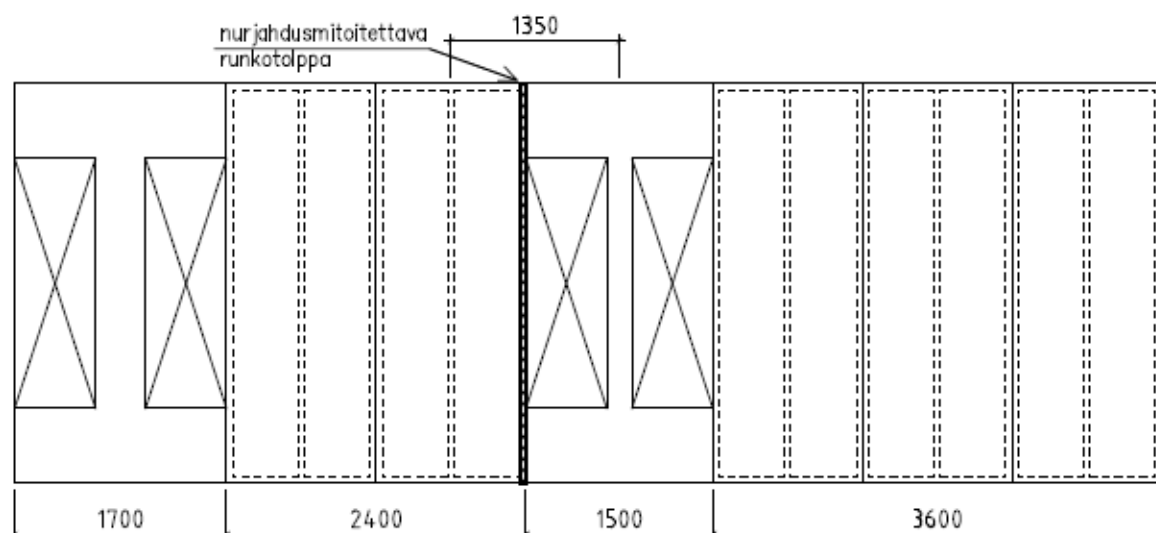
Liitinväli alimmassa kerroksessa

$$\frac{h_{H2}}{s} = 116\text{-mm}$$

Vierekkäiset jäykisteseinälohkot liitetään alimmassa kerroksessa toisiinsa 100 mm välein pyöreillä $4,6 \times 145$ nauloilla.

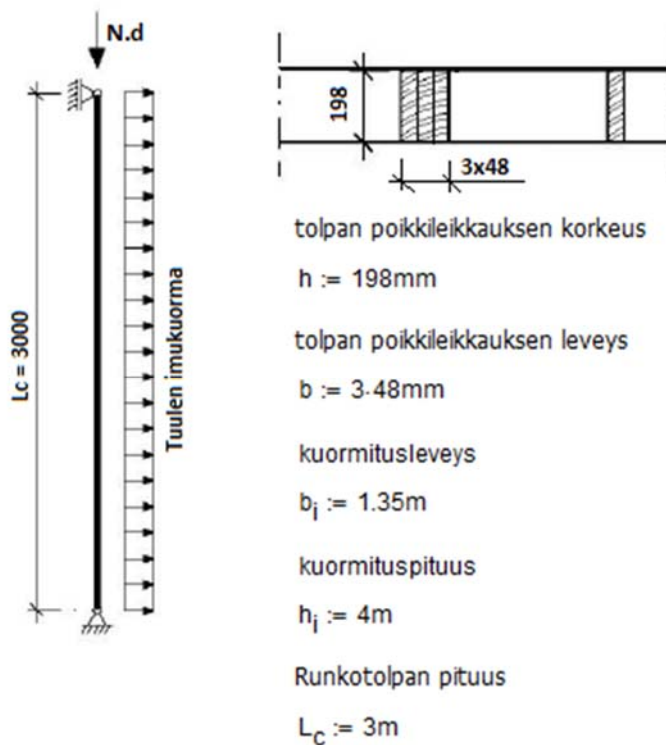
6.2.7 Jäykisteseinän puristuspuolen runkotolpan nurjahduskestävyys

Tarkastellaan ulkoseinällä ikkunan viereisen runkotolpan (kuva 35) nurjahduskestävyyttä. Tuulikuorma kohdistuu rakennuksen pitkää seinää vasten ja aiheuttaa imua päätyseinässä olevasta runkotolpasta poispäin. Tuulen aiheuttamaan puristukseen lisätään rakenteiden omapainosta, hyötykuormista sekä lumesta tuleva kuorma kaikista puurakenteisista kerroksista. Tolppa oletetaan päistään nivelellisesti tuetuksi ja sen heikompi suunta on tuettu nurjahdusta vastaan jäykistelevytyksellä.



KUVA 35. Jäykisteseinä ja puristuspuolen runkotolpan sijainti (Mäklin 2017)

Runkotolpan lähtötiedot



Kuormat

lumikuorma katolla

$$q_{k,1} := 2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

hyötykuorma

$$q_{k,2} := 2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

tuulen nopeuspaine

$$q_k(h) := 0.45 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Pystykuorma tolppalle yläpohjan ja välipohjien sekä ylempien kerrosten ulkoseinien omapainosta

Kuormitusala

$$A_{\text{runkotolppa}} := b_i \cdot h_i$$

$$A_{\text{runkotolppa}} = 5.4 \text{ m}^2$$

Yläpohjan omapaino

$$Y_p := y_{p,\text{rak}} \cdot A_{\text{runkotolppa}}$$

$$Y_p = 7.5 \cdot \text{kN}$$

Välipohjan omapaino

$$V_p := 2v_{p,\text{rak}} \cdot A_{\text{runkotolppa}}$$

$$V_p = 20.5 \cdot \text{kN}$$

Ulkoseinän omapaino kahdesta tolpan yläpuolisesta kerroksesta

$$U_s := u_{s,\text{rak}} \cdot b_i \cdot (h_{H4} + h_{H3})$$

$$U_s = 17.9 \cdot \text{kN}$$

Pystykuorma tolalle rakenteiden omasta painosta yhteensä

$$N_{g,k} := Y_p + V_p + U_s \quad N_{g,k} = 45.9 \text{ kN}$$

Pystykuorma tolalle lumikuormasta

$$N_{q,k,1} := b_j \cdot h_j \cdot q_{k,1} \quad N_{q,k,1} = 10.8 \text{ kN}$$

Pystykuorma tolalle välipohjien hyötykuormasta

$$N_{q,k,2} := 2 \cdot b_j \cdot h_j \cdot q_{k,2} \quad N_{q,k,2} = 21.6 \text{ kN}$$

Runkotolpalle kertyvä pystykuorma + puristuspuolen kuorma (6.2.3 Ankkuroitava voima)

Puristuspuolen kuorma

$$F_{i,t,Ed} = 82.6 \text{ kN}$$

$$K_{FI} := 1.0$$

$$N_d := F_{i,t,Ed} + (1.15 \cdot N_{g,k} + 1.05 \cdot N_{q,k,1} + 1.05 \cdot N_{q,k,2}) \quad N_d = 169.4 \text{ kN}$$

Tolpan taivutusmomentti tuulikuormasta (puuinfo.fi c, 62 mukaan)

Tuulenpaineen nettopaine kerroin seinän keskialueella (käytetään maksimiarvoa)

$$c_{p,net} := 1.4$$

$$M_{w,k} := \frac{c_{p,net} \cdot q_k(h) \cdot b_j \cdot L_c^2}{8} \quad M_{w,k} = 0.96 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Poikkileikkauksen jäyhyys säde y-akselin suhteen

$$i_y := \frac{h}{\sqrt{12}} \quad i_y = 57.2 \text{ mm}$$

, jossa h = sivumitta nurjahduksen suuntaan

Nurjahduspituus z-suunnan nurjahduksessa

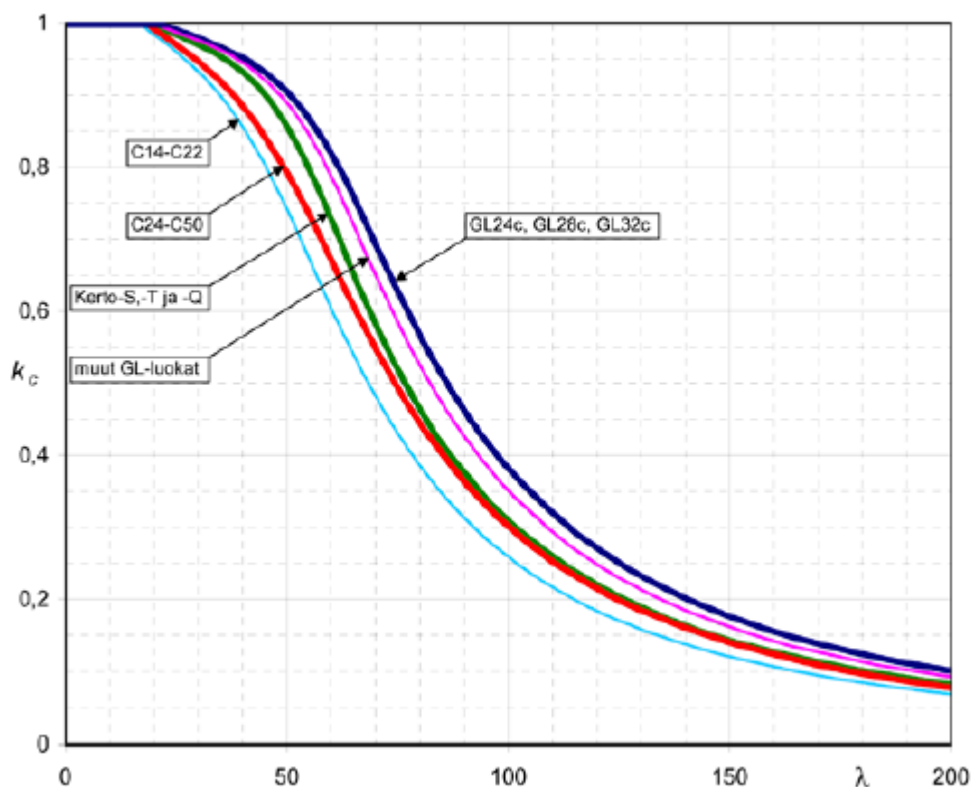
$$L_{c,z} := 1.0 \cdot L_c$$

Poikkileikkauksen vahvemman suunnan hoikkuusluku

$$\lambda_y := \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad \lambda_y = 52.5 \quad (7)$$

Nurjahduskerroin saadaan kuvasta 36

$$k_c := 0.75$$



KUVA 36. Nurjahduskerroin k_c riippuvuus hoikkuudesta λ (Puuinfo.fi d, 27)

Aikavaikutuskerroin

Osavarmuusluku

$$k_{\text{mod}} := 1.1$$

$$\gamma_M := 1.4$$

C24 Sahatavaran puristuslujuus syysuuntaan

$$f_{c.0.k} := 21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Puristusjäännitys

$$\sigma_{c.0.d} := \frac{N_d}{b \cdot h}$$

$$\sigma_{c.0.d} = 5.9 \text{ MPa}$$

Puristuslujuus

$$f_{c.0.d} := \frac{f_{c.0.k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_M}$$

$$f_{c.0.d} = 16.5 \text{ MPa}$$

Maksimi taivutusmomentti tuulesta

$$M_d := 1.5 \cdot M_{w.k}$$

$$M_d = 1.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusjäännitys

$$\sigma_{m.y.d} := \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2}$$

$$\sigma_{m.y.d} = 1.5 \text{ MPa}$$

C24 Sahatavaran taivutuslujuus

$$f_{m,k} := 24 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} := \frac{f_{m,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \quad f_{m,d} = 18.9 \text{ MPa}$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} < 1 \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} = 0.56$$

Kolme runkotolppaa rinnakkain kestää nurjahduksen, käyttöaste on 56 %.

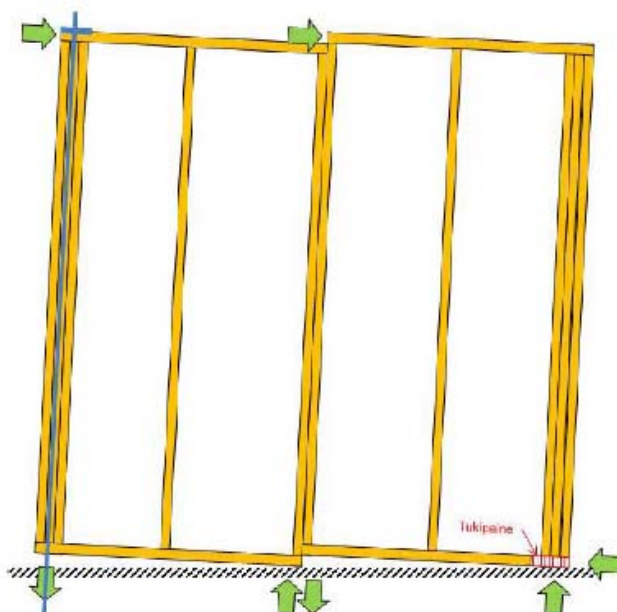
6.2.8 Jäykisteseinän runkotolpan puristuspuolen tukipainekestävyys alaohjauspuussa

Laskussa tarkastetaan, että jäykisteseinän alapuolinen alaohjauspuu kestää runkotolpan sille kohdistaman tukipaineen (kuva 37).

$$N_d = 169.4 \text{ kN}$$

Runkotolppien aiheuttama puristusjännitys alaohjauspuussa

$$\sigma_{c,90,d} := \frac{N_d}{b \cdot h} \quad \sigma_{c,90,d} = 5.9 \text{ MPa}$$



KUVA 37. Tukipaine alaohjauspuussa

C24 Sahatavaran puristuslujuus kohtisuoraan syysuuntaa vasten

$$k_{\text{mod}} := 1.1$$

$$\gamma_M := 1.4$$

$$f_{c,90,k} := 2.5 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{c,90,d} := \frac{f_{c,90,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_M}$$

$$f_{c,90,d} = 1.96 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

k_{c,90} -kerroin, havupuinen sahatavara

$$l_1 > 2 \cdot h$$

$$k_{c,90} := 1.25$$

Tehollinen kosketuspinnan pituus

$$l_{c,90,ef} := 30\text{mm} + b + 30\text{mm}$$

$$l_{c,90,ef} = 204 \text{ mm}$$

Tukipainekerroin

$$k_{c,l} := \frac{l_{c,90,ef}}{b} \cdot k_{c,90}$$

$$k_{c,l} = 1.8$$

(9)

Mitoitusehto

$$\sigma_{c,90,d} < k_{c,l} \cdot f_{c,90,d}$$

$$\sigma_{c,90,d} = 5.9 \cdot \text{MPa} < k_{c,l} \cdot f_{c,90,d} = 3.48 \cdot \text{MPa}$$

Sahatavarasta tehty alaohjauspuu ei kestä runkotolpan aiheuttamaa leimapainetta. Rakenne on suunniteltava uudelleen esimerkiksi joko ohjaamalla runkotolpat suoraan alapuoliseen rakenteeseen tai käyttämällä alaohjauspuuna vahvempaa koivuvaneria.

6.3 CLT-rakenteisen seinän jäykistyskestävyys

Tarkastellaan CLT-rakenteisen jäykistysseinän leikkauskestävyyttä sekä seinän tukipainekestävyyttä ja seinän ankkurointia alustaansa. Huomioidaan yksinkertaistamisen vuoksi päätyseinästä vain reunan 3,6 m leveä, yhtenäinen osuus. Materiaaliominaisuudet vastaavat CrossLam Kuhmo CLT-tuotteen ominaisuuksia (CrossLam.fi b) ja kaavaviittaukset perustuvat CrossLam Kuhmon avoimeen las-kuesimerkkiin jäykistävän seinän kestävydestä (CrossLam.fi a), ellei toisin mainita.

6.3.1 Seinän rakenne

Jäykistävän seinän rakenteeksi valitaan CrossLam Kuhmon 5 lamellinen, 160 mm paksu pystyrakennelevy.

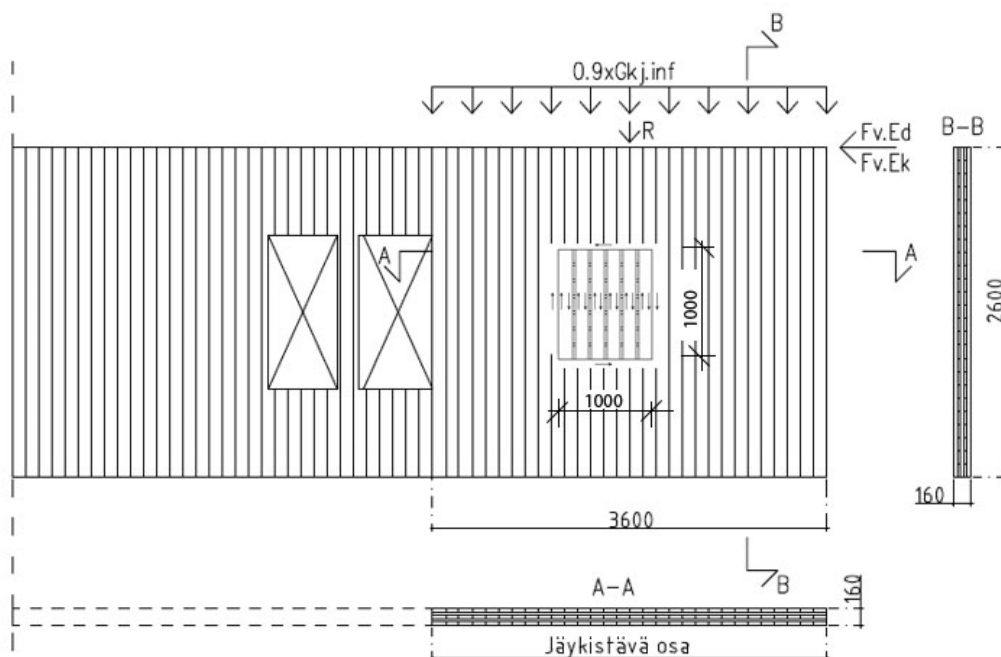
TAULUKKO 2. CLT-levyn materiaaliominaisuudet (CrossLam.fi b, 4; muok. Mäklin 2017)

5-KERROKSISET PYSTYRAKENNELEVYT													
Paksuus	Tyyppi	Kerrokset	Lamellien paksuus ja suunta						$f_{t,k}$	$f_{R,k}$	$f_{R,k}$	Levyrakente	
			L	C	L	C	L	C	L	N/mm ²	0°		90°
mm	tunnus	kpl										poikkileikkaus	
160	C9	5		40	20	40	20	40		2,00	1,10	0,48	

$f_{t,k}$ – levyn leikkauslujuus syrjällään (palkki, jäykistävä seinä jne.)

$f_{R,k} 0^\circ$ – levyn tasoleikkauslujuus, kun levyä taivutetaan pintalamellien suunnassa C (ks. kuva 1)

$f_{R,k} 90^\circ$ – levyn tasoleikkauslujuus, kun levyä taivutetaan pintalamelleja vastaan kohtisuorassa suunnassa L (ks. kuva 1)



KUVA 38. CLT seinän rakenne, leikkaustarkastelualue 1,0 m² ja vaikuttavat voimat (Mäklin 2017)

6.3.2 CLT-seinän leikkauskestävyys

CLT-seinän leikkauskestävyyden selvittämiseksi ei ole yksinkertaista käsinlaskutapaa. Tarkastellaan CLT-seinän leikkauskestävyyttä ensin CrossLam CLT:n laskuesimerkin (CrossLam.fi a, 1-2) ja sen jälkeen Puuinfon Vaativien puurakenteiden suunnittelu -materiaalin (Lahtela 2015) mukaan.

1. CrossLam CLT

Lähtötiedot

Jäykisteen pituus	Jäykistävien seinien pituus huoneiston ulkoseinällä yhteensä	
$L := 3.6\text{m}$	$L_{\text{yht}} := 3.6\text{m} + 2.4\text{m} = 6\text{m}$	
Jäykisteen korkeus	kuormitusala	
$h := 2.6\text{m}$	$b := 4\text{m}$	
CLT-seinän paksuus	CLT-väli­pohjan paksuus	CLT-rakenteen tiheys
$t_{\text{US}} := 160\text{mm}$	$t_{\text{vp}} := 200\text{mm}$	$\text{rak}_{\text{CLT}} := 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
Yläpohjan paino		
$\text{yp}_{\text{rak}} = 1.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$		

Lasketaan jäykisteseinälle kohdistuva tuulikuorma kohdan 6.2.2 Vaakakuormat (Kerroskohtainen tuulikuorma) resultanttien avulla.

4. kerros

$$H_{4,\text{CLT}} := H_4 \cdot \frac{L}{L_{\text{yht}}} \quad H_{4,\text{CLT}} = 9.3 \text{ kN}$$

3. kerros

$$H_{3,\text{CLT}} := H_3 \cdot \frac{L}{L_{\text{yht}}} \quad H_{3,\text{CLT}} = 6.9 \text{ kN}$$

2. kerros

$$H_{2,\text{CLT}} := H_2 \cdot \frac{L}{L_{\text{yht}}} \quad H_{2,\text{CLT}} = 6.9 \text{ kN}$$

Lasketaan rakenteiden vinoudesta aiheutuva lisävaakavoima ensin koko huoneiston osalta ja jaetaan sitten reunimmaiselle 3,6 m osuudelle.

Huoneiston pituus

$$L_{\text{huon}} := 3.6\text{m} + 1.5\text{m} + 2.4\text{m} + 1.7\text{m}$$

$$L_{\text{huon}} = 9.2\text{ m}$$

Lisävaakavoima koko huoneiston osalta

$$N_{4.\text{CLT.huon}} := \frac{\text{rak}_{\text{CLT}} \cdot t_{\text{us}} \cdot L_{\text{huon}} \cdot h + \gamma_{\text{rak}} \cdot L_{\text{huon}} \cdot b}{150} \quad N_{4.\text{CLT.huon}} = 0.5\text{ kN}$$

$$N_{3.\text{CLT.huon}} := \frac{\text{rak}_{\text{CLT}} \cdot t_{\text{us}} \cdot L_{\text{huon}} \cdot h + \text{rak}_{\text{CLT}} \cdot t_{\text{vp}} \cdot L_{\text{huon}} \cdot b}{150} \quad N_{3.\text{CLT.huon}} = 0.4\text{ kN}$$

$$N_{2.\text{CLT.huon}} := \frac{\text{rak}_{\text{CLT}} \cdot t_{\text{us}} \cdot L_{\text{huon}} \cdot h + \text{rak}_{\text{CLT}} \cdot t_{\text{vp}} \cdot L_{\text{huon}} \cdot b}{150} \quad N_{2.\text{CLT.huon}} = 0.4\text{ kN}$$

Lisävaakavoima laskettavan jäykisteen matkalla

$$N_{4.\text{CLT}} := N_{4.\text{CLT.huon}} \cdot \frac{L}{L_{\text{yht}}} \quad N_{4.\text{CLT}} = 0.3\text{ kN}$$

$$N_{3.\text{CLT}} := N_{3.\text{CLT.huon}} \cdot \frac{L}{L_{\text{yht}}} \quad N_{3.\text{CLT}} = 0.2\text{ kN}$$

$$N_{2.\text{CLT}} := N_{2.\text{CLT.huon}} \cdot \frac{L}{L_{\text{yht}}} \quad N_{2.\text{CLT}} = 0.2\text{ kN}$$

Seinälle kohdistuva vaakavoima käyttörajatilassa

$$F_{\text{v.Ek}} := H_{4.\text{CLT}} + H_{3.\text{CLT}} + H_{2.\text{CLT}} + 0.9(N_{4.\text{CLT}} + N_{3.\text{CLT}} + N_{2.\text{CLT}})$$

$$F_{\text{v.Ek}} = 23.7\text{ kN}$$

Seinälle kohdistuva vaakavoima murtorajatilassa

$$F_{\text{v.Ed}} := 1.5H_{4.\text{CLT}} + 1.5H_{3.\text{CLT}} + 1.5H_{2.\text{CLT}} + 0.9 \cdot (N_{4.\text{CLT}} + N_{3.\text{CLT}} + N_{2.\text{CLT}})$$

$$F_{\text{v.Ed}} = 35.2\text{ kN}$$

Laskuesimerkissä leikkausjännitys lasketaan bruttopoikkileikkauksen avulla taivutetun palkin leikkausjännityksen kaavalla.

Jäykisteen poikkileikkauksala

$$A_{\text{CLT}} := k_{\text{cr}} \cdot t_{\text{us}} \cdot L \quad A_{\text{CLT}} = 5.8 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2 \quad (10)$$

Halkeilukerroin

$$k_{\text{cr}} := 1.0$$

Leikkausjännitys (kuva 39)

$$\tau_{\text{d}} := \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{\text{v.Ed}}}{A_{\text{CLT}}} \quad \tau_{\text{d}} = 0.09 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Hetkellinen aikaluokka

$$k_{\text{mod}} := 1.1$$

Materiaalin osavarmuusluku

$$\gamma_{\text{M}} := 1.25$$

Leikkauslujuus syrjällään

$$f_{\text{v.k}} := 2.0 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Leikkauskestävyys

$$f_{\text{v.d}} := \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_{\text{M}}} \cdot f_{\text{v.k}} \quad f_{\text{v.d}} = 1.76 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Mitoitusehto

$$f_{\text{v.d}} = 1.76 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} > \tau_{\text{d}} = 0.09 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau_{\text{d}}}{f_{\text{v.d}}} \cdot 100 = 5.2$$

2. Puuinfo, Vaativien puurakenteiden koulutusmateriaali

Laskelmassa tarkastellaan 1,0 m² :n kokoista CLT-levyn osaa. Laskuesimerkin materiaaliominaisuudet ja kaavat ovat peräisin Vaativien puurakenteiden suunnittelu -koulutusmateriaalista (Lahtela 2015). Lamellien syrjäliimauksen ei oleteta siirtävän leikkausvoimaa lamellilta toiselle ja leikkausjännitys (kuvat 38 ja 39) lasketaan vain vaakalamellien osalle puhtaana leikkauksena.

Vaakalamellien yhteenlaskettu paksuus

$$t_{\text{ef}} := 20\text{mm} + 20\text{mm} \quad t_{\text{ef}} = 40\text{mm}$$

$$A_{\text{netto}} := t_{\text{ef}} \cdot 1 \cdot \text{m} \quad A_{\text{netto}} = 4 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

Seinän pituus

$$L_S := 3.6 \text{m}$$

$$V_d := \frac{F_{v,Ed}}{L_S} \cdot 1 \cdot \text{m} \quad V_d = 9.8 \cdot \text{kN}$$

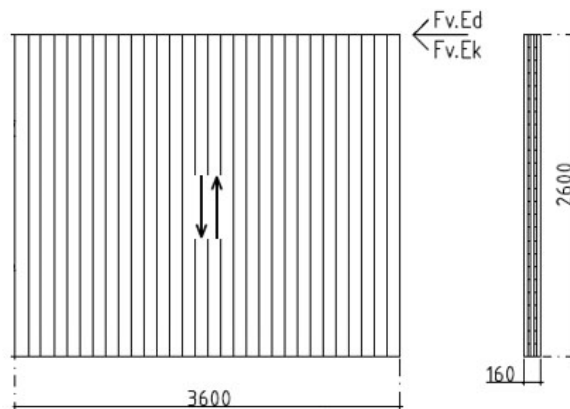
Leikkausjännitys (kuvat 38 ja 39)

$$\tau_d := \frac{V_d}{A_{\text{netto}}} \quad \tau_d = 0.24 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Lamellin leikkauslujuus kohtisuoraan syysuuntaa vastaan

$$f_{v,\text{net},k} := 8.0 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{v,d} := \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \cdot f_{v,\text{net},k} \quad f_{v,d} = 7.04 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



KUVA 39. Leikkausjännitys Puuinfon esimerkin mukaan (ks. myös kuva 38) (Mäklin 2017)

Mitoitusehto

$$f_{v,d} = 7.04 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} > \tau_d = 0.24 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \cdot 100 = 3.5$$

Sekä CrossLam Kuhmon, että Vaativien puurakenteiden suunnittelu -koulutusmateriaalin laskujen mukaan seinä kestää sille kohdistuvan leikkausrasituksen.

6.3.3 CLT-seinän puristus 1. kerroksen betonilaattaa vasten

Tarkastellaan seinän paikallista puristuskestävyyttä tukireaktiolle B. Määritetään puristusalueen leveys x (kuva 41) ulkoisten kuormien ja seinän mittojen perusteella (kuva 40).

Tukipinnan kestävyyttä mitoitettaessa vain pystysuuntaiset lamellit huomioidaan.

Pystysuuntaisten lamellien yhteenlaskettu paksuus

$$t_{ef} := 40\text{mm} + 40\text{mm} + 40\text{mm} \qquad t_{ef} = 120\text{ mm}$$

Jäykisteen pituus

$$L := 3.6\text{m}$$

Jäykisteen korkeus

$$h = 2.6\text{ m}$$

Kuormitusleveys

$$b := 4\text{m}$$

Seinälle kohdistuva kuormitus:

$$F_{v,Ed} = 35.2 \cdot \text{kN}$$

Yläpohjarakenteen paino rankarakenteisesta tarkastelusta

$$y_{p,rak} = 1.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \qquad y_p := y_{p,rak} \cdot b = 5.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

CLT-rakenteisen 160mm leveän ulkoseinän paino kahdelta ylimmältä kerrokselta

$$u_s := \text{rak}_{CLT} \cdot t_{us} \cdot (h \cdot 2) \qquad u_s = 4.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

CLT-rakenteisen 200mm paksun välipohjan paino

$$v_p := \text{rak}_{CLT} \cdot t_{vp} \cdot b \cdot 2 \qquad v_p = 8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$G_{kj,inf} := y_p + u_s + v_p \qquad G_{kj,inf} = 17.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pystykuorman resultantti

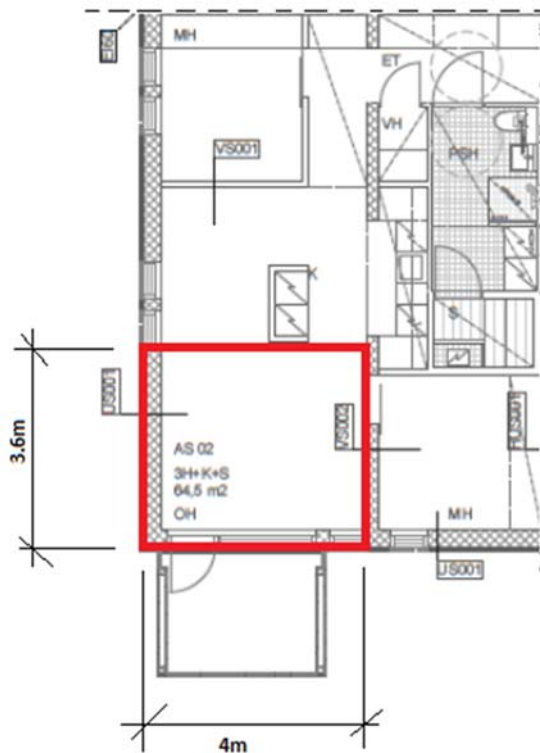
$$R := 0.9 G_{kj,inf} \cdot L \qquad R = 57.4 \cdot \text{kN}$$

Hetkellinen aikaluokka

$$k_{mod} := 1.1$$

CLT:n materiaaliosavarmuusluku

$$\gamma_M := 1.25$$



KUVA 40. Tasaisen pystykuorman kuormitusalue (Puuinfo.fi e, 2; muok. Mäklin 2017)

CrossLam Kuhmo CLT lamellin puristuslujuus

$$f_{c.0.k} := 21 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{c.0.d} := \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \cdot f_{c.0.k}$$

$$f_{c.0.d} = 18.5 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Selvitetään puristuspuunnan leveys x tukireaktiolle B

$$x := \frac{\frac{F_v \cdot E_d \cdot h}{\left(L - \frac{x}{3}\right)} + \frac{R \cdot \frac{L}{2}}{\left(L - \frac{x}{3}\right)}}{0.5 \cdot f_{c.0.d} \cdot t_{\text{ef}}}$$

(13)

$$x = \frac{\frac{35200 \cdot 2600}{3600 - \frac{x}{3}} + \frac{57410 \cdot \frac{3600}{2}}{3600 - \frac{x}{3}}}{0.5 \cdot 18.5 \cdot 120} \rightarrow x = \frac{\frac{9.152 \cdot 10^7}{3600 - \frac{x}{3}} + \frac{1.033 \cdot 10^8}{3600 - \frac{x}{3}}}{1100}$$

$$1100x = \frac{1.949 \cdot 10^8}{3600 - \frac{x}{3}} \rightarrow \left(3600 - \frac{x}{3}\right) \cdot 1100x = 1.949 \cdot 10^8$$

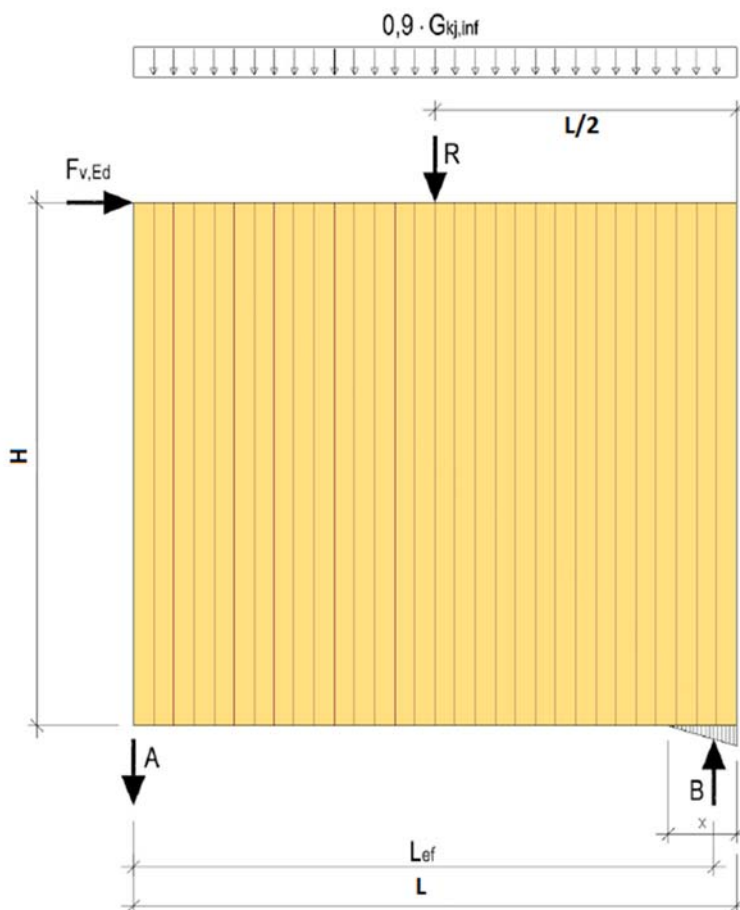
$$-366.67x^2 + 3.96 \cdot 10^6 \cdot x - 1.949 \cdot 10^8$$

$$a := -366.7 \quad b := 3.96 \cdot 10^6 \quad c := -1.949 \cdot 10^8$$

$$x := \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

$$x = 49.4$$

Tuen B tukipainekestävyys



KUVA 41. Puristuspinnan x leveys (CrossLam.fi a, 3; muok. Mäklin 2017)

Puristuspinnan leveys (kuva 41)

$$x := 49.4 \text{ mm}$$

Tukireaktioiden A ja B välinen etäisyys

$$L_{\text{ef}} := L - \frac{x}{3}$$

$$L_{\text{ef}} = 3.58 \text{ m}$$

(14)

$$B := \frac{F_{v,Ed} \cdot h}{L_{ef}} + \frac{R \cdot \frac{L}{2}}{L_{ef}} \quad B = 54.4 \text{ kN} \quad (15)$$

Tuen B tukipainejännitys

$$f_{c,d,mean} := \frac{B}{0.5 \cdot t_{ef} \cdot x} \quad f_{c,d,mean} = 18.3 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (16)$$

Mitoitusehto

$$f_{c,d,mean} = 18.3 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} < f_{c,0,d} = 18.5 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

CLT seinän pystylamellit kestävät paineen aiheuttaman puristusjännityksen tuella B. Paikallinen puristuskestävyys tulee tarkastaa tarvittaessa myös alustassa.

6.3.4 CLT-seinän ankkurointi alustaan

$$A := B - R$$

$$A = -3 \text{ kN}$$

Tukea A ei tarvitse ankkuroida pystyreaktiolle alustaansa. Jäykistävä CLT seinä tulee kiinnittää alustaansa vaakavoimalle $F_{v,Ed}$ niin, että seinä ei pääse liukumaan vaakasuunnassa. CrossLam Kuhmon (CrossLam.fi a, 4) mukaan ankkurointi tehdään tarvittaessa teräsrakenteisilla liitoksilla (kuva 42). Liitinten kestävyys lisäksi CLT-levystä tulee tarkastaa levyn palalohkeamismurtokestävyys sekä lohkeamismurtokestävyys.



KUVA 42. CLT-seinän ankkurointi alustaan (CrossLam.fi a, 4)

7 POHDINTA

Puukerrostalojen rakentaminen on aiheena ajankohtainen ja hyvin mielenkiintoinen. Rakennesuunnittelijalta puukerrostalojen rakentaminen vaatii aivan uudenlaista asiantuntemusta ja tämän maailman raottuminen opinnäytetyön tekemisen aikana on ollut inspiroivaa. Samalla mitoitusesimerkkien laskeminen on antanut erinomaista varmuutta rakennesuunnittelun perusrutiineihin.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä läpileikkaus puurakentamiseen ja puukerrostaloihin Suomessa, sekä paneutua puukerrostalon jäykistysmitoitukseen. Aiheen ajankohtaisuuden vuoksi ajantasaista tietoa oli saatavilla varsin runsaasti ja teoriaosuuteen tietoa olisi ollut enemmänkin. Puukerrostaloista olisi ehdottomasti mielenkiintoista lukea teoriapainotteisia opinnäytetöitä liittyen esimerkiksi rakennusliikkeiden sekä rakennustyömaan kokemuksiin puukerrostalon rakentamisesta. Ammattikorkeakoulusta valmistuvan rakennesuunnittelijan näkökulmasta aihe on kovin laaja ja puukerrostalon rakennesuunnittelijalta vaaditaan AA-pätevyyttä. Kaikkiaan puukerrostalon rakennesuunnittelun hallitseminen vaatisi lisää opintoja ja suurempaa asiantuntemusta tai aiheen pilkkomista selkeisiin, pieniin osiin. Työtä tehdessä kävi selväksi, että esimerkiksi vaakajäykisteiden jäykkyyden, liittossiirtymien sekä kuormien epätasaisen jakautumisen huomioiminen vaikuttaa ilmeisen huomattavasti jäykistysmitoitukseen. Mitoituksen apuna käytetäänkin todellisuudessa mallintamista, jonka huomioiminen opinnäytetyössä voisi olla jatkotutkimuksen aihe. Hyvän ja todellisuutta vastaavan mallin tekeminen vaatisi kuitenkin fem-mallinnukseen paneutumista laajemminkin. Puukerrostaloista ei kuitenkaan ole vielä juurikaan tehty opinnäytetöitä rakennesuunnittelun näkökulmasta, joten aiheena tämä puolusti paikkaansa erinomaisen hyvin. Jatkossa palomääräysten muuttuminen tulee tuomaan muutoksia puukerrostalojen rakenteisiin ja aihetta voisi tarkastella myös siitä näkökulmasta.

Työn tekeminen osittain toiselta paikkakunnalta käsin ja kokopäiväisen rakennesuunnittelijan työn ohella on ollut haastavaa. Koen kuitenkin onnistuneeni työn tekemisessä hyvin ja uskon että työ palvelee erityisesti insinööriopiskelijoita mahdollisten aihetta koskevien harjoitustöiden tukena.

LÄHTEET

Clt.info.fi [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://www.clt.info/fi/>

Clt.info.fi. CLT - Cross Laminated Timber [digikuva]. [viitattu 15.9.2015]. Saatavissa: <http://www.clt.info/fi/tuote/>

CrossLam.fi [verkkoaineisto]. Saatavissa: www.crosslam.fi

CrossLam.fi a. Jäykistävän seinän kestävyys [verkkoaineisto]. [viitattu 5.4.2017]. Saatavissa: <http://www.crosslam.fi/tekniset-maarittelyt/rakenteet-ja-esimerkkilaskelmat.html>

CrossLam.fi b. Tuoteominaisuudet - Osa 1 [verkkoaineisto]. [viitattu 5.4.2017]. Saatavissa: <http://www.crosslam.fi/tekniset-maarittelyt/tuotteen-ominaisuudet.html>

EUROKOODI 5: PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELU. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. SFS-EN 1995-1-1 [viitattu 1.5.2017] Helsinki: Suomen Standardoimisliitto. Saatavissa: <http://www.eurocodes.fi/1995/Contents1995.htm>

EUROKOODI HELP DESK [verkkoaineisto]. [viitattu 19.3.2017]. Saatavissa: <http://www.eurocodes.fi>

KOISO-KANTTILA, Jouni. 2000. Puinen kerrostalo. Julkaisussa: E. Paloheimo (toim.) Metsä ja puu IV: - Puinen rakennus. Helsinki: Rakennustieto Oy, 106-131.

LAHTELA, Tero. 2015. Puuinfo. Vaativien puurakenteiden suunnittelu –koulutus 2015. Materiaali [viitattu 5.4.2017]

LUNDSTEN, Bengt. 2000. Varhaiset puurakennukset. Julkaisussa: E. Paloheimo (toim.) Metsä ja puu IV: - Puinen rakennus. Helsinki: Rakennustieto Oy, 8-33.

LUNTTA, Jarkko. 2013. Diplomityö: Ristiinliimattu massiivipuulevykenttä rungon vaakakuormia siirtävänä rakenteena. Espoo: Aalto-Yliopisto

MAANKÄYTTÖ- JA RAKENNUSLAKI. 1999/132 [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

Metsäyhdistys.fi. Insinööripuutuotteet (Engineered Wood Products) [verkkoaineisto]. [viitattu 15.9.2015]. Saatavissa: <http://www.smy.fi/sanasto/insinooripuutuotteet-engineered-wood-product/>

Metsäwood.fi. Sahatavara [digikuva]. [viitattu 15.9.2015]. Saatavissa: <http://www.metsawood.com/fi/tuotteet/Sahatavara/Pages/Sahatavara.aspx>

Puuinfo.fi [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://puuinfo.fi>

Puuinfo.fi a. Avoin puurakennusjärjestelmä - suunnitteluperusteet [verkkoaineisto]. [viitattu 28.9.2015]. Saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/avoin-puurakennusjarjestelma-suunnitteluperusteet/suunnitteluperusteetkokoohe.pdf>

Puuinfo.fi b. Liimapuukäsikirja - Osa 1 [verkkoaineisto]. [viitattu 15.9.2015]. Saatavissa:

http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuu_low.pdf

Puuinfo.fi c. EC5 Sovelluslaskelmat - Asuinrakennus [verkkoaineisto]. [viitattu 5.4.2017]. Saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/eurokoodit/ec5-sovelluslaskelmat-asuinrakennus>

Puuinfo.fi d. Eurokoodi 5 Lyhennetty suunnitteluohje – kolmas, korjattu painos [verkkoaineisto].

[viitattu 5.4.2017]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/eurokoodit/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu>

1§

Puuinfo.fi e. Mallikerrostalo, rakennuslupapaperustukset [verkkoaineisto]. [viitattu 5.4.2017].

Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkopes-20>

Polku: RunkoPes 2.0. Rakennuslupapaperustukset.

Puuinfo.fi f. Puukerrostalo [verkkoaineisto]. [viitattu 24.9.2015]. Saatavissa:

<http://puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/puukerrostalo/215937puuinfokerrostalo.pdf>

Puuinfo.fi g. P2 -paloluokan max 4 krs asuin- ja työpaikkarakennuksen rakennetyypit

[verkkoaineisto]. [viitattu 5.4.2017]. Saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/suunnitteluty%C3%B6kalut/p2-paloluokan-max-4-krs-asuin-ja-ty%C3%B6paikkarakennuksen-rakennetyypit>

PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELU. RIL 205-1-2017. (Koottu: EN 1995-1-1). Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

RAKENNUSTEN ENERGIATEHOKKUUS. Suomen Rakentamismääräyskokoelma D3. 2012. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. [viitattu 28.9.2015].

Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf

RAKENNUSTEN PALOTURVALLISUUS. Suomen Rakentamismääräyskokoelma E1. 2011. Määräykset ja ohjeet 2011. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. [viitattu 30.9.2015].

Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37126-E1_2011-fi.pdf

SIIKANEN, Unto. 2008. Puurakentaminen. Tampere: Rakennustieto Oy.

Stora Enso.fi. CLT - Massiivipuुरakentaminen [verkkoaineisto]. [viitattu 15.9.2015]. Saatavissa: <http://www.clt.info/fi/produkt/clt-das-massivholz/>

SUMKIN, Hemmo. 2015-05-24. Eurokoodit, rakennesuunnittelun hyvä työkalu [verkkodokumentti]. [Viitattu 19.3.2017]. Saatavissa: <http://www.rakennuslehti.fi/blogit/eurokoodit-rakennesuunnittelun-hyva-tyokalu/>

TOLPPANEN, J., KARJALAINEN, M., LAHTELA, T. ja VILKAJAINEN, M. 2013. Suomalainen puukerrostalo – Rakenteet, suunnittelu ja rakentaminen. Tampere: Juvenes Print – Suomen Yliopistopaino Oy.

Ympäristöministeriö.fi. Mitä on kestävä kehitys [verkkoaineisto]. [viitattu 24.9.2015]. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/fi-fi/ymparisto/kestava_kehitys/Mita_on_kestava_kehitys

ÄÄNENERISTYS JA MELUNTORJUNTA RAKENNUKSESSA. Suomen Rakentamismääräyskokoelma C1. 1998. Määräykset ja ohjeet 1998. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. [viitattu 28.9.2015]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/1917-c1.pdf>