

KEVYTRAKENTEISEN VÄLIPOHJAKENTÄN PRIMÄÄRIPALKKIEN TARKASTELU

Värähtelyn käyttörajatilamitoitus



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Hämeenlinna, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri

kevät, 2020

Rita Kukkasniemi

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri
Hämeenlinna

Tekijä	Rita Kukkasniemi	Vuosi 2020
Työn nimi	Kevytrakenteisen välipohjacentän primääripalkkien tarkastelu	
Työn ohjaajat	Ville Pulkinen, lehtori Juha Kotiranta, Ideastuctura Oy	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tilaaja oli Ideastuctura Oy. Työn tavoitteena oli tutkia erilaisia palkkivaihtoehtoja CLT-elementeillä toteuttaviin välipohjiin, joissa on pitkät jännevälit. Aihe tuli puurakenteisesta koulu-/päiväkotikohteesta, jossa puupalkin poikkileikkaus primääripalkkina oli liian suuri, sillä talotekniikkaa viedään paljon välipohjissa ja puupalkkien rei'itys on rajallista. Tärkeää tutkittavissa vaihtoehtoisissa oli, että ne saadaan asennettua kuiva-asennuksina ilman betonia.

Työssä käsiteltiin kuitenkin myös erilaisia puupalkkeja, sillä niilläkin saadaan kohtalaisen pitkiä jännevälejä. Toisena tärkeänä vaihtoehtona käsiteltiin teräspalkkeja. Palkkeihin liittyen tutkittiin myös rakenteille tulevia palonkestovaatimuksia ja eri palonsuojausmenetelmiä. Työssä käsiteltiin myös liitoksia ja eri tapoja tehdä liitokset.

Työssä esitettiin värähtelymitoituksella saatuja poikkileikkauksia muutamalla erilaisella palkkivaihtoehdolla. Puurakenteisissa välipohjissa värähtelymitoitus on usein mitoitettavinta, kuten myös teräsrakenteisissa, sillä ihmiset ovat todella herkkiä värähtelylle. Tämän takia, ja aiheen rajaamiseksi, työssä käsiteltiin vain värähtelymitoitusta. Työhön tehtiin mitoitus myös yhdistetylle värähtelylle, jota Eurokoodi 5 ei vaadi. Tämä mitoitus oli haluttu esimerkkikohteeseen ja siksi se tehtiin tähän. Yhdistetyn värähtelyn mitoitus osoittautui vaadittua värähtelymitoitusta määräävämmäksi.

Teräspalkit ovat hyvä vaihtoehto puurakenteisiin kohteisiin, joihin ei haluta betonia. Niillä saadaan pitkiäkin jännevälejä ilman, että alapuolinen huonekorkeus laskee liikaa, vaikka välipohjassa viedään talotekniikkaa.

Avainsanat Primääripalkit, puurakenteinen, välipohja, värähtely

Sivut 67 sivua, joista liitteitä 13 sivua

Degree Programme in Construction and Civil Engineering
Hämeenlinna University Centre

Author	Rita Kukkasniemi	Year 2020
Subject	Primary beams used in a lightweight intermediate floor	
Supervisors	Ville Pulkkinen, lecturer Juha Kotiranta, Ideestructura Oy	

ABSTRACT

This Bachelor's thesis was commissioned by Ideestructura Oy. The purpose of the thesis was to examine various primary beams in intermediate floors made of CLT-elements with long spans. The target building was a timber structure school/day care center, where the cross-section of timber beam was too large. This was due to the building services installed in intermediate floor and the perforation of timber beams being limited. One important thing about the alternative beams to be examined was that they must be able to be install as dry installation without concrete.

Various timber beams were discussed, as they also provide moderately long spans. Another important option is steel beams which were also discussed. In addition, fire resistance requirements for the structures and various fire protection methods were discussed including connections and different ways of making them.

The cross-section sizes for a few different beam options obtained by vibration sizing were presented. In timber floors, vibration sizing is often the most determining factor. This also applies to steel structures, as people are very sensitive to vibration. For this reason, and to limit the scope of the thesis, only vibration sizing was discussed. The combined vibration of the primary and secondary beams not required by the Eurocode 5, was also included the thesis. Dimensioning of the combined vibration proved to be more dominant than the required vibration sizing.

Steel beams are also a good option for timber structures when concrete is not wanted. With them it is possible to get long spans, without the room height dropping too much.

Keywords Primary beams, timber structure, intermediate floor, vibration

Pages 67 pages including appendices 13 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	PRIMÄÄRIPALKKIEN VALINTA.....	2
2.1	Teräsprofiilit.....	2
2.1.1	Rakenneterästen merkinnät.....	2
2.1.2	Lujuus- ja laatuluokat.....	4
2.1.3	Kuumavalssatut profiilit.....	5
2.1.4	Hitsatut profiilit.....	6
2.1.5	Poikkileikkauksen valinta.....	7
2.1.6	Jännevälit.....	7
2.2	Puupalkit.....	8
2.2.1	Liimapuu (GLT).....	8
2.2.2	Viilupuu (LVL).....	11
2.2.3	Monikerroslevy (CLT).....	13
2.2.4	Rei'itys.....	14
2.3	Liittopalkit.....	17
2.3.1	Deltapalkki.....	17
2.3.2	A-palkki.....	18
3	MITOITUS.....	19
3.1	Yleistä värähtelystä.....	20
3.2	Värähtelymitoitus.....	21
3.2.1	Yhdistetty värähtely.....	23
3.2.2	Yksinkertaistettu värähtelymitoitus.....	24
3.2.3	Värähtelymitoitus taipuman kautta.....	25
3.3	Teräsprofiilit.....	26
3.4	Puupalkit.....	27
4	PALOSUOJAUS.....	28
4.1	Paloluokat.....	28
4.2	Palonkestovaatimukset.....	29
4.3	Rakennustarvikkeiden luokat.....	31
4.4	Pintojen vaatimukset.....	33
4.5	Teräsprofiilit.....	34
4.5.1	Palosuojamaalaus ja -ruiskutus.....	35
4.5.2	Palosuojalevytyt.....	36
4.6	Puupalkit.....	37
4.6.1	Puun palosuojausmenetelmät.....	39
4.6.2	Stabiilius palotilanteessa.....	40
5	LIITOKSET.....	40
5.1	Teräsprofiilit.....	41
5.1.1	Liitosten huomiointi kokonaistarkastelussa.....	42
5.1.2	Liitosten kestävyys ja kiepahdus.....	42

5.2	Puupalkit.....	43
5.2.1	Metalliset liittimet ja lohkeamismurtuminen	43
5.2.2	Naula- ja ruuviliitokset.....	44
5.2.3	Erilaisia teräksisiä liittimiä	45
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	47
7	POHDINTA.....	49
	LÄHTEET	51

Liitteet

Liite 1	Liimapuupalkin GL30c värähtelymitoitus
Liite 2	HEA-palkin värähtelymitoitus
Liite 3	WQ-palkin värähtelymitoitus
Liite 4	Liimapuupalkin liitos kantavaan seinään
Liite 5	Liimapuupalkin liitos CLT-elementtiin
Liite 6	HEA-palkin liitos kantavaan seinään
Liite 7	HEA-palkin liitos CLT-elementtiin
Liite 8	WQ-palkin liitos kantavaan seinään
Liite 9	WQ-palkin liitos CLT-elementtiin

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tilaaja oli Ideestructura Oy. Opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia erilaisia puuvälipohjaa kannattelevia palkkivaihtoehtoja. Puurakentamisessa tulee vastaan kohteita, joihin halutaan muuntojoustavuutta, jolloin välipohjan jännevälit kasvavat pitkiksi.

Opinnäytetyön aihe tuli puurakenteisesta koulu-/päiväkotikohteesta, johon haluttiin muuntojoustavuutta, ja siitä johtuen välipohjan jännevälit olivat pitkiä. Tällaisessa kohteessa myös hyötykuormat ovat suurempia johtuen käyttötarkoituksesta, joten välipohjan primääripalkeiksi oli mietittävä myös muita vaihtoehtoja kuin puuta, vaadittavan poikkileikkauskoon takia. Tässä työssä tätä kohdetta käytettiin esimerkkinä.

Pitkillä jänneväleillä puupalkkien poikkileikkauskoko voi kasvaa niin suureksi, että talotekniikan vienti sen alapuolella ei ole mahdollista alapuolisen huonekorkeuden takia. Tämä ongelma koskee lähinnä julkisia rakennuksia, esimerkiksi juuri kouluja ja päiväkoteja, joihin halutaan muuntojoustavuutta eikä niihin voida sen takia laittaa kantavia väliseiniä samalla lailla kuin asuinrakennuksiin.

Opinnäytetyössä on myös puupalkkien rei'itys ohje. Suurilla poikkileikkauksilla rei'itys voi olla ainut vaihtoehto talotekniikan viemiselle välipohjassa. Reikien sijainti, koko ja määrä voivat kuitenkin rajoittaa talotekniikan läpivientejä. Reikien mitoittamiseen käytettävä laskentaohje löytyy ympäristöministeriön kansallisesta liitteestä. Reikien mitoitusohje on myös Liimapuukäsikirjan osassa 3, jossa ehdotetaan, että tehtävien reikien kokoa voisi suurentaa.

Tässä opinnäytetyössä ei käsitelty palkin mitoittamista muulta kuin värähtelyn osalta, koska se on yleensä selkeästi mitoittavin ja voi suurentaa palkin poikkileikkausta huomattavasti lujusmitoituksella saatuaan verrattuna. Työhön otettiin mukaan myös yhdistetty värähtely, sillä vaikka Eurokoodi ei sitä vaadi, se oli esimerkkikohteeseen haluttu. Kohteessa sekundaaripalkkina toimivat CLT-elementit. Opinnäytetyö keskittyy pääasiassa teräs- ja puupalkkeihin, mutta myös liittopalkit haluttiin lisätä työhön. Liittopalkkeja käsiteltiin vain lyhyesti, koska ne vaatisivat pintavalun, ja esimerkkikohteessa välipohjassa ei sellaista ole. Tutkittavat ratkaisut pitää pystyä toteuttamaan kuiva-asennuksilla.

Työhön tehtiin liitteeksi muutama esimerkkikuva palkkien liitoksista. Kaikesta palkeista ei mallia ole, mutta esimerkit tehtiin parista teräspalkista ja yhdestä puupalkista. Samoista palkeista tehtiin värähtelymitoitus.

2 PRIMÄÄRIPALKKIEN VALINTA

Tässä sekundaaripalkkina käytetään CLT elementtejä. Välipohjarakenteseen ei tule pintavalua, joten primääri- ja sekundaaripalkkien liitokset on pystyttävä toteuttamaan kuiva-asennuksina. Koko rakennus tehdään puurunkoisena, ja myös se vaikuttaa primääripalkkien valintaan.

Betonipalkkeja ei tässä opinnäytetyössä käsitellä, sillä esimerkkikohde on haluttu toteuttaa ilman betonia. Lisäksi betonipalkit voivat usein olla liian painavia tuettavaksi puupilareilla.

2.1 Teräsprofiilit

Teräspalkit ovat tällaisessa tilanteessa hyvä vaihtoehto, kun puupalkit eivät pitkien jänneväliden takia ole toimiva ratkaisu, koska teräspalkit voidaan kuitenkin puupalkkien tavoin asentaa kuiva-asennuksia, eli betonivalua ei tarvita. Kun betonivalua ei tarvita, ei tarvitse myöskään huolehtia sen kuivumisajoista eikä sen vaatimia rakennusfysikaalisia tarkasteluja tarvita. (Kotiranta, 2020a)

Teräs on lujuuteensa verrattuna kevyttä, joten se soveltuu hyvin suuriin tiloihin, joissa jännevälit ovat pitkiä. Esimerkkikohde on koulu-/päiväkotirakennus, jossa kantavilta osilta vaaditaan suhteellisen pitkää palonkestoaikaa, jotta sisällä olevat ihmiset ehtivät tarvittaessa pelastautua. Tämän takia teräksiset rakenneosat on suojattava tulipalon varalta, sillä liiallinen kuumeneminen heikentää niiden kantokykyä. (RIL 167-1, 1988, ss. 17–18)

Suurin osa kantavista teräsrakenteista valmistetaan kuumavalssatuista hitsattavista rakenneteräksistä. Niitä on useissa lujuusluokissa sekä laatuluokissa. Toinen paljon käytetty terästyyppi on kylmävalssattu muovattava teräsohutelvy. Siitä valmistetaan mm. rakennusten verhoilumateriaaleina käytettäviä muotolevyjä sekä lämpöeristettyjä sandwich-elementtejä. (RIL 167-1, 1988, s. 40)

Kylmävalssatut tuotteet ovat ohutelvyrakenteita, jotka sopivat kantamaan melko pieniä kuormia ja kattavat lyhyitä jännevälejä. Pääasiassa niitä käytetään sekundääripalkkeina. Tästä johtuen niitä ei tässä opinnäytetyössä käsitellä. (Kumar & Martikainen, 2014, s. 24)

2.1.1 Rakenneterästen merkinnät

Rakenneterästen merkinnät tehdään standardien SFS-EN 10025 [10, 2-4] ja SFS-EN 10027-1 [11] mukaan, joka käsittelee nimikejärjestelmän mukaista merkintätapaa. Merkintöjä tehdään myös standardin SFS-EN 10027-2 [12] mukaan, joka käsittelee numeerista merkintätapaa. (Kumar & Martikainen, 2014, s. 22)

Euroopassa käytetään kahta nimikejärjestelmää, joista toinen perustuu sovelluskohteeseen ja keskeisiin ominaisuuksiin tai kemialliseen koostumukseen. Toinen tapa on esittää teräslajit numerotunnuksilla. Käytössä on myös joitakin yrityskohtaisia merkintöjä ja kaupunimiä. (SFS, 2019, s. 17)

Teräksen tunnus muodostuu päätunnuksista ja mahdollisista lisätunnuksista, jotka kertovat mm. teräksen laatuluokan. Rakenneterästen päätunnus on kirjain S, joka tulee sanasta Structural, sen perään lisätään ohuimman paksuusalueen myötölujuuden minimiarvo (N/mm²). (Kumar & Martikainen, 2014, s. 22)

Mahdollisista lisätunnuksista ensimmäisenä kerrotaan iskutikeydestä ja transitiolämpötilasta riippuva laatuluokka ja tiivistämistapa. Laatuluokkien merkinnät esitetään taulukossa 1 ja taulukossa 2 on kerrottu tiivistämistapojen merkinnät. Loppuun voidaan vielä lisätä tunnus, jolla kerrotaan esimerkiksi säänkestävyyttä, W eli Weather-proof, soveltuvuutta kylmämuovaukseen, C eli Cold-forming, tai sillä voidaan kertoa, että kyseessä on rakenneputki, H eli Hollow section. Teräksen merkintä ominaisuuksien perusteella voi siis olla esimerkiksi EN 10025 – S355J2G3. (Kumar & Martikainen, 2014, s. 22)

Taulukko 1. Kuumavalssattujen seostamattomien terästen laatuluokkia (Kumar & Martikainen, 2014, s. 22)

	Iskutikeysvaatimus		
	27 J	40 J	60 J
+20	JR	KR	LR
0	J0	K0	L0
-20	J2	K2	L2
-30	J3	K3	L3
-40	J4	K4	L4
-50	J5	K5	L5
-60	J6	K6	L6

Taulukko 2. Tiivistämistapojen merkinnät (Kumar & Martikainen, 2014, s. 22)

Merkintä	Selitys
G1	Tiivistämätön
G2	Tiivistämätön ei ole sallittu
G3	Typpeä sitovilla aineilla tiivistetty ja levytuotteet normalisoitu
G4	Typpeä sitovilla aineilla tiivistetty

Hienoraeteräksillä laatuluokkia ovat N, M, NL ja ML. N tarkoittaa normalisoitua tai normalisointivalssattua ja M tarkoittaa termomekaanisesti

valssattua. Iskusitkeyden testauslämpötila laatuluokissa N ja M on -20 °C ja luokissa NL ja ML -50 °C . (Kumar & Martikainen, 2014, s. 22)

Merkinnät voidaan tehdä myös kemiallisen koostumuksen perustella. Tällöin seostamattoman teräksen päätunnus on C ja sen jälkeen tuleva luku kertoo keskimääräisen hiilipitoisuuden 100-kertaisena. Lisäksi tämän jälkeen tulevalla lisätunnuksella voidaan kertoa iskusitkeyttä, käyttöolosuhteita tai muita erityisvaatimuksia. Jos teräs on seosterästä, C:n tilalla on kirjain X ja merkinnässä kerrotaan tärkeimmät seosaineet ja niiden keskimääräiset pitoisuudet. Runsasseosteisilla teräksillä merkintä voi olla todella pitkä, jos käytetään seosaineiden kemiallisia merkkejä ja pitoisuuksia, joten kaikilla teräksillä on myös numerotunnus, jota voidaan käyttää. (SFS, 2019, ss. 19–20)

2.1.2 Lujuus- ja laatuluokat

Lujuusluokista kantaviin rakenteisiin kuumavalssatuista parhaiten sopivia ovat seostamattomat rakenneteräkset S235, S275 ja S355 sekä hienoraerakenneteräkset S275, S355, S420 ja S460. Kun mitoitus tehdään pelkästään lujuuden perusteella, eli kun jännitys voi murtorajatilassa nousta myötörajalle, on järkevää valita teräs, jolla on korkea myötöraja. Taivutetuissa rakenteissa suuremmasta lujuudesta ei kuitenkaan välttämättä ole suurta hyötyä, koska mittojen pienentyminen kasvattaa taipumaa ja lisää kiepahdusvaaraa. (Saarinen, 2014, ss. 28–29) Kuumavalssattujen levyjen ja muotovalmisteiden rakenneaineena teräslaji S355 on suositeltava yleisteräs, se on suositeltavin myös hitsattujen palkki ja rakenneputkien rakenneaineena. (Saarinen, 2014, s. 32)

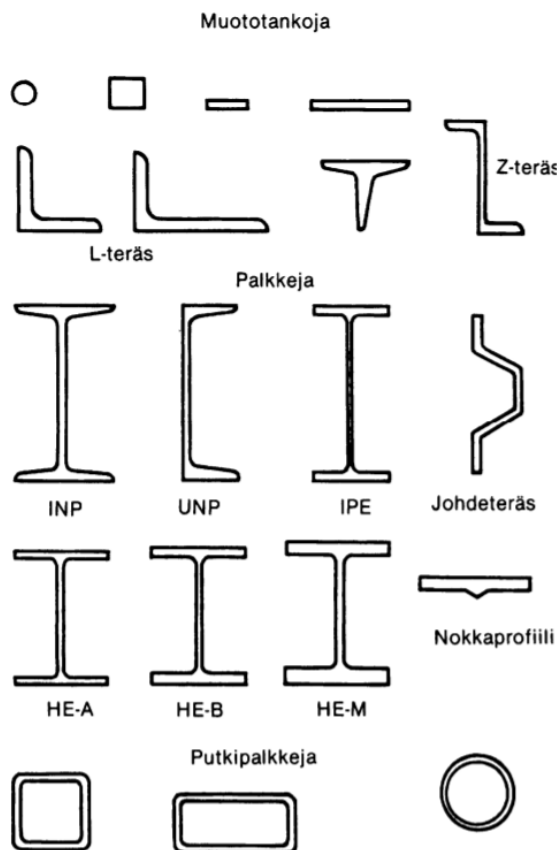
Lujuusluokkia S420 ja S460 käytetään myös jonkin verran. Näistä lujempiaakin teräksiä on, ja niistä käytetään nimitystä korkealujuusteräs HSS (high strength steels). HSS-terästen käyttö rakennuspuolella on ollut melko vähäistä, koska suunnitteluohjeissa materiaalien lujuus on usein rajoitettu lujuuteen S355–S460. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 45)

Laatuluokan valintaan vaikuttavia asioita ovat käyttöolosuhteet, ainepaksuus, kuormitustapa ja -aste, murtumisen seuraus, valmistusmenetelmät, rakenteen muoto ja pintakäsittelyt sekä hinta. Valintaa tehdessä pitää huomioida, että teräksen iskusitkeys voi heikentyä rakenteen valmistuksessa kylmämuovauksen, hitsauksen tai jonkin muun vaiheen seurauksena aiheuttaen haurasmurtumisvaaran. Yleisimmin haurasmurtumisvaaraa lisääviä asioita ovat esimerkiksi sysäyksistä aiheutuva suuri kuormitusnopeus, rakenteen muoto tai valmistustapa, josta aiheutuu kolmiakselinen jännitystila tai kylmämuokkaus, joka nostaa transitiolämpötilaa, etenkin jos muokattuun kohtaan vaikuttaa hitsauslämpö. (Saarinen, 2014, s. 29)

2.1.3 Kuumavalssatut profiilit

Alkujaan kuumavalssatut tangot on kehitetty niitattuja rakenteita ajatellen. Kylmämuovattuihin profiileihin verrattuna kuumavalssattujen huonoja puolia ovat suhteellisen kompaktit seinämät ja siitä johtuen kantokykyyn nähden raskas rakenne. Tavallisimmin käytettyjä profiileja ovat IPE, HEA, HEB, tasakylkinen L ja pyörö-, neliö- ja lattatangot. (RIL 167-1, 1988, s. 45)

Kuumavalssatut standardoidut poikkileikkaukset (kuva 1.) ovat levytuotteiden lisäksi yleisimmin tunnettuja ja käytettyjä terästuotteita kantavissa rakenteissa sekä useissa muissa teräksen käyttökohteissa. Standardoidut profiilit ovat avoimia poikkileikkauksia. Tässä opinnäytetyössä kuumavalssatuista profiileista tutkitaan IPE- ja HEA-profiileja, koska ne ovat kuumavalssatuista profiileista sopivimpia. (Kumar & Martikainen, 2014, s. 23) IPE-profiilia käytetään tyyppillisesti liittopalkin teräsosana, kun palkkiin tukeutuu liittolaatta (Leskelä & Kumar, 2014, s. 61).



Kuva 1. Kuumavalssatut muototangot ja profiilit. (Kumar & Martikainen, 2014, s. 23)

I-profiileista tavallisimpia ovat HE-sarjan poikkileikkaukset, jotka ovat eurooppalaisen standardin mukaisia. HE-sarjasta kevyin on HEA ja raskain HEM. Taivutusvastus ja jäyhyysmomentti ovat HEM-profiililla suurimmat ja HEA-profiililla pienimmät. Näiden profiilien nimelliskoon merkinnät ovat samanlaisia, mutta korkeudessa ja laipan leveydessä on sallittujen

toleranssien takia pieniä eroja, esimerkiksi HE 400 A, HE 400 B ja HE 400 M, joilla korkeus/laipan leveys voi olla 390/300, 400/300 ja 432/307. (Kumar & Martikainen, 2014 s. 23)

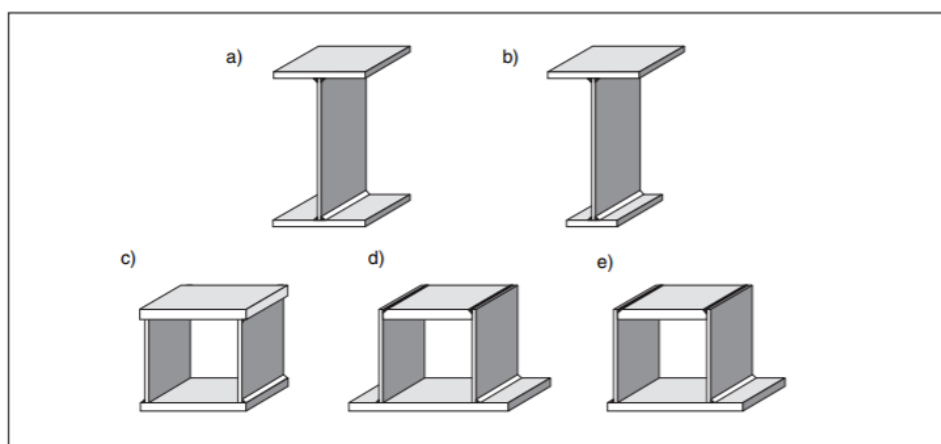
2.1.4 Hitsatut profiilit

Hitsatuista teräspalkeista tässä käsitellään kaksi erilaista profiilia, I-profiili, joka on yleisin profiilimuoto sekä WQ-palkki, jota käytetään usein välipohjapalkkina (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 12). Hitsatut profiilit ovat joko suljettuja, eli koteloprofiileja tai avoimia poikkileikkauksia (kuva 2.) (Leskelä & Kumar, 2014, s. 61).

Hitsattujen profiilien etuna kuumavalssattuihin nähden on se, että niiden poikkileikkausta voidaan muotoilla vapaammin. Hitsatuissa profiileissa on myös mahdollisuus muuttaa palkin korkeutta pituus suunnassa, ja se voi olla tarpeen esimerkiksi harjapalkeissa. (Kumar & Martikainen, 2014, s. 24)

Hitsatuissa profiileissa käytetään kuumavalssattuja teräslevyjä. Aluksi levyt suihkupuuhdistetaan, jonka jälkeen ne leikataan profiilin uuman ja laippojen mittojen mukaan, laippojen terävät reunat viistetään. Uuma- ja laippalevyt asetetaan automaattisesti halutulla tavalla toisiinsa nähden ja hitsataan yhteen automaattisella jauhekaarhitsauslaitteistolla yksi- tai monilankamenetelmällä. Liitokset voivat olla joko piena-, osatunkeuma- tai läpihitsauksia. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 13)

Hitsauksen jälkeen levyjen päät muotoillaan ja profiileihin porataan tarvittaessa reiät ja ne varustellaan. Ennen maalausta profiilit teräsrappuhalataan, palkit käsitellään toimituskohtaisten vaatimusten mukaisesti. Profiilit voidaan tarvittaessa kuumasinkitä. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 13)



Kuva 2. Hitsattujen profiilien poikkileikkauksia (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 12).

I-profiilia (kuva 2. a) käytetään yleensä erilaisina kannattajina talorakenteissa ja teollisuusrakentamisessa, sillä leveälaippaisena se soveltuu myös pilariksi. Useimmiten välipohjapalkin korkeus on rajoitettu, joten profiili

optimoidaan laipan leveyden ja levypaksuuksien suhteen. I-palkki voidaan tehdä myös ohutumapalkkina, jos välipohjan korkeutta ei ole rajoitettu. Tällainen palkki on korkea ja ohutuomainen ja niitä käytetään yleensä katokannattajina. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 12) I-profiilin uuman ja laipan optimoinnissa rajoittava asia voi olla uuman lommahdusriski (Kumar & Martikainen, 2014, s. 24).

WQ-palkissa (kuva 2. d) on leveä alalaippa, jonka päälle välipohja tuetaan. WQ-palkit valmistetaan välipohjan korkuisena, jolloin se jää piiloon eikä kasvata rakenteen korkeutta. Tästä palkista on myös epäsymmetrinen versio, jota käytetään reunapalkkina (kuva 2. e). (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 12)

2.1.5 Poikkileikkauksen valinta

WQ-palkkia käytetään välipohjissa. Palkin leveän alalaipan tarkoitus on kannattaa välipohjaa, tässä tapauksessa CLT-elementtejä. Palkin etu on se, että se valmistetaan välipohjan korkuisena, jolloin se ei jää näkyviin eikä kasvata rakennekorkeutta. Palosuojattavaksi jää ainoastaan alalaippa. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 11)

I-profiili on hyvä vaihtoehto, kun poikkileikkaukseen kohdistuu normaali-voiman lisäksi taivutusrasitus vahvemmassa suunnassa. Jos heikomman suunnan taivutusrasitus on suuri tai poikkileikkaukseen kohdistuu vääntöä tai suuri normaalivoima, on koteloprofiili parempi vaihtoehto. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 31) Tavallinen käyttötarkoitus I-profiilille on liittopalkin teräsosana liittolaatan tukeutuessa siihen (Leskelä & Kumar, 2014, s. 61).

Valinnassa on huomioitava myös stabiiliusilmiöt. Esimerkiksi hoikkaa ohutumapalkkia ei yleensä voida käyttää pitkillä jänneväleillä, jos sen kiepahdusta ei estetä. Kiepahduksen estävinä tukina voidaan käyttää esimerkiksi jäykistyssauvoja. Jos tukia ei ole, palkin on kestävä yksin kuormitus kiepahtamatta. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 31)

2.1.6 Jännevälit

Jänneväliä rajoittaa profiilin korkeus. Hitsatuilla profiileilla on etuna se, että niihin voidaan tehdä esikorotus, jolla voidaan pitemmillä jänneväleillä pyrkiä poistamaan pysyvän kuorman aiheuttamaa taipumaa. Koteloprofiileilla on iso etu siitä, että niillä on selvästi suurempi vääntöjäykkyys avoimiin profiileihin verrattuna. Suuren vääntöjäykkyyden ansiosta laatasto saadaan asennettua pienemmällä tuennalla, koska palkeilla ei ole kiepahdusriskiä. (Leskelä & Kumar, 2014, s. 61)

Välipohjapalkkien jännevälit määräytyvät pilareiden jaon ja järjestelyn perusteella. Matalalaatastoissa palkkien korkeudet vaihtelevat 200 ja 500 mm välillä ja jännevälit 5 ja 8 m välillä. Yli 10 m pitkille palkeille vaadittava

korkeus on yli 550 mm ja ne ovat hitsattuja I-profiileja. Todella suurilla jänneväleillä laastastoon kuuluu pääpalkit ja niiden uumiin tukeutuvat sekundääripalkit. (Leskelä & Kumar, 2014, s. 61)

Palkkien mitoituksessa on huomioitava kiepahdusmahdollisuus, puristettu laippa on tuettava sivusiirtymistä vastaan tarpeeksi tiheästi. Yleensä puristettu ylälaippa on kiinnitetty muihin rakenteisiin ilman erillistä jäykistystä, mutta jatkuvan palkin tuilla puristetun alalaipan kiepahduskestävyys on tarkistettava. (Leskelä & Kumar, 2014, ss. 61–62)

Laastastoissa keski- ja reunapalkkien jännevälit ja korkeudet ovat samat, mutta niillä on erilainen rasiustapa ja kuormat. Reunapalkeille on huomioitava vääntövaikutukset ja isompi kiepahdusriski kuin keskipalkeilla. Useimmissa tapauksissa rakennejärjestelmässä itsessään on tuenta kiepahdusta vastaan, kun ylälaippa kiinnittyy laastastoon, tässä tapauksessa CLT-elementteihin, tai palkit tukevat toisia palkkeja. (Leskelä & Kumar, 2014, s. 62)

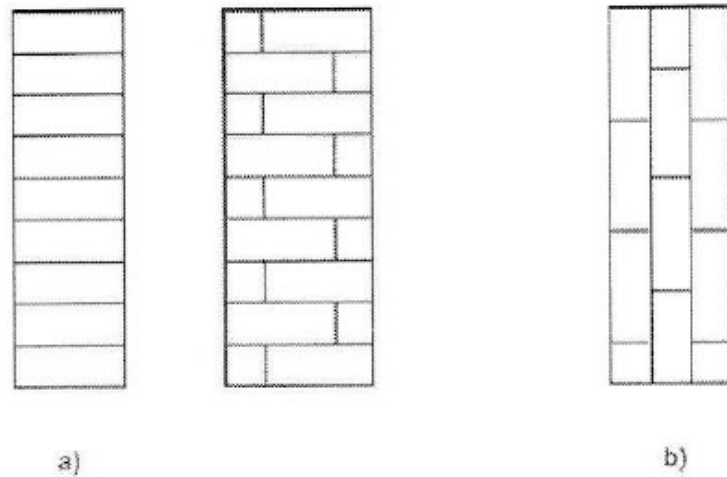
2.2 Puupalkit

Puu on monipuolinen materiaali ja sillä on monia hyviä puolia. Puu on pehmeää ja sen vuoksi helposti työstettävää. Se on myös kevyttä ja painoonsa nähden luja materiaali. Puulla on paljon hyviä ekologisia ominaisuuksia, sillä se on itsestään uusiutuva materiaali. Lisäksi puu on täysin kierrätettävää ja sen jalostuksesta syntyy vain vähän päästöjä. Puusta myös puolet on hiiltä, mistä johtuen se sitoo hyvin hiilidioksidia. (Puuinfo, 2006)

Puurakenteilla voidaan saavuttaa suhteellisen pitkiä jännevälejä. Todella pitkillä jänneväleillä kuitenkin puupalkin poikkileikkaus voi olla niin suuri, ettei alapuolelle jäävä huonekorkeus salli talotekniikan vientiä palkkien alta, jolloin vaihtoehdoksi jää rei'ittäminen. Tässä opinnäytetyössä on myös lisättyä puupalkkien rei'itysohje.

2.2.1 Liimapuu (GLT)

Kirjainyhdistelmä GLT tulee sanoista Glue Laminated Timber, joka viittaa palkin valmistustapaan. Liimapuupalkit valmistetaan standardin EN 14080 mukaan liimaamalla yhteen lujuuslajitellusta sahatavarasta mitallistettuja lamelleja, jotka ovat yleensä sormijatkettuja. Lamellit liimataan yhteen siten, että puun syyt ovat liimapuun pituussuuntaan ja poikkileikkauksesta tulee suorakaide. Liimapuuta voidaan valmistaa horisontaalisena tai vertikaalisena tyyppinä kuvan 3 mukaisesti. (RIL 205-1-2017, s. 52)



Kuva 3. Liimapuutyypit a) horisontaalinen, b) vertikaalinen (RIL 205-1-2017, s. 52).

Liimapuupalkeissa lamellien enimmäispaksuus on 45 mm. Käyttöluokan 3 liimapuussa lamellien paksuus saa olla korkeintaan 35 mm. Taivutetuilla liimapuilla lamellipaksuus on 33 mm. (Puuinfo, n.d.) Jos liimapuu on kaareva, sen lamellipaksuutta t rajoitetaan myös kaarevuussäteestä r ja lamellien sormijatkoksille ilmoitetusta taivutuslujuudesta $f_{m,j,dc,k}$ riippuen seuraavasti (RIL 205-1-2017, s. 52).

$$t \leq \frac{r}{250} \left(1 + \frac{f_{m,j,dc,k}}{150} \right) \quad (1)$$

Liimapuun maksimikorkeus on noin 2 m ja maksimipituus noin 30 m, mutta enimmäismitat ovat valmistajakohtaisia. Liimapuupalkkeja ja pilareita on saatavilla useita erikokoisia, mutta useimmat niistä ovat tilattavia. Alla olevassa kuvassa 4 on esitetty varastopalkkien mittoja. (Puuinfo, n.d.a)

Varastopalkkien mitat

Leveys	90	115	140	225	270	315	360	405	450	495
90	x			x	x	x	x	x		
115		x		x	x	x	x	x	x	x
140			x		x	x	x	x		
165							x		x	

Halkaistu liimapuu; varastopalkkien mitat

Leveys	225	270	280*	300*	315	360	405
42	x	x	x	x	x	x	x
56	x	x			x	x	x
66					x	x	x

Kuva 4. Liimapuun varasto poikkileikkausmitat, *erikoistilauksesta (Puuinfo, n.d.a).

Liimapuu on homogeenista, jos se on tehty saman lujuusluokan lamelleista. Usein liimapuun uloimmilla lamelleilla on kuitenkin suurempi jännitys ja

niissä käytetään sen takia paremman lujuusluokan puuta. Tällä tavalla valmistettua liimapuuta kutsutaan yhdistetyksi liimapuuksi. Liimapuun luokan tunnuksessa c tulee sanasta combined (lamelleja on eri lujuusluokista) ja h sanasta homogeneous (kaikki lamellit ovat samaa lujuusluokkaa). (Puuinfo, n.d.a)

Lujuusluokat havupuusta valmistetuille liimapuulle esitetään erikseen standardissa EN 14080 homogeenisille GL20h-GL32h ja yhdistetyille liimapuulle GL20c-GL32c. GL-lujuusluokat ovat horisontaalisille liimapuulle, joissa on ainakin kaksi kerrosta lamelleja. Halkaistujen liimapuiden lujuusominaisuudet ovat heikompia, halkaistujen lujuusluokassa on lisäksi tunnus s. Nämä lujuusluokat on esitetty taulukossa 3. Vertikaalisten ja paksuista lamelleista tehtyjen liimapuiden lujuusluokat ja mahdollinen vastaavuus GL- tai C-lujuusluokkien kanssa ilmoitetaan tuotekohtaisesti. (RIL 205-1-2017, s. 52)

Taulukko 3. Liimapuun lujuusluokat (RIL 205-1-2017, s. 53).

Lujuusluokka		Liimapuu				Halkaistu liimapuu	
		GL24c	GL24h	GL30c ¹	GL30h	GL30cs ¹	GL30hs
Ominaislujuudet (N/mm ²)							
Taivutus	$f_{m,k}$	24	24	30	30	28	28
Veto	$f_{t,0,k}$	17	19,2	19,5	24	18,7	22,4
	$f_{t,90,k}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Puristus	$f_{c,0,k}$	21,5	24	24,5	30	23,3	28
	$f_{c,90,k}$	2,5	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0
Leikkaus	$f_{v,k}$	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
	$f_{r,k}$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Jäykkyysominaisuudet (N/mm ²)							
Kimmomoduuli	$E_{0,mean}$	11 000	11 500	13 000	13 600	12 500	13 100
	$E_{0,05}$	9 100	9 600	10 800	11 300	10 300	10 800
	$E_{90,mean}$	300	300	300	300	300	300
Liukumoduuli	G_{mean}	650	650	650	650	650	650
	$G_{0,05}$	540	540	540	540	540	540
Tiheydet (kg/m ³)							
Ominaitiheys	ρ_k	365	385	390	430	390	430
Tiheyden keskiarvo	ρ_{mean}	400	420	430	480	430	480

¹Vakiolujuusluokka Suomessa (RIL 205-1-2017, s. 53).

Liimapuuta käytetään pilareina ja palkkeina ja rinnakkain yhteen liitettynä myös laattamaisina rakenteina. Laattamaisena rakenteena liimapuuta käytetään esimerkiksi silloissa ja välipohjissa. Liimapuusta tehty poikittaisjännitetty syrjälankkukansi on yleisin puusiltatyyppejä esimerkiksi Norjassa ja Ruotsissa. Välipohjissa tällaista laattamaisista liimapuulankuista tehtyä välipohjaa käytetään Euroopassa melko yleisesti, mutta ei Suomessa. (Puuinfo, n.d.a)

2.2.2 Viilupuu (LVL)

LVL-palkkien on täytettävä standardissa EN 14374 esitetyt vaatimukset (RIL 205-1-2017, s. 54). Palkeista voidaan käyttää myös nimitystä kertopuu tai viilupuu. LVL tulee sanoista Laminated Veneer Lumber. LVL-palkki on rakenteellinen puutuote, joka valmistetaan sorvatuista viiluista liimaamalla kuten kuvassa 5. Viilut ovat kuusta ja ne ovat noin 3 mm paksuisia. Riippuen siitä, millaisia ominaisuuksia palkille halutaan, kaikkien viilujen syysuunta voi olla pituussuuntaan, tai osa voidaan liimata ristiin. Palkit, joiden viilut ovat yhteen suuntaan ovat Kerto-S- ja Kerto-T-LVL, ristiin viilutettu on Kerto-Q-LVL. (Puuinfo, n.d.b)



Kuva 5. LVL-levyjä (Puuinfo, n.d.b).

Palkkeja tehdään 27–57 mm paksuisina 6 mm välein ja vakiokorkeudet ovat 200–600 mm väliltä. Alla olevassa kuvassa (kuva 6.) on näytetty kaikki saatavilla olevat vakiokokot. Palkkien maksimi pituus on 25000 mm. Yleisimmät kokot ovat 200, 260, 300, 360 ja 400 mm 45 ja 51 mm levyisinä. (MetsäWood, 2020) Näistä LVL-palkeista voidaan tarvittaessa tehdä kerrannaisliimalla paksuja rakennusosia (Puuinfo, n.d.b).

Paksuus (mm)	Korkeus (mm)								
	200	225	260	300	360	400	450	500	600
27	•	•							
33	•	•	•						
39	•	•	•	•					
45	•	•	•	•	•				
51	•	•	•	•	•	•			
57	•	•	•	•	•	•	•		
63	•	•	•	•	•	•	•	•	
75	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Kuva 6. LVL-palkkien vakioimitat (MetsäWood, 2020).

Rakenteellista LVL:ää voidaan käyttää myös sauvamaisina pilareina ja palkkeina sekä rankarakenteiden jäykistyksessä ohuempina levyinä. LVL-levyistä tehdään myös rakenteellisia elementtejä, kuten ripa- ja kotelolaattoja, joita käytetään väli- ja yläpohjissa. Alla olevassa taulukossa 4 on erilaisten LVL-levyjen lujuusluokkia. (MetsäWood, 2020)

Taulukko 4. LVL-palkkien lujuusluokat (RIL 205-1-2017, s. 55).

Tyyppi		Kerto-S Paksuus 21–90 mm	Kerto-T Paksuus 27–75 mm	Kerto-Q Paksuus 21–24 mm	Kerto-Q Paksuus 27–69 mm
Ominaislujuudet (N/mm ²)					
Taivutus					
- syrjällään	$f_{m,k}$	44	27	28	32
- kokovaikutusekspONENTTI	s	0,12	0,15	0,12	0,12
- lappeellaan	$f_{m,0,flat,k}$	50	32	32	36
Veto					
- syysuuntaan	$f_{t,0,k}$	35	24	19	26
- poikittain syrjällään	$f_{t,90,edge,k}$	0,8	0,5	6,0	6,0
Puristus					
- syysuuntaan	$f_{c,0,k}$	35	26	19	26
- poikittain syrjällään	$f_{c,90,edge,k}$	6	4	9	9
- poikittain lappeellaan	$f_{c,90,flat,k}$	1,8	1,0	2,2	2,2
Leikkaus					
- syrjällään	$f_{v,k}$	4,1	2,4	4,5	4,5
- lappeellaan pintaviilun suuntaan	$f_{r,0,k}$	2,3	1,3	1,3	1,3
Jäykkyysominaisuudet (N/mm ²)					
Kimmomoduuli	E_{mean}	13 800	10 000	10 000	10 500
	$E_{0,05}$	11 600	8 800	8 300	8 800
Liukumoduuli	$G_{edge,mean}$	600	400	600	600
	$G_{edge,0.05}$	400	300	400	400
Ominaisihteys (kg/m ³)	ρ_k	480	410	480	480
Tiheyden keskiarvo (kg/m ³)	ρ_{mean}	510	440	510	510

Syrjätaivutuslujuus on korkeudelle 300 mm. Jos syrjällään taivutetun palkin korkeus on yli 300 mm, taivutuslujuuden arvoa $f_{m,k}$ pienennetään kertoimella k_h . Vastaavasti jos korkeus on alle 300 mm, voidaan kertoimella k_h korottaa syrjätaivutuslujuutta.

$$k_h = \left(\frac{300}{h} \right)^s \leq 1,2 \quad (2)$$

jossa

h palkin korkeus millimetreinä
s kokovaikutusekspONENTTI yllä olevasta taulukosta. (RIL 205-1-2017, s. 54)

Vedetyn LVL-palkin vetolujuuden arvoa $f_{t,0,k}$ pienennetään kertoimella k_l , jos pituus on yli 3000 mm. Jos pituus on alle 3000 mm, vetolujuutta voidaan korottaa kertoimella k_l .

$$k_t = \left(\frac{3000}{\ell} \right)^{s/2} \leq 1,1 \quad (3)$$

jossa

l palkin pituus millimetreinä
s kokovaikutuseksponentti. (RIL 205-1-2017, s. 55)

2.2.3 Monikerroslevy (CLT)

CLT tulee sanoista Cross Laminated Timber ja se on massiivipuulevy, joka koostuu ristiin liimatuista lautakerroksista, kuten kuvassa 7. Riippuen levyn rakenteellisista vaatimuksista, kerroksia voi olla 3, 5, 7 tai 8 ja ne voivat olla eri paksuisia. Elementit ovat laattamaisia, hyvin paloa kestäviä, erittäin jäykkiä ja lujia sekä ominaisuuksiinsa nähden kevyitä. Yleensä CLT-levyt valmistetaan kuusesta tai männystä, käytettävät laudat ovat lujuuslajiteltuja ja sormijatkettuja. Mikäli CLT elementti halutaan jättää näkyviin, voidaan näkyvillä pinnoilla käyttää muitakin puulajeja. (Puuinfo, n.d.c; Stora Enso, n.d.a)



Kuva 7. CLT-Cross Laminated Timber (Stora Enso, n.d.a).

Eri valmistajilla voi olla erilaisia valmistustekniikoita ja mittoja levyille. Valmistajasta riippuen levyn paksuus voi olla 60–400 mm, leveys korkeintaan 2,95–4,8 m ja pituus 12–20 m. (Puuinfo, n.d.c)

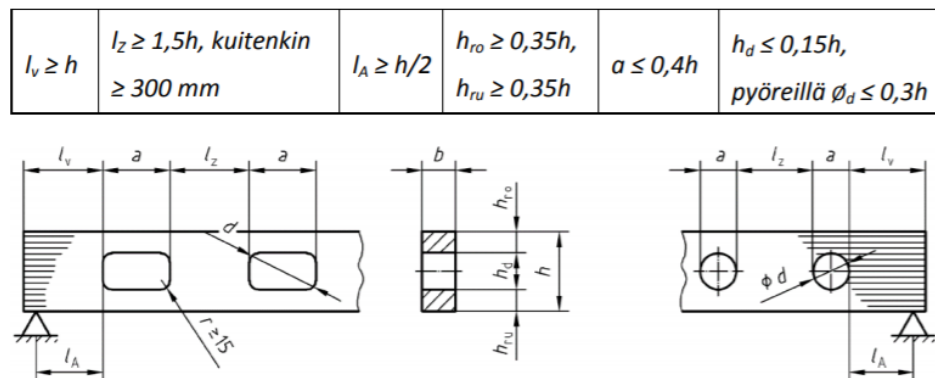
CLT:n valmistuksessa on kaksi liimaustapaa, syrjäliimattu ja syrjäliimaamaton. Syrjäliimatuissa lautojen sivut on ensin liimattu syrjistään ehjiksi levyiksi ja sen jälkeen liimattu päällekkäin ristiin ladottuna. Tämä liimaustapa on ilmatiiviimpi ja tässä kuivuminen saattaa aiheuttaa halkeilua laudoissa. Syrjäliimaamattomissa liima levitetään vain lautojen lappeelle ja ne ladotaan irrallisista laudoista levyiksi. Tällä liimaustavalla kosteuselämistä on lähinnä saumojen kohdalla. Liimauksen takia levyt on saatava puristukseen, joko vakuumpiirässillä tai hydraulisella prässillä. (Puuinfo, n.d.c)

Lyhyillä jänneväleillä CLT-levyjä voidaan käyttää välipohjissa yksin ilman palkistoa, tai pitemmällä jänneväleillä palkiston kanssa. Levyjä voidaan käyttää myös liittorakenteena betoni- tai kipsivalun kanssa. CLT-levyillä ei ole kovin hyvää ääneneristävyyttä, koska ne ovat niin kevyitä. Välipohjissa ääneneristävyyttä voidaan lisätä pintavalulla ja alapuolisella jousirankakattolla. (Puuinfo, n.d.c)

CLT:llä on monia etuja joihinkin yleisiin rakennusmateriaaleihin verrattuna. CLT-levyillä on hyvät rakenteelliset ominaisuudet ja ne ovat tiiviitä ja lisäksi niiden rakennustapa on ympäristöystävällinen ja vastuullinen. CLT-elementtien asennus on myös nopeaa ja helppoa ja asennukset voidaan tehdä kuiva-asennuksina. Niillä on lisäksi hyvä palonkestävyys. (Stora Enso, n.d.b)

2.2.4 Rei'itys

Ohje koskee reiällisiä liimapuu- ja LVL-palkkeja, reikien ollessa pyöreitä tai suorakaiteen muotoisia, kulmistaan vähintään $r=15$ mm kaarevuussäteellä pyöristettyjä. Kuvassa 8 esitettyjen mittojen on täytettävä seuraavat ehdot reiän halkaisijan ollessa $d > 50$ mm. (Suomen RakMk, 2016, s. 16)



Kuva 8. Reiällisen palkin merkinnät (Suomen RakMk, 2016, s. 16).

Reikien mitoituksessa tämän ehdon on toteuduttava

$$\sigma_{t,90,d} = \frac{F_{t,90,d}}{0,5 \cdot b \cdot k_{t,90} \cdot l_{t,90}} \leq f_{t,90,d} \quad (4)$$

jossa

<p>b</p> <p>$k_{t,90} = \min\{1; (450/h)^{0,5}\}$</p> <p>$f_{t,90,d}$</p> <p>$l_{t,90} = \begin{cases} 0,5 \cdot (h_a + h) \\ 0,35 \cdot d + 0,5 \cdot h \end{cases}$</p>	<p>palkin leveys</p> <p>missä h on palkin korkeus millimetreinä</p> <p>puun poikittaisen vetolujuuden mitoitusarvo</p> <p>suorakaiteen muotoiset reiät</p> <p>pyöreät reiät. (Suomen RakMk, 2016, s. 16)</p>
---	---

Poikittainen vetovoima $F_{t,90,d}$ riippuu palkin reiän kohdalla olevasta leikkausvoimasta V_d ja taivutusmomentista M_d . $F_{t,90,d}$ saadaan kaavasta

$$F_{t,90,d} = \frac{V_d \cdot h_d}{4 \cdot h} \cdot \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) + 0,008 \cdot \frac{M_d}{h_r} \quad (5)$$

$h_r = \begin{cases} \min(h_{ro}; h_{ru}) & \text{suorakaiteen muotoiset reiät} \\ \min(h_{ro} + 0,15d; h_{ru} + 0,15d) & \text{pyöreät reiät} \end{cases}$
 h, h_{ro}, h_{ru} ja d määritetty kuvassa 8
 h_d suorakaiteen muotoisilla rei'illä aukon korkeus, pyöreillä $h_d = 0,7d$. (Suomen RakMk, 2016, ss. 16–17)

Reiän kohdalta palkin poikkileikkauksesta, josta on vähennetty reiän pinta-ala, tarkastetaan lisäksi leikkaus-, taivutus- ja veto-/puristuskestävyys. Tarkastelussa vähennetään siis vain reiän pinta-ala muiden jännityshuipputarastelujen sisältyessä reikien mitoituksen ohjeeseen. (Suomen RakMk, 2016, s. 17) Näitä ohjeita voidaan käyttää myös rei'ille, joiden halkaisija d on alle 50 mm (RIL 205-1-2017, s. 95).

Korkeintaan $d = 30$ mm halkaisijaltaan olevat pyöreät reiät voidaan tehdä huomioimalla ne mitoituksella pelkästään poikkileikkauksen pienennyksenä, jos reiän keskikohta on palkin reunasta vähintään $3 \cdot d$ ja päästä vähintään $5 \cdot d$ ja jos reikiä on useita, niiden keskiöväli puun syysuunnassa on vähintään $5 \cdot d$ ja syitä vastaan kohtisuorassa $3 \cdot d$. Sama koskee myös sahatavaraa. (RIL 205-1-2017, s. 95)

Reiän vierestä palkkeja voidaan vahvistaa esimerkiksi ruuveilla, liimatan-goilla tai palkin pintaan liimattavilla vanereilla standardin DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 mukaisesti (RIL 205-1-2017, s. 96). Standardissa on esitetty seuraava ehto liittyen reiällisten palkkien vahvistamiseen. Huomioitavaa on, että reiän kummallakin puolella käytetään vain yhtä ruuvia kriittisessä poikkileikkauksessa. (Suomen liimapuuyhdistys ry & Puuinfo oy, 2015, s. 50)

$$F_{t,90,d} \leq n_r \cdot R_{t,d} \quad (6)$$

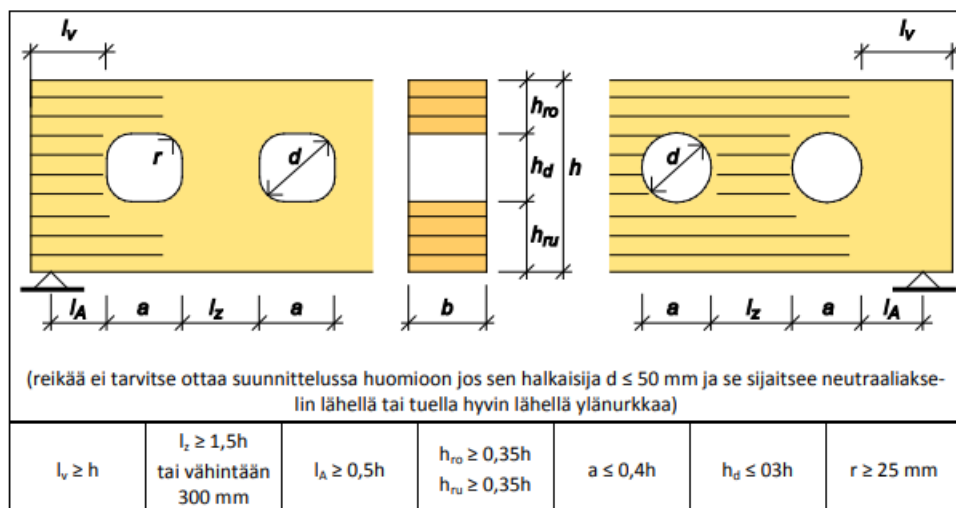
jossa

$$F_{t,90,d} = 1,3 \cdot V_d \cdot \left(3 \cdot (1 - \alpha)^2 - 2 \cdot (1 - \alpha)^3 \right) \quad (7)$$

jossa

$F_{t,90,d}$ syitä vastaan kohtisuoran vetovoiman suunnitteluarvo
 V_d leikkausvoiman suunnitteluarvo
 α h_{ef}/h (h_{ef} reiän halkaisija vähennetty korkeudesta)
 d ruuvin sileän osan halkaisija ($d \leq 20$ mm)

Seuraavassa kuvassa (kuva 11.) esitetään reikien suunnittelua Liimapuukäsikirjan osa 3 mukaan. Liimapuukäsikirja perustuu standardiin EN 1995-1-1, mutta siinä ehdotetaan kuitenkin sallittavaksi suurempia reikiä kuin mitä Eurokoodi 5 reikien mitoitusohjeessa. Ehdotettavat muutokset mitoitusohjeeseen ovat $r \geq 25 \text{ mm}$ ja $h_d \leq 0,3h$. (Suomen liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015, s. 48)



Kuva 11. Reiällisten palkkien geometriset vaatimukset (Suomen liimapuuyhdistys ry & Puuinfo Oy, 2015, s. 48).

2.3 Liittopalkit

Liittopalkkien käyttö voi olla järkevää CLT-välipohjissa silloin, kun ne tehdään CLT-betoni-liittoholveina. Puubetoniliittorakenteilla voidaan saada pidempi jänneväli kuin toteuttamalla välipohja pelkästään puurakenteisena ilman betonia.

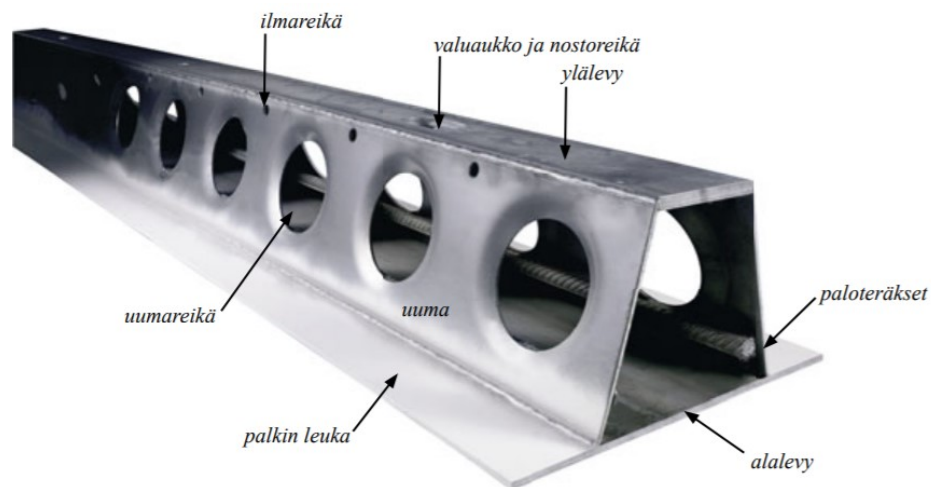
Liittopalkkien käyttöä puuvälipohjissa on käsitelty tässä vain lyhyesti, sillä niiden liitokset vaativat betonivalun välipohjaan, joita esimerkkikohteen välipohjarakenteessa ei ole. Liittopalkkeille ei tässä mietitä esimerkiksi liitoksia lainkaan, sillä niiden liitokset vaativat betonivalun.

Liittopalkkeja ei tässä tarkemmin käsitellä, sillä ne eivät sovellu asennustansa takia esimerkkikohteeseen, mutta Deltapalkki on mahdollista tehdä niin matalana, että se jää CLT-elementtien väliin piiloon. Deltapalkille voi tehdä esimitoituksen Peikon omilta nettisivuilta löytyvällä ohjelmalla.

2.3.1 Deltapalkki

Deltapalkki (kuva 12.) on lattiarakenteeseen integroitava liittopalkki, jota käytetään matalissa välipohjarakenteissa. Deltapalkki valmistetaan leikatuista teräslevyistä, jotka liitetään yhteen hitsaamalla. Palkin liitos tehdään valamalla palkki täyteen betonia. Betonin kovetuttua palkki ja betoni

muodostavat yhdessä liittorakenteen. Tavallisimmin sitä käytetään ontelo- ja kuorilaattavälipohjissa. (Peikko, 2016, s. 4)

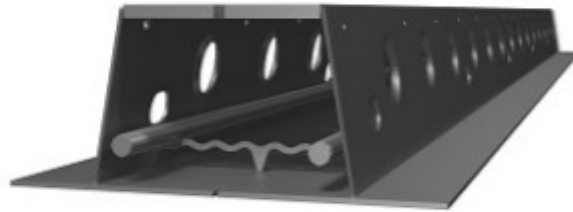


Kuva 12. Deltapalkin osat (Peikko Group 2016, s. 4).

Deltapalkista on kaksi erilaista, keskipalkki, jossa on leuat palkin kummallakin puolella ja se on tarkoitettu kannattelemaan laatastoa molemmin puolin ja reunapalkki, jossa on toisella puolella pystyuuma ja toisella puolella leuka. Molempia palkkeja voidaan käyttää reunapalkkina, jolloin palkki kannattelee painoa vain toisella puolella. Deltapalkilla voidaan toteuttaa myös kaarevia laatastoja, jolloin reunat voidaan tehdä käyttämällä kaarevia muottipeltejä keskipalkin kanssa. Deltapalkkia voidaan käyttää joko yksiaukkoisena tai jatkuvana palkkina sekä ulokepalkkina. (Peikko Group, 2016, s. 5)

2.3.2 A-palkki

A-palkissa on teräskotelo, joka täytetään jo tehtaalla betonilla ja se on suunniteltu ontelolaatastojen kantavaksi primääripalkiksi. Kuvassa 13 on A-palkki, jota ei ole vielä täytetty betonilla. Teräskotelo ja betoni muodostavat yhdessä liittorakenteen, ja sillä on sellaisenaan riittävä vääntökapasiteetti väännölle, joka aiheutuu ontelolaattojen epäkeskeisestä asennuksesta. Asennusvaiheessa palkkia ei myöskään tarvitse tukea leukojen alta ja se ottaa ilman lisätukia vastaan kaikki asennusaikaiset kuormat. A-palkkia voidaan käyttää myös jatkuvana rakenteena. Palkin etuna on myös se, että se ei rajoita kerroskorkeutta, sillä se jää kokonaan laataston sisään. A-palkkia käytetään yleensä toimisto-, julkisissa ja teollisuusrakennuksissa väli- ja yläpohjapalkkina. Palkin korkeuksia ovat 200, 265, 320, 370, 400 ja 500 mm. (Anstar Oy, 2004, s. 2)



Kuva 13. A-palkki (Anstar Oy, 2016, s. 2).

Palkki ei tarvitse erillistä palosuojausta, jos paloluokka on R 0–R 180. Myöskään reunapalkin ulkoinen uuma ei tarvitse palosuojausta, jos paloluokka on tältä väliltä. Palkin palomitoitusta säädetään palkin sisäpuolisella rau-doituksella. (Anstar Oy, 2004, s. 2)

3 MITOITUS

Ihmiset ovat erittäin herkkiä värähtelylle, mistä johtuen fysiologisten vaikutusten asettamat mitoituskriteerit ovat yleensä määräävämpiä kuin lujustekniset mitoitukset. Sama koskee tavanomaisimpia teräsrakenteita ja puurakenteita, joten tässä opinnäytetyössä ei tehdä lujusteknisiä mitoituksia, vaan keskitytään pelkkään värähtelymitoitukseen. (RIL 167-1, 1988, s. 124)

Kuinka herkästi värähtely havaitaan, riippuu jaksollisen värähtelyn taajuudesta. Värähtelyn siirtymäamplitudi, jonka ihminen havaitsee, pienenee arvosta 0,1 mm arvoon 0,002 mm kun värähtelytaajuus vastaavasti muuttuu arvosta 1 Hz arvoon 10 Hz. (RIL 167-1, 1988, s. 124)

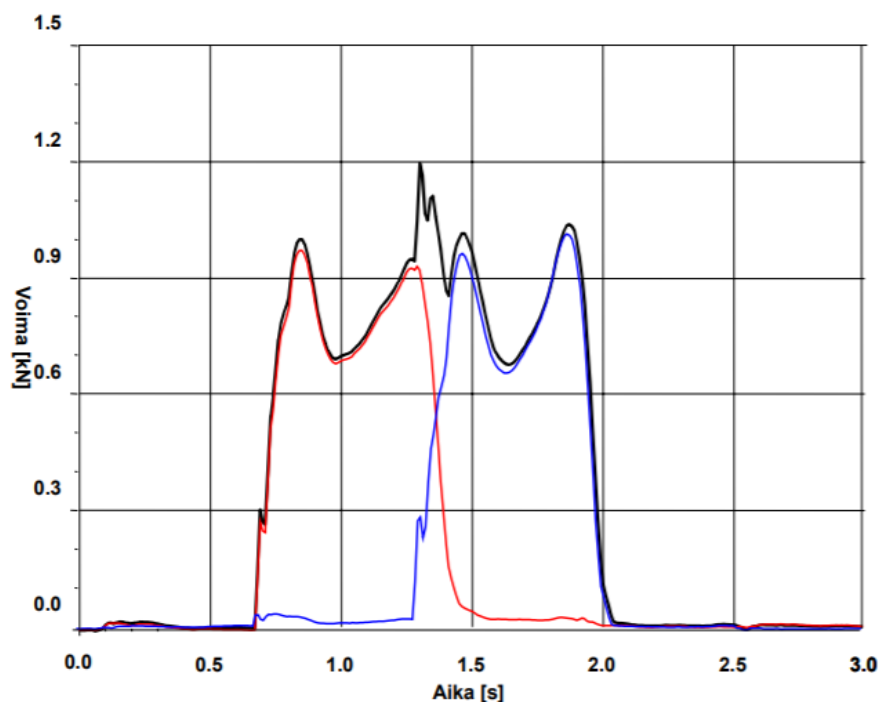
Rakenteen värähtelylle on tavallista, että ajan myötä kuorma ja sen vaikutukset rakenteeseen vaihtelevat. Usein vaihtelut ovat niin hitaita, että siirtymien ja jännitysten arvioimiseksi riittää staattinen laskenta. Jos hitausvoimilla on merkitystä rakenteen analysoinnissa, kuormaa kutsutaan dynaamiseksi. Yleisiä rakenteita, joissa dynaamisuus vaikuttaa suunnitteluun ovat sillat, erittäin korkeat rakennukset, mastomaiset rakenteet, koneiden ja laitteiden kantavat rakenteet, nosturiradat sekä maanjäristykselle alttiit rakennukset. Tässä opinnäytetyössä esimerkkikohde on koulu/päiväkoti, joten mitoitukset tehdään kuten asuin- ja toimistorakennuksiin, tästä syystä dynaamisia kuormia ei ole huomioitu. (Kemppe, 2014, s. 151)

3.1 Yleistä värähtelystä

Kävelystä aiheutuu jaksottaisia ja iskumaisia komponentteja. Matalin jaksottainen kävelyn aiheuttama kuormitus on taajuudella 1,6–2,2 Hz, mutta kuormituskomponentteja on myös sen toisella ja kolmannella monikerralla 3,2–8,8, Hz. (Talja, Toratti & Järvinen, 2002, s. 9)

Useimmiten kävelevä henkilö ei huomaa itse kävelystään aiheutuvaa värähtelyä tai lattian notkumista, mutta ympärillä olevat henkilöt voivat pitää niitä erittäin epämiellyttävinä. Paikallaan oleva henkilö voi kokea kävelystä aiheutuvan värähtelyn häiritseväksi, jos jaksolliset kuormituskomponentit vahvistuvat liikaa resonanssi-ilmiön vuoksi, jos kantapäähän isku lattiaan aiheuttaa suurta tärinää tai jos lattia notkuu askelten alla liikaa. (Talja ym., 2002, s. 9) Resonanssi-ilmiössä värähtelysystemiä kuormittavan ulkoisen voiman taajuus vastaa jotakin systeemin ominaistajuutta. Silloin vaimeenemattoman värähtelijän värähtelyamplitudin kasvulla ei ole rajoja. Resonanssi ei ole toivottu ilmiö, joten se on estettävä jo suunnitteluvaiheessa. (Kempfi, 2014, s. 151)

Kävely voi aiheuttaa myös välillisiä häiriöitä, kuten astioiden kilinää tai kasvien heilumista. Tällaisten värähtelyjen haitallisuuteen vaikuttaa lähinnä lattian paikallinen painuminen yksittäisten askelten alla, jotka aiheuttavat esimerkiksi kaapistojen tai kukkatelineiden kallistumista. Nämä häiriöt ovat tyypillisiä kelluvilla lattioilla, korotuslattioilla tai sellaisilla lattioilla, joiden pintalevytyks on joustava tai lattialla on pieni poikittainen jäykkyys. Vasemman ja oikean jalan aiheuttamia kävelystä syntyviä kuormia näytetään alla olevassa kuvassa (kuva 14.). (Talja ym., 2002, s. 10)



Kuva 14. Kävelykuormituksen syntyminen vasemman ja oikean jalan kosketuksesta (Talja ym., 2002, s. 10).

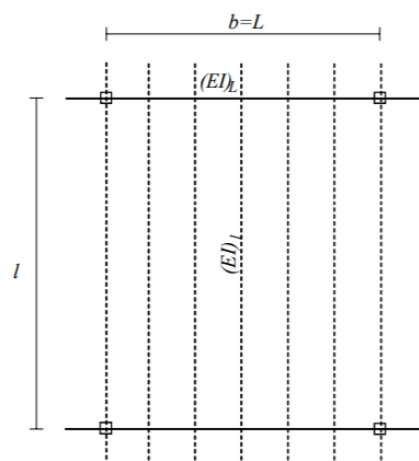
Välipohjassa kävelyn aiheuttama värähtely riippuu enimmäkseen massasta ja lattian ominaisvärähtelyn taajuudesta. Raskailla latioilla myös vaimennus vaikuttaa värähtelyn voimakkuuteen. (Talja ym., 2002, s. 9)

Lattiaan liittyy usein esimerkiksi väliseiniä ja alaslaskettuja kattoja, jotka liisäävät lattian massaa ja muuttavat sen ominaistaajuutta ja vaimennusta ja siten muuttavat lattian värähtelykäyttäytymistä. (Talja ym., 2002, s. 13) Muita värähtelyominaisuuksiin vaikuttavia asioita lattiatyypin, lattian mittojen ja lattiaa tukevien rakenteiden lisäksi ovat rakennekerrosten ja niiden liitosten jousto sekä valmistus- ja asennustarkkuudet. (Talja ym., 2002, s. 14)

3.2 Värähtelymitoitus

Mitoituksessa resonanssi on määräävä, jos välipohjan värähtelyn alin ominaistaajuus on alle 10 Hz. Taajuuden ollessa yli 10 Hz, välipohjan notkuminen tai tärinä on puolestaan mitoituksessa määräävä. (TRY 17/2005, s. 3) Ominaistaajuuden ollessa suuri ja massan pieni, värähtelyä hallitsee kävelystä aiheutuvat taipumat. Tähän ilmiöön perustuen lattiat jaetaan matala- ja korkeataajuuksisiin lattioihin. Kevyet lattiat ovat yleensä korkeataajuuksisia ja raskaat matalataajuuksisia. (Talja ym., 2002, s. 10) Korkeataajuuksisten lattioiden ominaistaajuus on yli 10 Hz ja matalataajuuksisten on alle 10 Hz. Värähtelylle tehtävä tarkastelu on materiaalista riippumaton. (TRY 17/2005, s. 3)

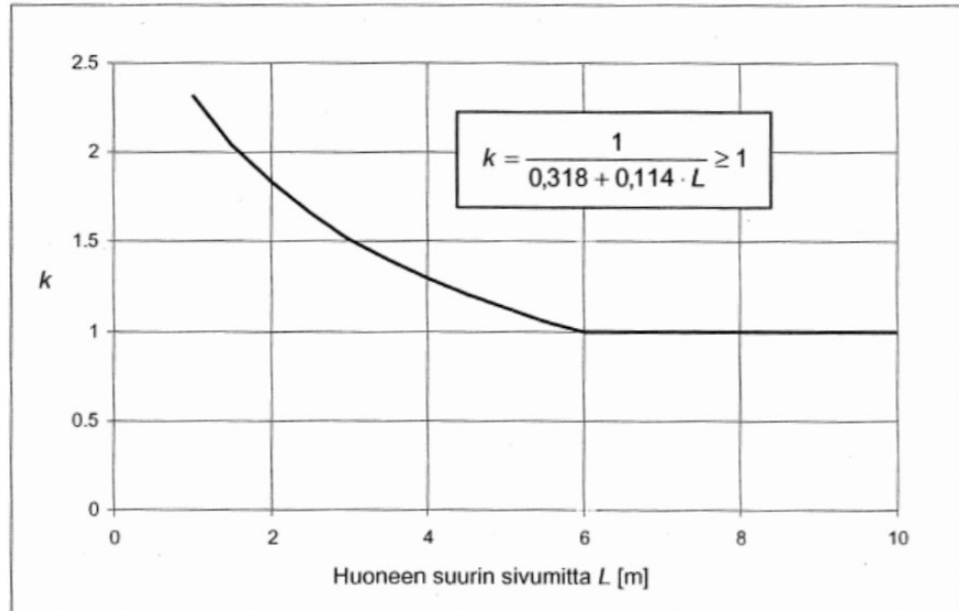
Seuraavat värähtelytarkastelun ohjeet ja kaavat on tarkoitettu kuvan 15 mukaisille suorakaiteen mallisille lattioille. Tarkasteltava alue voi olla osana suurempaa lattia-aluetta. (Talja ym., 2002, s. 20)



Kuva 15. Välipohjan osa-alue, joka sisältää sekundaaripalkit $(EI)_l$ ja primääripalkit $(EI)_L$ (Talja ym., 2002, s. 21).

Asuin- ja toimistohuoneistoissa alin ominaistaajuus on oltava ≥ 9 Hz. Jos lattiarakenteen alin ominaistaajuus on alle 9 Hz, on rakenteelle tehtävä erityistarkasteluja. (RIL 205-1-2017, s. 99)

Alimman ominaistajuuden ollessa $\geq 9\text{Hz}$, tarkastetaan, että ehto, $\delta \leq 0,5\text{ mm}$, toteutuu. Ehdossa δ on 1 kN staattisesta pistevoimasta aiheutuva suurin hetkellinen taipuma lattiapalkin kohdalla. Sallittua 0,5 mm taipumaa voidaan korottaa kuvan 16 kertoimella k . (RIL 205-1-2017, ss. 99–100)



Kuva 16. Suurennuskerroin k (RIL 205-1-2017, s. 100).

Kertoimelle k on myös kaava

$$k = \frac{1}{0,318 + 0,114 \cdot x} \quad (8)$$

jossa x [m] on lattian suurin pituus tai leveys. Kerrointa voidaan käyttää, mikäli suurin pituus tai leveys on korkeintaan 6 m. (TRY 17/2005, s. 4)

Yhteen suuntaan kantavan lattiarakenteen alin ominaistajuus voidaan laskea kaavalla

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad (9)$$

Kahteen suuntaan kantavan, eli neljältä sivulta tuetun lattiarakenteen alimman ominaistajuuden kaava

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[2\left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad (10)$$

jossa

l	lattiarakenteen jänneväli [m]
b	lattiarakenteen leveys [m]
$(EI)_l$	lattian kantavaa suuntaa l vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohti [Nm^2/m]
$(EI)_b$	lattian poikittaissuuntaa b vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohti [Nm^2/m]
m	lattian oman painon ja 30 kg/m^2 hyötykuormasta yhteen laskettu massa [kg/m^2] (RIL 205-1-2017, s. 100)

Lattiapalkin kohdalla olevan $F=1 \text{ kN}$ pistekuorman aiheuttama taipuma yhteen suuntaan kantavalla lattiarakenteella voidaan laskea kaavalla

$$\delta = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F \cdot l^2}{42 \cdot k_\delta \cdot (EI)_l} \\ \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot s \cdot (EI)_l} \end{array} \right. \quad (11)$$

jossa

s	lattiapalkkien väli [m]	
k_δ	$\sqrt[4]{\frac{(EI)_B}{(EI)_l}}$, jos $k_\delta \leq \frac{B}{l}$

(12)

Yllä olevaa kaavaa voidaan käyttää myös kahteen suuntaan kantavalle lattialle, jolloin k_δ ei tarvitse käyttää rajoitusta $\leq b/l$. (RIL 205-1-2017, s. 101)

Näitä kaavoja voidaan käyttää sellaisenaan myös kaksi tai useampi aukkoisille jatkuville lattiapalkeille tai -laatoille. Lattiarakenne ei kuitenkaan saa jatkua yhtenäisenä huoneistojen välillä. (RIL 205-1-2017, s. 101)

3.2.1 Yhdistetty värähtely

Puurakenteiden mitoitukseen käytettävä Eurokoodi 5 ei vaadi yhdistetyn värähtelyn mitoittamista, mutta siitä on mainittu VTT tiedotteessa Lattioiden värähtelyt, suunnittelu ja kokeellinen arviointi, joten se on tässä opinäytetyössä käytettävään esimerkkikohteeseen haluttu tehdä. Yhdistetty värähtely mainitaan myös esimerkiksi Teräsrakenneyhdistyksen normikortissa, joka käsittelee kävelystä aiheutuvaa lattioiden värähtelyä.

Kun sekundaaripalkit (pituus l) tukeutuvat primääripalkkeihin (pituus $L=b$), systeemin yhdistetty alin ominaistaajuus voidaan arvioida palkkien ominaistaajuuksien avulla kaavalla

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0,I}^2} + \frac{1}{f_{0,L}^2}}} \quad (13)$$

jossa

$f_{0,I}$ lasketaan kaavalla (9)

$f_{0,L}$ saadaan kaavasta

$$f_{0,L} = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (14)$$

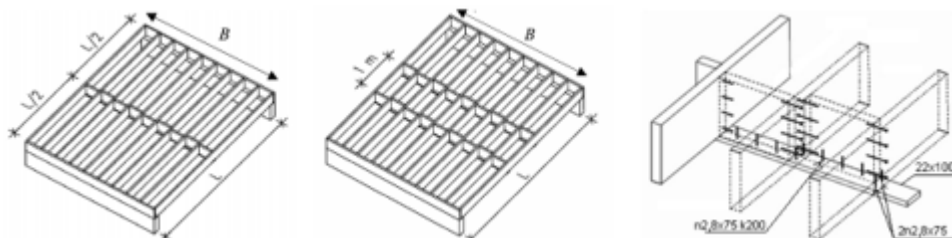
$(EI)_L$ on primääripalkkien ja pintalaatan yhteinen taivutusjäykkyys pituusyksikköä kohden. (Talja ym., 2002, s. 22; TRY 17/2005, s. 6)

3.2.2 Yksinkertaistettu värähtelymitoitus

Yksinkertaistettua värähtelymitoitusta voidaan käyttää, jos asuin- tai toimistorakennuksen välipohja on kuvan 17 mukainen. Jos lattialevyt on liittattu lattiapalkkeihin rakenteellisesti kuvan 17 mukaisesti, $(EI)_I$ saadaan laskemalla yhteen $(EI)_P$ ja $(EI)_T$. $(EI)_P$ on palkin taivutusjäykkyys ja $(EI)_T$ T-poikkileikkauksen taivutusjäykkyys. Jos levyn liimaus tehdään työmaalla, liittovaikutuksesta $(EI)_I$, voidaan hyödyntää vain 50 %. $(EI)_I$ sijoitetaan kaavaan (9). (Puuinfo, 2018, s. 22)

$$(EI)_T \approx (2,2 - 0,1 \cdot L) \cdot (0,4 + s) \cdot (EI)_P \quad (15)$$

Kaava (15) pätee lattiapalkin leveyden ollessa $b \leq 50$ mm. Lattiapalkin tai tuplapalkin leveyden ollessa $b = 50-100$ mm, kaavalla saatavaa jäykkyyttä pienennetään kertoimella $k = 1,15-0,003b$. Kaavaan jänneväli L ja palkkijako s sijoitetaan metreinä. (Puuinfo, 2018, s. 22)



Kuva 17. Poikittaisjäykistetty palkkirakenteinen välipohja, kahta poikittaisjäykistelinjaa käytetään, kun $L > 4$ m (Puuinfo, 2018, s. 22).

Jos välipohjaan tulee betonivalu, se voidaan huomioida taivutusjäykkyydessä $(EI)_L$ siten, että lasketaan yhteen lattiapalkin ja halkeilemattoman

betonilaatan taivutusjäykkyydet. Betonilaatta ajatellaan palkkijaon s levyisenä palkkina. Neljältä reunalta tuetun betonikantisen välipohjan ominaistaajuutta, joka saadaan kaavalla (9), voi korottaa kertoimella k_f , jossa B on lattian tukiväli metreinä poikittaissuunnassa. (Puuinfo, 2018, s. 22)

$$k_f = \sqrt{\frac{6}{B}} \geq 1 \quad (16)$$

Yksinkertaistetussa mitoituksessa on myös tarkistettava, että ominaistaajuus on vähintään 9 Hz. Myös 1 kN aiheuttama taipuma on tarkistettava, mutta yksinkertaistetussa värähtelymitoituksessa sille on kaava

$$k_B \cdot k_s \cdot \delta_L \leq 0,5 \text{ mm} \quad (17)$$

jossa

δ_L	laskennallinen taipuma, johtuen 1 kN pistekuormasta, kun kuorman jakautumista viereisille palkeille ei huomioida ja kun taivutusjäykkyytenä käytetään (EI)
k_B	lattian poikittaissuunnan jäykkyyden ja huoneen koon huomioiva kerroin
k_s	kerroin, joka riippuu lattiapalkkien välisestä etäisyydestä. (RIL 205-1-2017, s. 199)

$$k_B = 0,1 + \frac{L}{30} \quad (18)$$

Lattian jänneväli L sijoitetaan kaavaan metreinä. Kerroin k_s saadaan kaavasta

$$k_s = \frac{s}{0,6} \geq 0,3 \quad (19)$$

Palkkijako s sijoitetaan kaavaan metreinä. (RIL 205-1-2017, s. 199)

3.2.3 Värähtelymitoitus taipuman kautta

Lattian alin ominaistaajuus voidaan laskea myös hyödyntämällä lattiapalkin tai -laatan taipumaa. Tarkoitus siinä on, että lasketaan värähtelymitoituksen ohjeiden mukaan rakenteeseen tuleva kuorma, eli $g_k + 0,3 \text{ kN/m}^2$. Värähtelymitoituksen kaavaan kuormat asetetaan kg/m^2 , mutta taipuman kaavaan kilonewtoneina. (Kotiranta, 2020b) Tämä kuorma sijoitetaan taipuman kaavaan

$$\Delta := \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (20)$$

johon L sijoitetaan millimetreinä ja kimmomoduuli (E) N/mm^2 sekä jäyhyysmomentti (I) mm^4 , w on palkille tuleva kuorma (kN) (University of California Berkeley, department of civil and environmental engineering, n.d.). Tämä taipuman kaava on yksinkertaisesti tuetulle ja tasaisesti kuormitetulle palkille. Taipuma sijoitetaan kaavaan

$$f_1 := \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot E \cdot I}{w \cdot L^4}} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{5}{384}} \cdot \sqrt{g \cdot \frac{384}{5} \cdot \frac{E \cdot I}{w \cdot L^4}} = 0.18 \cdot \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad (21)$$

tässä kaavassa g on maan vetovoimasta aiheutuva kiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$. (University of California Berkeley, department of civil and environmental engineering, n.d.). Jos käytetään pidempää kaavaa, jossa taipuma on mukana, saadaan hieman tarkempi tulos. Tämän laskennan jälkeen tarkistetaan ihan normaalisti 1 kN pistekuormasta aiheutuva taipuma. (Kotiranta 2020b)

3.3 Teräsprofiilit

1 kN paikallisesta ominaiskuormituksesta aiheutuva välipohjan kokonais- δ_0 tarkistetaan, jos välipohjan ominaistaajuus on yli 10 Hz (TRY 17/2005, s. 5).

Lattiat voidaan jakaa värähtelyluokkiin taulukon 5 mukaisesti. Taulukossa 6 on esitetty suositus värähtelyluokituksesta asuin- ja toimistorakennuksissa. (TRY 17/2005, s. 4)

Taulukko 5. Lattioiden värähtelyluokat (TRY 17/2005, s. 4).

Värähtelyluokka	Kriteeri lattian rungolle		Kriteeri paikalliselle taipumalle
	Korkeataajuiset lattiat	Matalataajuiset lattiat	Sekä korkea- että matalataajuiset lattiat
A	$\delta_0 < 0,12 \text{ mm}$	$a < 0,03 \text{ m/s}^2$	$\delta_1 < 0,12 \text{ mm}$
B	$\delta_0 < 0,25 \text{ mm}$	$a < 0,05 \text{ m/s}^2$	$\delta_1 < 0,25 \text{ mm}$
C	$\delta_0 < 0,50 \text{ mm}$	$a < 0,075 \text{ m/s}^2$	$\delta_1 < 0,50 \text{ mm}$
D	$\delta_0 < 1,0 \text{ mm}$	$a < 0,12 \text{ m/s}^2$	$\delta_1 < 1,0 \text{ mm}$
E	$\delta_0 > 1,0 \text{ mm}$	$a > 0,12 \text{ m/s}^2$	$\delta_1 > 1,0 \text{ mm}$

Taulukko 6. Suositus värähtelysuosituksesta asuin- ja toimistorakennuksissa (TRY 17/2005, s. 4).

Värähtelyluokka	Värähtelyluokan soveltamisalue
A	Normaaliluokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Erikoisluokka, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
B	Alempi luokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Ylempi luokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
C	Normaaliluokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
D	Alempi luokka asuinrakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa. Esim. omakotitalojen ullakot tai vapaa-ajan asunnot.
E	Luokka, jolle ei aseteta rajoituksia.

3.4 Puupalkit

Puurakenteiden suunnittelua käsittelevän Eurokoodi 5 standardin SFS-EN 1995-1-1 mukaan värähtelylle on tehtävä erityistarkastelu, jos asuinrakennuksen lattian alin ominaistaajuus on alle 8 Hz. Samaa Eurokoodia käsittelevän RIL 205-1-2017 antama arvo on 9 Hz ja se on yleisemmin käytetty vaatimus. Värähtelyn taajuuden ollessa yli 8 Hz, tarkistetaan, että seuraavat ehdot täyttyvät

$$\frac{w}{F} \leq a \quad \text{mm/kN} \quad (22)$$

$$v \leq b^{(f_1 \zeta - 1)} \quad \text{m/(Ns}^2) \quad (23)$$

jossa

- w staattisesta pistekuormasta F aiheutuva suurin hetkellinen taipuma missä tahansa kohdassa lattiaa, huomioiden kuorman jakautuminen.
- v yksikköimpulssista aiheutuva pystysuoran värähtelynopeuden suurin alkuarvo (m/s), sen aiheuttaa ideaalinen yksikköimpulssi 1 Ns, jonka ajatellaan vaikuttavan lattian kohdassa, joka aiheuttaa suurimman vasteen. Komponentteja, jotka ovat yli 40 Hz ei tarvitse huomioida.
- ζ värähtelymuotoa vastaava vaimennussuhde, sille voidaan käyttää arvoa 0,001 eli 1 %, jos jotain toista arvoa ei voida osoittaa oikeammaksi. (SFS-EN 1995-1-1, 2014, s. 51)

4 PALOSUOJAUS

Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä kaikkea palomitoitukseen ja rakennusten paloturvallisuuteen liittyvää. Käsiteltäviä asioita ovat paloluokat ja palonkestovaatimukset, sekä paloluokan asettamat vaatimukset rakenteiden pinnoille. Esimerkkikohteena on 2-kerroksinen koulu-/päiväkotikohde, joten tähän on nostettu esille pääasiassa sellaisia rakennuksia koskevia määräyksiä. Myös esimerkiksi ovia ja ikkunoita koskevat määräykset on jätetty pois, koska tämä työ käsittelee välipohjarakenteita.

Vaadittavaan palonkesto aikaan vaikuttaa rakennuksen käyttötarkoitus ja koko sekä korkeus. Paloluokkia on neljä, P1, P2, P3 sekä P0, jota käytetään silloin, kun rakennus on suunniteltu oleellisilta osin tai kokonaan käyttäen oletettuun palonkehitykseen perustuvaa menettelyä. (Suomen RakMk 848/2017, s. 3)

Rakennukset on jaettu ryhmiin niiden käyttötarkoituksen perusteella, koulut ja päiväkodit kuuluvat tällä ryhmittelyllä kokoontumis- ja liiketiloihin. Tämän ryhmittelyn perusteella voidaan määrittää myös mihin palokuormaryhmään rakennus kuuluu. Ryhmiä on kolme ja koulut ja päiväkodit kuuluvat niistä ensimmäiseen, jossa palokuorma on alle 600 MJ/m². (Suomen RakMk 848/2017, ss. 3–4)

4.1 Paloluokat

Paloluokissa P3 ja P2 on käyttötarkoitusta ja kokoa koskevia rajoituksia. P3-paloluokkaan kuuluu pienempiä, pääasiassa 1-kerroksisia rakennuksia. Käyttötarkoitukseltaan P3-luokkaan kuuluu joko hoitolaitoksia, tuotanto- tai varastorakennuksia, erillisenä rakennuksena oleva maataloustuotteiden kuivaamo, autonsuoja ja pienemmät asuinrakennukset. Asuinrakennukset voivat olla 2-kerroksisia tietyin korkeus- ja kerrosalarajoituksin ja kunhan kerrokset eivät kuulu eri huoneistoihin. (Suomen RakMk 848/2017, s. 5)

P2-paloluokkaan kuuluu samoja rakennuksia kuin P3-luokkaan, mutta ne voivat olla korkeampia ja kerrosalaltaan suurempia. Lisäksi P2-luokkaan kuuluu majoitusrakennuksia, työpaikkarakennuksia, kokoontumis- ja liikerakennuksia ja asuinrakennus, jonka kaikki kerrokset kuuluvat asunnoittain samaan asuinhuoneistoon, näissä rakennuksissa ei saa olla tiloja, joiden palokuorma on yli 1200 MJ/m². Rakennukset kuuluvat P1-paloluokkaan, jos ne ylittävät korkeuden tai kerrosalan puolesta P2-luokalle asetetut vaatimukset. (Suomen RakMk 848/2017, s. 5)

Paloluokitukseen vaikuttaa myös henkilömäärä. Esimerkiksi kokoontumis- ja liiketiloissa 1-kerroksisen rakennuksen henkilömäärää P2-paloluokassa ei ole rajoitettu. Rakennuksen ollessa 2-kerroksinen, henkilömäärä on rajoitettu 250 henkilöön. Jos rakennuksessa on automaattinen

sammutuslaitteisto, voidaan joidenkin rakennusten henkilömäärä tuplata. Vaikka rakennus kokonsa puolesta kuuluisi P2-luokkaan, voi henkilömäärä nostaa sen paloluokkaan P1. (Suomen RakMk 848/2017, ss. 5–6)

Rakennuksissa, joissa on esimerkiksi eri käyttötarkoituksia, rakennuksen eri osat voivat kuulua eri paloluokkiin. Tälle on kuitenkin edellytyksenä, että palon leviäminen estetään palomuurilla. Uloskäytävät rakennusosissa, jotka palomuuuri erottaa toisistaan, rakennetaan erillisiksi, jotta palomuurissa mahdollisesti olevaa ovea ei tarvitse palotilanteessa käyttää. (Siikanen, 2017, s. 92)

4.2 Palonkestovaatimukset

Rakenteiden kantavuuden mitoitus palotilanteessa voidaan perustaa joko paloluokitukseen, tai oletettuun palonkehitykseen. Jos paloluokitukseen perustuvassa mitoituksessa vaaditaan tiiveydeltä (E) ja eristävyydeltä (I) pidempää palonkesto-aikaa kuin kantavuudelta (R), käytetään myös kantavuudelle pidempää palonkesto-aikaa. Kantavien rakenteiden vaatimukset luokissa P1 ja P2 näkyvät taulukossa 7. Luokkavaatimuksen täyttyminen pitää todistaa joko kokeellisesti, laskennallisesti, yhdistämällä kokeiden ja laskennan tulokset tai taulukkomitoituksella. Luokkavaatimuksille on standardoitu lämpötila-aikakäyrä. (Suomen RakMk 848/2017, s. 6) Tässä on esitetty paloluokitukseen perustuva kantavuuden määräytyminen. Palomääräyksiä koskevassa säädöksessä ei oteta kantaa siihen, kumpaan kantavuuden mitoitus kannattaa perustaa.

Rakennuksesta tai sen osista ei saa palon takia aiheutua vaaraa sortumalla määrättyinä aikana palon alkamisesta. Joissakin tapauksissa voi henkilömäärän tai vahinkojen suuruuden takia olla tarpeen, että rakennus kestää sortumatta koko palokuorman palamisen ja jäähtymisen. (Siikanen, 2017, s. 97)

Taulukko 7. Kantavien ja jäykistävien rakenteiden vaatimukset P1 ja P2 paloluokissa (Suomen RakMk 848/2017, s. 7).

Rakennus	Rakennuksen paloluokka ja palokuormaryhmät MJ/m ²			P2
	P1			
	yli 1200	600-1200	alle 600	-
1-2-kerroksinen rakennus, yleensä	R 120 (R60 *)	R 90 (R60 *)	R 60	R 30
– hoitolaitokset, majoitustilat	R 120, A2 (R60 *, A2)	R 90, A2 (R60 *, A2)	R 60, A2	R 30
– ylin kellarikerros	R 120, A2 (R90 *, A2)	R 90, A2 (R60 *, A2)	R 60, A2	R 60, A2
– yläpohja rakennuksessa, jossa ei ole ullakkoa ja rakenne on kantavan rungon olennainen osa 1)	R 60	R 60	R 60	R 30
– yksikerroksinen tuotanto- ja varastorakennus	R 60 (R30 *) (R15, A2 *)	R 60 (R30 *) (R15, A2 *)	R 60 (R30 *) (R15, A2 *)	R 30 (R15 *) (R15, A2)
– yläpohja rakennuksessa, jossa ei ole ullakkoa ja rakenne ei ole kantavan rungon olennainen osa 1)	R 15	R 15	R 15	R 15

Yli 2-kerroksinen rakennus, jonka korkeus on enintään 28 m, yleensä	R 180, A2 (R90 *, A2)	R 120, A2 (R60 *, A2)	R 60, A2	R 60 * # 3) 4)
– ylin kellarikerros	R 180, A2 (R90 *, A2)	R 120, A2 (R60 *, A2)	R 60, A2	R 60 * A2
– asuinrakennus, asunto, ylin kerros	R 60 +	R 60 +	R 60 +	R 60 * # 3)
– asuinrakennus, asunto, kaksi ylintä kerrosta 2)	R60 * #	R60 * #	R60 * #	R 60 * # 3)
– yli 2-kerroksinen asuinrakennus, jonka korkeus on enintään 14 m ja jonka kerrokset kuuluvat asunnoittain samaan huoneistoon	R 45, A2 (R30, A2 *)	R 45, A2 (R30, A2 *)	R 45, A2 (R30, A2 *)	R 45 # (R30 * #)
Yli 2-kerroksinen rakennus, jonka korkeus on yli 28 m, mutta enintään 56 m	R 240, A2 (R180 *, A2)	R 180, A2 (R120 *, A2)	R 120, A2 (R90 *, A2)	ei mahdollinen
Yli 2-kerroksinen rakennus, jonka korkeus on yli 56 m	R180 *, A2	R120*, A2	R 120 *, A2	ei mahdollinen
Ylimmän kellarikerroksen alapuolella sijaitsevat kellarikerrokset	R 240, A2 (R180 *, A2)	R 180, A2 (R120 *, A2)	R 120, A2	R 120, A2 (R90 *, A2)

Parvekkeiden palonkestävyysvaatimus on puolet kerroksen kantavien rakenteiden vaatimuksesta. Kantavien rakenteiden on oltava vähintään D-s2, d2 -luokan tarviketta, ellei taulukossa toisin mainita.

Uloskäytävän porrassyöksen ja -tasanteen luokkavaatimus on R 30. Ylimmän kellarikerroksen alapuolella sijaitsevan kellarikerroksen uloskäytävän porrassyöksen ja -tasanteen luokkavaatimus on R 60. Jos kantaville rakenteille on asetettu luokkavaatimus A2-s1, d0, tämä koskee myös porrassyöksiä ja -tasanteita. Yli 2-kerroksisen P1-paloluokan rakennuksen uloskäytävän porrassyökset ja -tasanteet on tehtävä vähintään A2-s1, d0 -luokan tarvikkeista.

Ullakon tai ontelon vesikattorakenteille, jotka eivät ole rakennuksen rungon olennaisia kantavia tai palossa runkoa jäykistäviä rakenteita, ei aseteta palonkestävyysvaatimusta.

1) Kantavan rungon tai jäykisteiden olennaisia osia ovat pääkannattajat, runkoa jäykistävät sekundäärirakennattajat ja yläpohjan jäykisteet ja muut sellaiset yksittäiset rakenteet, jotka toimivat yläpohjan stabiliteetin säilyttämiseksi, sekä näiden väliset liitokset.

2) Kun kolme ylintä kerrosta, lukuun ottamatta uloskäytävää, on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla.

3) Huom. 24 § 3 momentissa esitetyt vaatimukset.

4) Jos käyttötarkoituksen mukainen palokuormaryhmä on 600–1200 MJ/m², luokkavaatimus on R 90 * # 3)

* Rakennus on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla.
Lämmöneristeiden ja muiden täytteiden on oltava vähintään A2-s1, d0 -luokkaa.
+ Lämmöneristeiden ja muiden täytteiden on oltava eristävältä osaltaan vähintään D-s2, d2 -luokkaa.
A2 Kantavien rakenteiden on oltava vähintään A2-s1, d0 -luokkaa.

Jossakin tapauksissa rakennus on jaettava palo-osastoihin. Osastoihin jaakoa voidaan edellyttää rakennuksen koon, kerrosten tai käyttötarkoituksen takia. Palo-osastoinnin tarkoitus on rajoittaa palon leviämisen lisäksi myös savun leviämistä, sen tarkoitus on turvata poistumista ja helpottaa pelastus- sekä sammutustöitä. Palo-osastointi voidaan tehdä kerroksittain ja tiettyin rajoituksin siten, että palo-osastoon kuuluu useampia kerroksia. 2-kerroksiset kokoontumis- ja liiketilat jaetaan P1 ja P2 -luokissa 2400m² osastoihin. Jos tilassa on automaattinen sammutuslaitteisto, voidaan kokoontumis- ja liiketilojen osastointia nostaa P1-luokassa 12000m² ja P2-luokassa 4800m². (Suomen RakMk 848/2017, ss. 9–10)

Osastoivan rakennusosan ja siihen liittyvien laitteiden ja varusteiden pitää estää palon leviäminen määrätyn ajan palo-osastosta toiseen. Osastovien osien on täytettävä alla olevan taulukon (taulukko 8) vaatimukset. Osastoviksi rakennusosaksi voidaan hyväksyä myös osittain tai kokonaan osa, joka täyttää vaatimukset vain tiiveyden (E) osalta, henkilöiden poistuminen ei kuitenkaan saa tällöin vaarantua eikä palo saa leviää osastojen välillä vaaditun palonkestoajan aikana. (Suomen RakMk 848/2017, s. 10)

Taulukko 8. Osastoivien rakennusosien vaatimukset (Suomen RakMk 848/2017, s. 11).

	Rakennuksen paloluokka ja kerrosluku sekä palokuormaryhmä MJ/m ²					
	P1			P2 yli 2 kerrosta	P21–2 kerrosta	P3
	yli 1200	600-1200	alle 600	-	-	-
Kerrokset, yleensä	EI 120 1) (EI 60 *) 1)	EI 90 1) (EI 60 *) 1)	EI 60 1)	EI 60 2)	EI 30	EI 30
– yli 56 metriä korkea rakennus	EI 90, A2 *	EI 60, A2 *	EI 60, A2 *	ei mahd.	ei mahd.	ei mahd.
– yläpohja, jos osastoivuusvaatimus	EI 60	EI 60	EI 60	EI 60 2)	EI 30	EI 30
– tuotanto- ja varastotilat, palovaarallisuusluokka 1, pinta-alaosastointi	EI-M 90, A1 (EI-M 60, A1 *)	EI-M 90, A1 (EI-M 60, A1 *)	EI-M 90, A1 (EI-M 60, A1 *)	ei mahd.	EI-M 90, A1 (EI-M 60, A1 *)	EI-M 90, A1 (EI-M 60, A1*)
– tuotanto- ja varastotilat, palovaarallisuusluokka 2, pinta-alaosastointi	EI-M 120, A1 (EI-M 60, A1 *)	EI-M 120, A1 (EI-M 60, A1 *)	EI-M 120, A1 (EI-M 60, A1 *)	ei mahd.	EI-M 120, A1 (EI-M 60, A1 *)	EI-M 60, A1 *
– autosuojat, pinta-alaosastointi	EI 60, A2	EI 60, A2	EI 60, A2	ei mahd.	EI 60	EI 30
Ullakon osastoivat seinät, pinta-alaosastointi	EI 30	EI 30	EI 30	EI 30	EI 30	EI 30
Kellarikerrokset	EI 120, A2 (EI 90, A2 *)	EI 90, A2 (EI 60, A2 *)	EI 60, A2	EI 60, A2	EI 60, A2	EI 30, A2 3)

1) Yli 2-kerroksisen P1-paloluokan rakennuksen uloskäytävien osastoivat rakennusosat on tehtävä vähintään A2-s1, d0-luokan tarvikkeista.

2) Huom. 24 §:n 3 momentissa esitetyt vaatimukset.

3) Yhdelle asunnolle kuuluvassa kellarissa luokkavaatimus on EI 30.

A1 Tarvikkeet A1 luokkaa
A2 Tarvikkeet vähintään A2-s1, d0-luokkaa
* Kun rakennus tai tila on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla.

Jos osastoivan osan läpi viedään putkia, roiloja, kanavia, johtoja, savupiipuja tai hormeja tai kuljetinlaitteistoa, niiden vaatimat läpiviennit eivät saa heikentää rakennusosan palon osastoivuutta olennaisesti. Tämä on huomioitava esimerkiksi talotekniikan kanssa. (Suomen RakMk 848/2017, s. 12)

4.3 Rakennustarvikkeiden luokat

Rakennustarvikkeiden luokka riippuu siitä, miten ne osallistuvat paloon. Luokkiin jakamisessa huomioidaan se, miten herkästi materiaali syttyy, sen palon leviämiseen vaikuttavat ominaisuudet sekä tuottaako se savua tai palavia pisaroita. (Lahtela, 2018, s. 24) Rakennustuotteiden luokituksessa käytetään standardia SFS-EN 13501. Samaa käytetään rakennusosien luokitukseen. (Siikanen, 2017, s. 90)

A1-luokkaan menevät materiaalit ovat palamattomia ja vain yhtä materiaalia. Luokassa A2-s1, d0 materiaalit koostuvat yleensä useammasta materiaalista, mutta myös osa-aineille on annettu vaatimuksia. Rakennustarvikkeet, jotka kuuluvat muihin luokkiin, voivat koostua vain yhdestä tai useammasta aineesta, mutta niiden osa-aineiden ominaisuuksia ei ole tavallisesti ilmoitettu suoritusosoilmoituksessa. (Lahtela, 2018, s. 24)

Luokitus perustuu siihen, miten rakennustarvike käyttäytyy palon alussa. Luokista vain A1 ja A2-s1, d0 ovat sellaisia, että niitä voidaan pitää palokäyttäytymistä kuvaavana luokkana, koska näihin kuuluvat materiaalit ovat palamattomia, joten ne käyttäytyvät myöhäisemmässä palonvaiheessa samalla tavalla kuin alussa. Rakennustarvikkeissa, jotka kuuluvat muihin luokkiin, voi olla esimerkiksi pinnoite, joka toimii palon alussa, mutta myöhäisemmässä vaiheessa rakennustarvikkeen ydin voi osallistua paloon. Tästä johtuen nykyisessä rakennusten paloturvallisuutta koskevassa asetuksessa on vaatimuksia myös tarvikkeen ytimelle. Sen takia rakennustarvike, joka on luokiteltu pelkästään sen pinnan perusteella, ei välttämättä kaikissa tapauksissa täytä luokkavaatimuksia, tällainen tuote voi olla esimerkiksi lämmöneriste. Rakennustarvikkeiden luokkamerkintöjen muodostuminen esitetään taulukossa 9. (Lahtela, 2018, s. 24)

Luokitus tehdään standardien mukaisilla polttokokeilla. A2–D-luokissa tutkitaan myös, muodostuuko savua tai palavia pisaroita. Tuotteen luokka selvitetään valmistajalta, yleensä sen löytää tuotteen suoritusosoituksesta. (Lahtela, 2018, s. 24)

Taulukko 9. Rakennustarvikkeiden luokkamerkintöjen muodostuminen (Lahtela, 2018, s. 24).

Osallistuminen paloon		Savun tuotto		Palavien pisaroiden ja osien tuotto	
Kuvaus	Merkintä	Kuvaus	Merkintä	Kuvaus	Merkintä
Ei osallistu paloon	A1	Erittäin vähäinen	s1	Ei esiinny	d0
Osallistuu erittäin rajoitetusti	A2	Vähäinen	s2	Nopeasti sammuvia esiintyy	d1
Osallistuu hyvin rajoitetusti	B	Muu kuin s1 tai s2	s3	Muu kuin d0 tai d1	d2
Osallistuu rajoitetusti	C				
Osallistuminen on hyväksyttävää	D				
Käyttäytyminen on hyväksyttävää	E				
Käyttäytymistä ei ole määritetty	F				

Luokat A1 ja F esitetään ilman lisämääreitä. Jos luokkana on E ilman lisämääreitä, se tarkoittaa, ettei tuotteesta irtoa palavia pisaroita. Muilla luokilla on lisämääreet, esimerkiksi A2-s1-d0. Lattiapäällysteitä tarkoittavissa luokissa on alaindeksi FL. (Siikanen, 2017, s. 91)

Rakennuksille on myös sisä- ja ulkopinnoille annettu luokkavaatimuksia. Pintaluokat ovat tärkeitä palon leviämisen, lämmöntuoton, leiskahduksen ja savun ja pisaroiden muodostumisen kannalta. Kun käytetään puupohjaisia tuotteita, niiden asennuksella, tiheydellä, paksuudella sekä alusrakenteella on iso merkitys niillä saavutettaviin pintaluokkiin. (Lahtela, 2018, s. 24) Esimerkiksi massiivipuutuotteilla voidaan saavuttaa pintaluokka D-s2, d0, joka on sama kuin massiivipuuseen rakennustarvikkeen luokka. Teräkselle vastaavat luokat ovat A1. (Lahtela, 2018, s. 27)

4.4 Pintojen vaatimukset

Pinnoille asetetut vaatimukset eivät koske pinta-alaltaan pieniä osia, kuten ovet, ikkunat, kiinnityspinnat, käsijohteet, jalkalistat, saumalaudat ja levyjen väliset saumat. Rakennuksen ollessa korkeintaan 2-kerroksinen, vaatimukset eivät koske myöskään palkkeja ja pilareita, jos ne täyttävät R 30 ja D-s2, d2 -luokkavaatimukset. Pinnat voidaan päällystää luokittelemattomalla materiaalilla, kuten silote-, tasoite- tai maalikerroksella tai tapetilla, kunhan se ei olennaisesti vaikuta pinnalta vaadittaviin ominaisuuksiin. (Suomen RakMk 848/2017, s. 13)

Jos palo-osaston käyttötarkoitus huomioiden palon syttymisen tai leviämisen vaara on tavallista pienempi, voidaan pinnoille hyväksyä myös yhtä pääluokkaa pienemmät vaatimukset. Tämä ei kuitenkaan koske tiloja, joiden vaatimus on D-s2, d2 -luokka. Alla olevaan taulukkoon (taulukko 10) on otettu kokoontumis- ja liiketilöiden pintavaatimukset. (Suomen RakMk 848/2017, s. 13)

Taulukko 10. Kokoontumis- ja liiketilöiden pintavaatimukset (Suomen RakMk 848/2017, s. 13).

Käyttötarkoitus	Pinta	Rakennuksen paloluokka		
		P1	P2	P3
Kokoontumis- ja liiketilät				
– enintään 300 m ² palo-osasto: ravintolat, myymälät, koulut, liikuntahallit, teatterit, kirkot, päiväkodit ja päivähoitolaitokset	Seinät ja katto	D-s2, d2	D-s2, d2 4)	D-s2, d2
– yli 300 m ² palo-osasto: ravintolat, koulut, liikuntahallit, teatterit, kirkot, päiväkodit ja päivähoitolaitokset	Seinät ja katto	C-s2, d1 (D-s2, d2*)	C-s2, d1 4) (D-s2, d2* 4))	D-s2, d2
yli 300 m ² palo-osasto: myymälät, näyttelyhallit ja kirjastot	Seinät ja katto	B-s1, d0 (C-s2, d1*)	B-s1, d0 4) (C-s2, d1* 4))	B-s1, d0 (C-s2, d1*)
	Lattiat	D _{FL} -s1	D _{FL} -s1	–
Taulukon vaatimuksia sovelletaan myös putkien, ilmaputkien tai niiden eristeiden pintoihin, jolle näiden määrä on vähäinen. Putkimaisten eristeiden osalta taulukon arvoja sovelletaan siten, että seiniä ja kattoja koskien paloon osallistumista kuvaavan luokan merkintään lisätään alaindeksi L. Savun tuottoa sekä palavaa pisarointia koskevat lisämäärät pysyvät samoina.				
4) Kun suojaverhous vaaditaan, pintaluokkavaatimus määräytyy suojaverhouksen tarvikeluokkavaatimuksen mukaan.				
* Kun tila on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla.				
- ei vaatimusta				

P2-paloluokassa 1–2-kerroksisen rakennuksen sisäpuolisten seinien ja kattojen pinnat on varustettava vähintään B-s1, d0 -luokan materiaaleista tehdyillä K₂ 10 -luokan suojaverhouksella (Suomen RakMk 848/2017, s. 13). Tämä luokitus tarkoittaa 10min suojausaikaa. Merkinnästä alaindeksi viittaa verhouksen alustan vaatimukseen, 2 tarkoittaa, että kyseistä suojaverhousta voi käyttää kaikilla alustoilla alustan tyypistä ja tiheydestä riippumatta. (Lahtela, 2018, s. 35)

Suojaverhouksen vaatimukseen on muutamia poikkeuksia, joista osa koskee vain 1-kerroksisia rakennuksia, joissa ei ole ullakkoa tai asuntoja. Näitä poikkeuksia ovat lämmöneristeet, joiden eristävä osa on luokkaa B-s1, d0. Toisena on seinä, jonka sisä- ja ulkopinnan muodostava rakennustuote, liitokset mukaan lukien, täyttää sisäpinnalta vaatimuksen B-s1, d0 ja jonka eristävyys rakennusosana on EI 15. Tämä ei koske asuntoja, majoitustiloja tai hoitolaitoksia. Viimeisenä poikkeuksena ovat palkit ja pilarit, joilla on R 30 ja D-s2, d2 -luokkien vaatimukset. (Suomen RakMk 848/2017, s. 14)

4.5 Teräsprofiilit

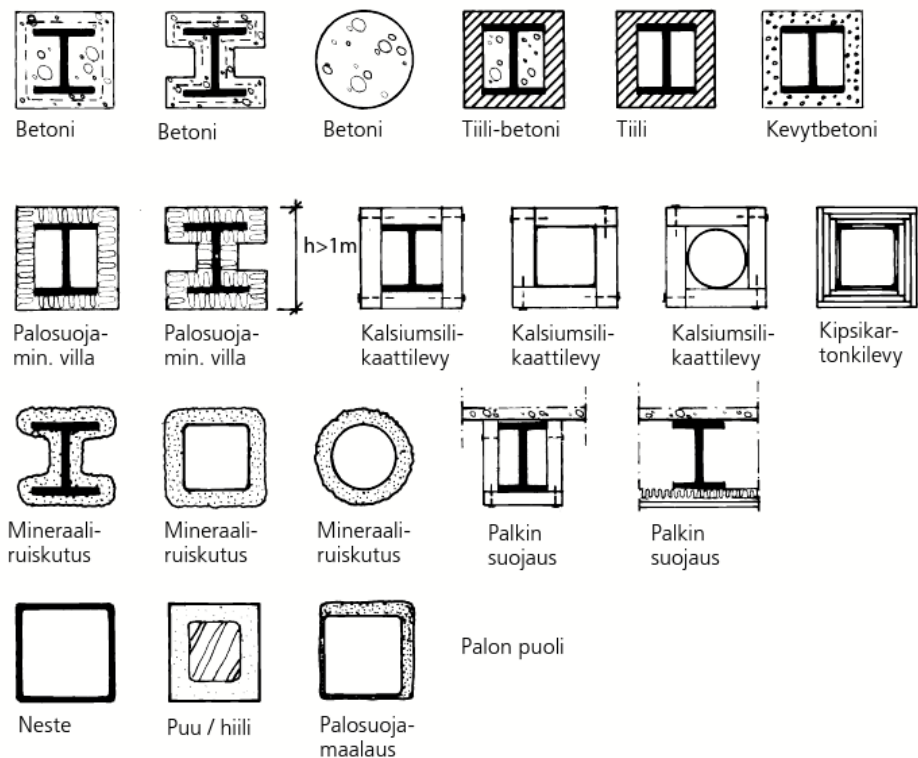
Teräs on palamaton materiaali, mutta tulipalotilanteessa se menettää lujuuttaan nopeasti. Kantavat teräsrakenteet voidaan palosuojata joko eristämällä teräs kuumista savukaasuista tai parantamalla sen lämmönsitomiskykyä. (Siikanen, 2017, s. 98)

Teräsrakenteet voivat olla joko suojaamattomia tai suojattu palosuojaineilla tai lämpösuojilla. Muita suojausmenetelmiä voivat olla esimerkiksi vesitäyttö tai rakenteen osittainen suojaaminen siten, että se jätetään seinien tai lattioiden sisään. (SFS-EN 1993-1-2, 2005, s. 25; ks. myös Siikanen, 2017, s. 98)

Aktiivisia suojaustapoja ovat automaattiset sammutuslaitteistot ja vesisumutus. Passiivinen palosuojaus voidaan tehdä esimerkiksi ylimitoittamalla rakenne, koteloimalla tai palosuojausmaalilla. (Tiainen, 2017, s. 4)

Joskus laskennallisilla tarkasteluilla voidaan saada osoitettua riittävä turvallisuus rakennuksessa ilman suojauksia, tällaista menetelmää kutsutaan toiminnalliseksi mitoituksiksi (Tiainen, 2017, s. 3). Tähän menetelmään sisältyy suojausmenetelmien yhdistelmät (Tiainen, 2017, s. 4).

Palosuojaus voidaan tehdä kuivilla tai märillä menetelmillä. Kuivissa menetelmissä palonsuojaustuotteet usein kiinnitetään mekaanisesti suojattaan teräsrakenteeseen tai sen ympärille. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi mineraalivillalevyt, vermikuliittilevyt, kalsiumsilikaattilevyt, kipsilevyt ja -elementit, sementti-selluloosalevyt ja palosuojaus kasetit. Märkiä menetelmiä taas ovat esimerkiksi mineraalikuturuiskutus, vermikuliittiruiskutus ja palosuojamaalaus. Kuvassa 18 näkyy erilaisia palosuojausmenetelmiä. (Inha, 2014, s. 138; ks. myös Siikanen, 2017 ss. 98–99)



Kuva 18. Teräksen palosuojaustapoja (Siikanen, 2017, s. 99).

Teräsrakenteiden palosuojaukseen käytettävien materiaalien ominaisuudet ja toimivuus arvioidaan standardien ENV 13381-1, ENV 13381-2 ja ENV 13381-4 koemenetelmien mukaan. Näiden standardien mukaan palosuojamateriaalien on koko kyseessä olevan paloaltistuksen ajan pysyttävä yhtenäisenä koossa ja kiinni suojattavassa rakenneosassa. (SFS-EN 1993-1-2, 2005, s. 25)

Palonkestävyyden määrittämiseen on kolme menetelmää, yksinkertainen laskentamalli, kehittynyt laskentamalli ja kokeet. Yksinkertainen laskentamalli on yksittäisen rakenteen mitoittamiseen tarkoitettu menetelmä, joka perustuu oletuksiin, jotka ovat varmallalla puolella. Kehittyneessä laskentamallissa suunnitteluperiaatteita sovelletaan realistisesti yksittäisiin tapauksiin. (SFS-EN 1993-1-2, 2005, s. 26)

4.5.1 Palosuojamaalaus ja -ruiskutus

Palonsuojamaali turpoo palotilanteessa, se voi turvota jopa 50-kertaiseksi. Maalikerros on usein melko vahva jo ennen paisumista, 0,2–5 mm. Palosuojausmaaleja on useita erilaisia ja erilaisiin sää-, lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. (Tiainen, 2017, s.4) Palosuojaus voidaan tehdä jo tehtaalla, jolloin se onnistuu optimaalisissa olosuhteissa ruiskumaalaamalla. Kuljetus ja nostot sekä asennus voivat aiheuttaa vaurioita maalipintaan. Paikkamaalaukset tehdään heti asennuksen jälkeen, mutta ne voivat kuitenkin erottua tehtaalla tehdystä maalauspinnoista. (Teräsrakenneyhdistys ry, 2017, s. 7)

Palosuojaaruiskutuksella voidaan, sen paksuuden ollessa yli 45 mm, käyttää tarvittaessa tukirauhoitteena sinkittyä teräsverkkoa, joka kiinnitetään teräksen pintaan siihen ammutuilla tai hitsatuilla nautoilla, yksi vaihtoehto on sitoa verkko teräslangalla. Palosuojaeriste ruiskutetaan joko suoraan eristettävälle pinnalle tai teräsverkon kanssa koteloksi rakenteen ympärille. (Ratu 0439, 2015, s. 12)

Vermikuliittiruiskutusta käytettäessä pyritään saamaan haluttu eristepaksuus yhdellä ruiskutuskerralla. Jollain massoilla levitys tehdään käsin 10–15 mm vahvaisina kerroksina. Yleensä vermikuliittiruiskutus ei tarvitse pinnoitusta. (Ratu 0439, 2015, s. 12)

Mineraaliruiskutuksella pinnasta tulee huokoinen ja se on pinnoitettava alueilla, jotka ovat alttiina kulutukselle. Pinnoituksen voi tehdä joko tasoitteella, kovalaastilla, lasikuitukankaalla, sementillä tai alkalinkestävillä maaleilla tai levyrakenteilla. Pinta pitää myös suojata vedeltä ja öljyltä. (Ratu 0439, 2015, s. 12)

Jos palosuojaus on tehty maalaamalla tai ruiskuttamalla, valmiit rakenteet merkitään palo-osastoittain kylteillä, joiden koko on vähintään 75x45mm. Valmiiseen pintaan on kiinnitettävä tarpeeksi monta kylttiä, joista selviää palosuojaus, merkinnässä voi lukea esimerkiksi palosuojamaalattu, rakenteen palosuojaluokka, varmennettu käyttöseloste, minä vuonna palosuojamaali tai -ruiskute on asennettu, korjaus- ja uusintamaalaukset sekä mitä palosuojaeristettä tai -maalia on käytetty. (Ratu 0439, 2015, s. 12)

4.5.2 Palosuojalevytyt

Käytettäessä mineraalivillalevyjä palosuojaukseen, ne leikataan rakenteen mittoihin. Levyt tavallisesti kiinnitetään joko mekaanisesti teräspiikeillä ja lukituslevyillä, paineilmanautoilla tyssäyshitsinauloilla tai ruuveilla. Yksi vaihtoehto on myös liimata levyt teräsrakenteeseen. Toisiinsa levyt voidaan kiinnittää joko ruuveilla, nautoilla tai hakasilla, saumojen tiiveyteen on kiinnitettävä huomiota. (Ratu 0439, s. 13)

Vermikuliitti- ja kalsiumsilikaattilevyjen leikkaus suunnitellaan siten, että niistä saadaan rakenteen ympärille vapaasti seisova kotelo, jonka taakse jää 3 mm ilmarako. Levyissä olevat pontit sijoitetaan vaakasaumaan, jotka tehdään 500 mm limityksellä. Levyt kiinnitetään toisiinsa joko niittaamalla, naulaamalla tai liimaamalla. (Ratu 0439, s. 14)

Kipsilevyjä käytettäessä rakenne ympäröidään itsekantavalla kotelolla. Levykotelon ja teräsrakenteen väliin on jätävä 3 mm ilmarako. Kotelo voidaan kiinnittää suojattavaan rakenteeseen kulmalistoilla ja itseporautuvilla ruuveilla. Levyjä voidaan tarvittaessa asentaa 1–4 kerrosta, kahden ensimmäisen kerroksen jälkeen kotelon kulmiin laitetaan L-listat, joihin

seuraavat kerrokset voidaan kiinnittää. Jos levyjä on päällekkäin, niiden saumat on limitettävä. (Ratu 0439, s. 15)

4.6 Puupalkit

Puu on palava materiaali, mutta palaessaan puu hiiltyy pinnaltaan ja puun pinnalle tuleva hiilikerros hidastaa lämmönsiirtymistä. Tämän takia kantavat puurakenteet eivät vaadi erityistä palonsuojausta, jos ne palotilanteessa säilyttävät kanto- ja suojaamiskykynsä vaaditun ajan. Kantaviin puurakenteisiin liittyvät teräsosat on aina palosuojattava, jos rakenteilta vaaditaan jotakin palonkesto-aikaa. (Siikanen, 2017, s. 84)

Hiiltymissyvyys (x) puuselle suorakaiteen muotoiselle rakennusosalle (kuva 19) voidaan laskea kaavalla

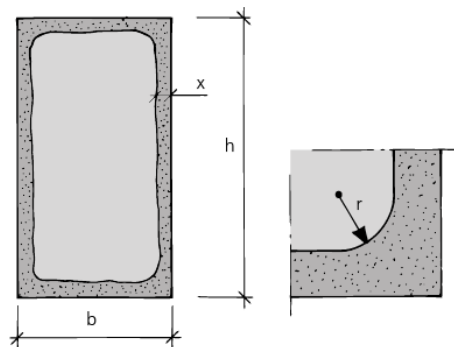
$$x = \beta * t \quad (24)$$

jossa

β puun nimellinen hiiltyminenopeus [mm/min]
 t aika minuutteina (Siikanen, 2017, s. 85)

Nurkkien kaarevuussäde hiiltymättä jääneessä osassa saadaan alla olevasta kaavasta (Siikanen, 2017, s. 85).

$$r = 0,8 * \beta * t \quad (25)$$



Kuva 19. Puun hiiltymissyvyys (Siikanen, 2017, s. 85).

Palonkestävyyssajan määrittämiseen standardipalossa Eurokoodi 5:ssä on esitetty seuraavia hiiltyminenopeuksia

- $\beta = 0,8$ mm/min, $\beta_0 = 0,65$ mm/min havupuinen sahatavara, tiheys ≥ 290 kg/m³

- $\beta = 0,7$ mm/min, $\beta_0 = 0,65$ mm/min liimapuu havupuusta, tiheys ≥ 290 kg/m³
- $\beta = 0,7$ mm/min, $\beta_0 = 0,65$ mm/min LVL ja lehtipuusta tehty sahatavara ja liimapuu, tiheys ≥ 290 kg/m³
- $\beta = 0,55$ mm/min, $\beta_0 = 0,50$ mm/min lehtipuinen sahatavara ja liimapuu, tiheys ≥ 450 kg/m³
- $\beta_0 = 0,9$ mm/min puupohjaiset paneelit ja levyt
- $\beta_0 = 1,0$ mm/min vaneri (SFS-EN 1995-1-2, 2004, s. 44; ks. myös Siikanen, 2017, ss. 85—86).

CLT:n hiiltymisnopeuden ilmoittaa valmistaja. Siihen voi vaikuttaa myös se, onko levy pysty- vai vaakasuunnassa. (Puuinfo, n.d.)

Jos levyn tiheys on jotain muuta kuin 450 kg/m³ ja paksuus muuta kuin 20 mm, hiiltymisnopeuksia muutetaan alla olevan Eurokoodi 5:n ohjeen mukaan (Siikanen, 2017, s. 86).

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 k_\rho k_h \quad (26)$$

jossa

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad (27)$$

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad (28)$$

β_0 yksidimensioinen hiiltymisnopeus [mm/min]
 ρ_k ominaistiheys [kg/m³]
 h_p levyn paksuus [mm]. (SFS-EN 1995-1-2, 2004, s. 42)

Puu säilyttää kantavuutensa niin kauan kuin poikkileikkausta on varmuuskertoimella 1. Yksinkertaisesti puun peruspalosuojaus saadaan suurentamalla poikkileikkausta täyttämään palonkestovaatimus. (Siikanen, 2017, s. 86)

Puurunkoisen rakennuksen voi tehdä kaikissa paloluokissa. Alla olevissa taulukoissa (taulukot 11 ja 12) näytetään mitä vaatimuksia päiväkodeilla ja kouluilla on P2 ja P3 -paloluokissa taulukkomitoituksen mukaan. (Lahtela, 2018, s. 18)

Taulukko 11. P2-paloluokan vaatimuksia (Lahtela, 2018, s. 21).

P2	Nimitys	Käyttö	Sprinklaus ⁵⁾	Kerrosala [m ²]	Palo-osasto [m ²]	Kork. [m]	Krs. [kpl]	Hlö ⁶⁾ [kpl]	Runko ⁷⁾
	Päiväkoti (päiväkäytössä) Koulu Ravintola	Kokoontumistila	-	ei rajoitusta	≤ 2400	≤ 9	1	ei rajoitusta	R 30
			pakollinen	ei rajoitusta	≤ 9600	≤ 9	1	ei rajoitusta	R 30
			-	ei rajoitusta	≤ 2400	≤ 9	2	≤ 250	R 30
			pakollinen	ei rajoitusta	≤ 4800	≤ 9	2	≤ 500	R 30
			pakollinen	≤ 12000	≤ 1200	≤ 14	3..4	≤ 1000	R 60

Taulukko 12. P1-paloluokan vaatimuksia (Lahtela, 2018, s. 22).

P1	Nimitys	Käyttö	Palokuormaryhmä	Sprinklaus ²⁾	Palo-osasto [m ²]	Krs. [kpl]	Runko ²⁾
	Päiväkoti (päiväkäytössä)	Kokoontumistila	alle 600 MJ/m ²	-	≤ 2400	1..2	R 60
	Koulu			pakollinen	≤ 24000	1	R 60
	Ravintola			pakollinen	≤ 12000	2	R 60

Puurakenteille riittää rakenneosatarkastelu, jos palonkestovaatimukset ovat määrättyneet paloluokkien perusteella, jotka löytyvät Ympäristöministeriön asetuksesta rakennusten paloturvallisuudesta (standardoitu lämpötila-aikakäyrä). Vaatimusten täyttyminen todistetaan laskennallisesti, kokeellisesti tai yhdistämällä näiden tulokset. Kokeellisia tuloksia käytetään, jos palonkestovaatimuksen todistamiseen ei ole riittäviä laskentamenetelmiä tai kun mitoitetaan isoa määrää samoja komponentteja tai halutaan varmistaa mitoituksella saatuja laskentaolettamuksia. Jos koetuloksia ja laskennallinen mitoitus yhdistetään, se on tehtävä siten, että laskennallisella mitoituksella saatu varmuustaso säilyy. (RIL 205-2-2019, s. 18)

4.6.1 Puun palosuojausmenetelmät

Puurakenne voidaan mitoittaa kolmella periaatteella, mitoitusperiaatteella voi olla merkittävä vaikutus rakenteen kustannuksiin. Esimerkiksi suuret liimapuupalkit voivat säilyttää riittävän kantokyvyn palotilanteessa pelkän hiiltymämitoituksen perusteella, jolloin sen erillinen palosuojaus on vain ylimääräinen kustannus. Hiiltymisnopeus valitaan sen perusteella, hiiltykö rakenne yhdestä vai useammasta suunnasta yhtä aikaa. Viilu- ja liimapuun hiiltymisnopeus yhdestä suunnasta (yksidimensionaalinen hiiltymisnopeus) on 5 mm/min pienempi kuin jos se hiiltyy useammasta suunnasta (nimellinen hiiltymisnopeus). (Lahtela, 2018, s. 80)

Puurakenteet voidaan kuitenkin joutua myös palosuojaamaan. Palosuojaus voidaan tehdä esimerkiksi kipsilevyillä, puulevyillä, palosuojaukseen tarkoitetuilla eristelevyillä tai levyjen ja eristeiden yhdistelmillä. Palosuojaukseen on mahdollista käyttää myös puupanelointia. Puurakenteissa palosuojauksen tarkoitus on suojata kantava rakenne hiiltymiseltä koko palonkestoajan. Palon aikana suojauksesta huolimatta puun lujuus heikenee, johtuen sen lämpenemisestä. Suojaukseen käytettävän tuotteen valinnassa kannattaa huomioida myös pintaluokka- ja suojaverhousvaatimukset, jotta niiden vaatimuksia saataisiin mahdollisesti täytettyä samalla. (Lahtela, 2018, ss. 80–81) Jos suojaus tehdään palosuojalevyillä ja niiden väli on yli 2 mm, pitää myös niiden rakojen kautta tapahtuva hiiltymisen huomioida (Paroc, n.d., s. 4).

Kolmas vaihtoehto on palosuojata puurakenne siten, että suojaus estää puun hiiltymisen osan vaaditusta palonkestoajasta ja sen jälkeen rakenne saa hiiltyä. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi siten, että jos palonkestovaatimus on R 60, palosuojaukseen käytettävä tuote suojaa rakennetta 30 minuuttia. Myös tätä menetelmää käytettäessä pintaluokka- ja

suojaverhousvaatimukset kannattaa huomioida. Puu lämpenee palosuojauksen takana, joten on myös huomioitava, että kun palosuojaus ei enää estä rakenteen hiiltymistä, hiiltyminen tapahtuu tavallista nopeammin. (Lahtela, 2018, s. 81) Hiiltyminen jatkuu nopeampana, kunnes hiiltymissyvyys on 25 mm, jonka jälkeen hiiltyminen jatkuu suojaamattoman puun hiiltymisnopeudella. Hiiltymisnopeuden voidaan olettaa olevan kaksinkertainen normaaliin verrattuna, jos suojaava verhous putoaa pois palon aikana. Jos suojaus pysyy paikallaan ja hiiltyminen rakenteessa alkaa lämpötilan nousun takia, hiiltyminen tapahtuu hitaammin. Suojaus voi pettää joko levyjen murtumisen takia tai kiinnikkeet voivat irrota, koska puu suojauksen takana alkaa hiiltyä. Kiinnikkeiden pitäisikin upota hiiltymättömään puuhun vähintään 10 mm. (Paroc, n.d., s. 4)

4.6.2 Stabiilius palotilanteessa

Myös rakenteiden ja koko rakennuksen stabiilius palotilanteessa pitää huomioida ja se kannattaakin tehdä jo ennen varsinaista palomitoitusta. Joissain tapauksissa palotilanteen varalle joudutaan suunnittelemaan oma stabiliteettituenta. Tuennan on oltava sellainen, että se kestää koko vaaditun palonkestoajan. Kriittisin paikka palotilanteessa ovat tuennan liitokset. Naulaliitokset esimerkiksi eivät suojaamattomina kestä kuin 15 minuuttia. Liitoksissa tarkasteluja on tehtävä myös reunaetäisyyksien osalta, jos liittintä ympäröivä puu hiiltyy siten, että se pienentää reunaetäisyyttä. (Lahtela, 2018, s. 85)

Yksinkertaisinta on suunnitella rakenteet siten, että ne palosuojataan koko palonkestoajalle, jolloin kantavat ja jäykistävät rakenteet eivät pääse hiiltymään. Jos hiiltymiseltä ei voida välttyä, kannattaa rakenteet suunnitella riittävän suuriksi, jotta ne eivät vaadi erillisiä tuentoja palotilanteen varalta. Aina tuentaa ei kuitenkaan voida välttää, mutta tällaisia ovat esimerkiksi NR-ristikot. Riittävän suuret palkit voidaan kuitenkin suunnitella toimimaan palotilanteessa ilman erillistä tuentaa kiepahdusta vastaan. (Lahtela, 2018, s. 85)

5 LIITOKSET

Liitoksiin ei ole standardoituja ratkaisuja, vaan ne suunnitellaan yleensä tapauskohtaisesti. Liitosten kestävyysmitoitukseen löytyy kuitenkin standardeista ohjeet.

Liitokset luokitellaan jäykkyyden, kestävyys- ja muodonmuutoskyvyn eli sitkeyden mukaan. Määrittäminen tehdään valitulle liitoksen siirtämälle voimalle ja sitä vastaavalle jäykkyydelle. Liitokset luokitellaan kestävyysmukaan joko täysin lujaksi (full-strength), osittain lujaksi (partial strength) tai ei-lujaksi (no strength). Luokittelu voidaan tehdä myös jäykkyyden mukaan joko

täysin jäykäksi (rigid), osittain jäykäksi (semi-rigid) tai ei jäykkyyttä (no stiffness). Muodonmuutoskyvyn mukaan luokitus on joko sitkeä (ductile), osittain sitkeä (semi-ductile) tai hauras (brittle). Standardi SFS-EN 1993 ei käsittele osittain sitkeitä liitoksia. (Heinisuo & Saarinen, 2014, s. 89)

Liitos ajatellaan täysin lujaksi, jos sen kestävyys on suurempi kuin liitettävän osan kestävyys käsiteltävälle voimasuureelle. Jos kestävyys on pienempi, mutta ottaa kuitenkin vastaan kyseistä voimasuuretta, liitos on osittain luja. (Heinisuo & Saarinen, 2014, s. 89)

Rakennekerrosten väliset kontaktipinnat ja lattiaa tukevien rakenteiden liitokset on suunniteltava mahdollisimman jäykiksi. Huomiota on kiinnitettävä etenkin siihen, että jäykkyys on suuri kävelystä aiheutuvilla ihmisen painosta johtuvilla kuormituksilla. Liitosten jäykkyyden on säilyttävä myös pitkäaikaiskäytössä, vaikka lattia olisi kuormitettu sen mitoituskuormituksella useita kertoja. (Talja ym., 2002, s. 14)

Kantavien rakenteiden liitoksissa ei saa käyttää suojaamattomia pultteja, nauloja tai naulalevyjä, koska ne eivät kestä kuumuutta ja sen takia niille ei voida ollenkaan laskea palonkestoaikaa, joka myös liitosten on täytettävä. Usein ne täytyy palosuojata erikseen. (Siikanen, 2017, s. 85)

5.1 Teräsprofiilit

Teräsrakenteilla on ns. pääsääntönä, että hitsausliitoksia käytetään konepajalla ja ruuviliitoksia työmailla. Harkitusti voidaan käyttää myös muita liittämistekniikoita. Molempiin liitostapoihin on olemassa laatuvaatimukset, joita löytyvät standardista SFS-EN 1993-1-8. Talonrakentamisessa käytettävät liitokset ovat pääasiassa hitsattuja ja ruuviliitoksia. Tässä tapauksessa liitokset ovat puurakenteiden kanssa, joten hitsiliitoksia ei käytetä. (Heinisuo & Saarinen, 2014, s. 83)

Ruuviliitoksia kannattaa muutenkin suosia työmailla, koska hitsauksen tekeminen ja laadunvalvonta on hankalampaa työmaalla kuin konepajalla, joten suunnitelman mukaisen hitsiliitoksen tekeminen ja varmistaminen voi olla vaikeaa. Lisäksi hitsauksen jälkeen tehtävistä pintakäsittelyn korjauksista aiheutuu lisäkustannuksia. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 301)

Ruuviliitoksilla saadaan toteutettua kaikkia liitosluokkia, mutta nivelellisten liitosten etuna voidaan pitää sitä, että ne saadaan toteutettua yksinkertaisemmin kuin jäykät liitokset ja ne ovat valmistus- ja asennuskustannuksiltaan edullisempia. Nivelelliset liitokset tekevät myös rakenteen kokonaistarkastelun ja suunnittelun yksinkertaisemmaksi. Tällaisilla liitoksilla kuitenkin palkeista tulee jonkin verran raskaampia, koska maksimomomentti ja taipuma ovat suurempia. Samalla kuitenkin pilarit voivat olla kevyempiä, koska niille ei tule palkeilta taivutusmomenttia, muuten kuin epäkeskeisyyden takia. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 303)

5.1.1 Liitosten huomiointi kokonaistarkastelussa

Liitosten vaikutukset sisäisten voimien ja momenttien jakaantumiseen rakenteessa ja sen kokonaismuodonmuutoksiin huomioidaan rakenneanalyysissä nivelellisellä mallilla siten, että liitoksen ei oleteta siirtävän taivutusmomenttia. Jäykällä mallilla liitoksen käyttäytymistä ei huomioida, mutta myös osittain jäykällä se huomioidaan. (SFS-EN 1993-1-8, 2005, s. 54; ks. myös Ongelin & Valkonen, 2010, s. 304)

Liitosmalli määritetään liitosluokasta ja valitusta analyysimenetelmästä riippuen. Analyysimenetelmä voi olla joko kimmoteorian mukainen kokonaistarkastelu, jäykkä-plastinen malli tai kimmo-plastinen malli. Riippumatta siitä, mikä analyysimenetelmä on valittu, liitoksilla täytyy olla riittävä kestävyys niissä vaikuttavien rakenneanalyysistä johtuvien voimien ja momenttien siirtämiseksi. Liitoksilla pitää olla myös riittävä kiertymiskyky, jotta saavutetaan analyysistä aiheutuvat kiertymät. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 304)

Yleensä menetelmä, joka on varmallalla puolella, on mallintaa ensin kaikki liitokset nivelellisinä, jotta saadaan suurin kenttämomentti. Sen jälkeen, jotta saadaan liitoksiin ja niiden kautta viereisiin rakenneosiin siirtyvät suurimmat rasitukset, liitokset mallinnetaan jäykkinä. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 304)

5.1.2 Liitosten kestävyys ja kiepahdus

Teräsrakenteiden liitokset on suunniteltava siten, että niiden kestävyden mitoitusarvo on riittävä, jotta koko rakenne täyttää standardien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-8 perusvaatimukset. Liitosten kestävyden määrittäminen perustuu sen komponenttien kestävyteen. Niiden mitoituksessa käytettävä analyysi voi olla joko lineaarisesti kimmoiseen tai kimmoplastiseen materiaaliin perustuva. Jos käytetään liittimiä, joilla on erilainen jäykkyys, pitää koko suunnitteluarvolle mitoittaa liitin, jolla on suurin jäykkyys, jotta leikkausvoima saadaan siirrettyä. (SFS-EN 1993-1-8, 2005 ss. 19–20)

Liitoksissa, joita kuormittaa leikkausvoima ja joihin voi kohdistua isku, vaihtuvasuuntainen kuormitus ja/tai värähtely, käytetään joko hitsausta, lukittuvia tai esijännitettyä ruuveja, injektioruuveja tai muita ruuvityyppejä, jotka estävät hyvin liitettäviä osia liikkumasta. Yksi vaihtoehto on myös käyttää nittejä. (SFS-EN 1993-1-8, 2005, s. 20)

Liitoksissa on huomioitava myös kiepahdus. Kiepahduserkkyteen vaikuttaa esimerkiksi poikkileikkauksen muoto. Poikkileikkaukset, joilla on pieni vääntöjäykkyys, ovat herkempiä menettämään stabiiliutensa kiepahtamalla. Tässä asiassa on selkeä ero I-profiilien ja koteloprofiilien kanssa, sillä koteloprofiilien kiepahdusta ei yleensä tarvitse huomioida. (Heinisuo & Saarinen, 2014, s. 57)

5.2 Puupalkit

Puurakenteiden liittimien kestävyuden ominaisarvo ja liitoksen jäykkyys määritetään kokeellisesti joko standardin EN 1075, EN 1380, EN 1381, EN 26891 tai EN 28970 mukaan, ellei muita sääntöjä ole annettu. Jos standardissa, jonka mukaan kestävyys määritetään, on mainittu veto- ja puristuskoee, kestävyuden ominaisarvo määritetään vetokokeella. (SFS-EN 1995-1-1, 2014 s. 53)

Jos liitoksessa on päätetty käyttää useita liittimiä, niiden sijoittelu ja koot, samoin kuin liitinvälit, reuna- ja päätyetäisyydet valitaan siten, että voidaan saavuttaa odotettu jäykkyys ja kestävyys. Kun liitoksessa on useita liittymiä, on yleensä koko liitoksen kestävyys pienempi kuin yksittäisten liittymien yhteenlaskettu kestävyys. Jos käytettävät liittimet ovat erityyppisiä, niiden erilaiset jäykkyydet ja vaikutus voimien jakautumiseen pitää huomioida. Liima ja mekaaniset liittimet ovat sellaisia, että niiden ei lasketa toimivan yhdessä. (RIL 205-1-2017, s. 103)

Liitoksen ollessa useampi kuin kaksileikkeinen, yhden leikkeen kestävyys on pienin leikkeelle saatu arvo, kun liitos jaetaan kaksileikkeisiin osaliitoksiin, joista määritetään kestävyys leikettä kohti. Tällaisen liitoksen kestävyys saadaan, kun kerrotaan pienin määritetty yhden leikkeen kestävyys leikkeiden ja tehollisten liittimien määrillä. (RIL 205-1-2017, s. 104)

5.2.1 Metalliset liittimet ja lohkeamismurtuminen

Metallisia puikkoliittimiä käytettäessä liitoksen kestävyuden määrittämisessä huomioidaan liittimien myötölujuus, reunapuristuslujuus ja ulosvetolujuus. Jos taas liitoksissa käytetään teräslevyjä, niiden lujuus on tarkistettava EN 1993, eli Eurokoodi 3:n mukaan. Puristetussa liitoksessa ulkopuolisen teräslevyn nurjahduspituudeksi yleensä voidaan olettaa $0,8L_a$, jossa L_a on ensimmäisten eripuolilla liitossaumaa olevien liittimien etäisyys. Nurjahdusta ei tarvitse tarkistaa liittymiltä, jotka jäävät puuosien väliin, jos puuosien leviäminen on estetty esimerkiksi sidepulteilla siten, että teräslevylle jätetty rako on korkeintaan 25 % suurempi kuin teräslevyn paksuus. Liitoksissa, joissa käytetään teräslevyjä, huomioidaan myös puun syitä vastaan kohtisuora kuivuminen. Kun mitoitetaan teräksen ja puun välistä vedetyn sauvanpäälliitosta, pitää huomioida lohkeamismurto, joka tapahtuu liitinryhmän piiriä pitkin. (RIL 205-1-2017, s. 106)

Teräksen ja puun liitoksen kestävyysvaikutusta teräslevyn paksuus. Jos levyn paksuus on korkeintaan $0,5d$, se luokitellaan ohueksi. Paksuksi levy luokitellaan, jos sen paksuus on vähintään d ja siinä olevien reikien halkaisijan toleranssi on alle $0,1d$. Levyn paksuuden ollessa näiden kahden välillä, sen kestävyuden ominaisarvo lasketaan interpoloimalla lineaarisesti ohuen ja paksun levyn raja-arvojen välillä. (SFS-EN 1995-1-1, 2014, s. 56)

Teräslevyllisten liitoksien lisäksi lohkeamismurtuminen tarkistetaan myös vedettyjen puuosien kaksi- ja monileikkeisten sauvanpäälliitosten kanssa. Kun sauvanpäälliitos on syysuuntaisesti vedetty, tarkistetaan liitosalueen lohkeamiskestävyys. Lohkeamismurtuminen voi tapahtua kahdella eri tavalla, joko läpilohkeamalla tai palalohkeamalla. (RIL 205-1-2017, s. 106)

Läpilohkeaminen voi tapahtua pultti- ja tappivaarnaliitoksissa, palalohkeamista voi tapahtua, kun käytetään teräslevyllisiä pintaliittimiä. Tavallisia pintaliittimiä ovat naulat ja ruuvit sekä naula- ja vaarnalevyt. Palalohkeaminen on mahdollinen myös teräslevyllisessä tappivaarnaliitoksessa ulkolamelleissa, kun tappivaarna ei ulotu puun pintaan asti. Molemmat lohkeamistavat on tarkistettava, kun käytetään teräslevyllisiä pultti- tai tappivaarnaliitoksia ristiviilutetun viilupuun kanssa. Lohkeamismurtumista ei tarkisteta liitoksissa, joissa kaikki liittimet ovat puun syiden suuntaisessa rivissä. (RIL 205-1-2017, s. 107)

5.2.2 Naula- ja ruuviliitokset

Naulaliitoksessa on oltava vähintään kaksi naulaa (RIL 205-1-2017, s. 109). Naulaliitosten leikkauskestävyyden mitoitusarvoja näkyy taulukossa 13. Naulat lyödään niin syväälle, että niiden kannat ovat puun pinnan kanssa tasan (RIL 205-1-2017, s. 110). Nauloille on esiporattava reiät, jos puutavaran ominaistiheys on $\rho_k > 500 \text{ kg/m}^3$, naulan paksuus $d > 6 \text{ mm}$ tai puutavaraosan paksuus $t < 7d$ (RIL 205-1-2017, s. 113).

Taulukko 13. Kahden puun välisen, lankanauloilla kootun liitoksen leikkausvoimakestävyyden [N] mitoitusarvoja. Neliskulmaiset ovat yleisimpiä vasaroitavia nauloja ja pyöreät tavallisimpia kone-nauloja. (RIL 205-1-2017, s. 111)

Puutavara	Sahatavara C24 – C30; Liimapuu GL20 - GL26						Sahatavara \geq C35; Liimapuu \geq GL28c; Kerto-S, Kerto-T, Kerto-Q					
	Pysyvä		Keskipitkä		Hetkellinen		Pysyvä		Keskipitkä		Hetkellinen	
	1 ja 2	3	1 ja 2	3	1 ja 2	3	1 ja 2	3	1 ja 2	3	1 ja 2	3
$d \times L$												
□ 2,1x50	220	190	300	240	410	330	240	200	310	260	430	350
□ 2,5x60	300	250	400	330	550	450	320	270	430	350	590	480
□ 2,8x75	400	330	530	430	730	600	420	350	560	460	770	630
□ 3,4x100	580	480	770	630	1050	860	610	510	810	660	1100	910
□ 4,2x125	830	690	1100	900	1500	1250	870	730	1150	940	1600	1300
□ 5,1x150	1150	960	1550	1250	2100	1700	1200	1000	1600	1300	2200	1800
□ 5,5x200	1300	1100	1750	1400	2350	1950	1400	1150	1850	1500	2500	2050
□ 6,0x225	1500	1250	2000	1650	2750	2250	1600	1350	2150	1750	2900	2400
$\emptyset d \times L$												
\emptyset 2,1x50	210	180	290	230	390	320	230	190	300	250	410	340
\emptyset 2,5x60	290	240	390	310	530	430	310	250	410	330	560	460
\emptyset 2,8x75	350	290	470	380	640	530	370	310	490	400	680	560
\emptyset 3,1x90	420	350	560	450	760	620	440	370	590	480	800	660
\emptyset 3,4x100	490	410	650	530	890	730	520	430	690	560	940	770
\emptyset 3,8x120	590	490	790	640	1050	880	620	520	830	670	1100	930
\emptyset 4,2x130	700	580	930	760	1250	1050	740	620	980	800	1350	1100
\emptyset 4,6x145	820	680	1090	880	1450	1200	860	720	1150	930	1550	1300
\emptyset 5,0x160	940	780	1250	1000	1700	1400	990	830	1300	1050	1800	1500

Profiloituja kampa- tai kierrenauloja voi käyttää päätypuuliitoksissa, joissa on leikkauskuormitusta, käyttöluokissa 1 ja 2, jos liitoksessa on vähintään kolme naulaa ja niiden tartuntapituus on vähintään 10d. Päätypuuliitoksen mitoituksessa käytetään vastaavan tavallisen naulaliitoksen kestävydestä 1/3. (RIL 2015-1-2017, s. 114)

Kuormien ollessa pysyviä tai pitkäaikaisia, käytettävien naulojen on oltava kampa- tai kierrenauloja. Niistä voidaan olettaa, että vain profiloitu osa ottaa vastaan pituussuuntaista kuormaa. Päätypuussa olevien naulojen ei voida olettaa siirtävän voimia naulan pituussuunnassa. Koska puu todennäköisesti kuivuu asennuksen jälkeen, kerrotaan ulos- ja läpivetolujuudet luvulla 2/3. (SFS-EN 1995-1-1, 2014, ss. 63–64)

Ruuvien nimellispaksuuden ollessa 3,8–24 mm, tarkoitetaan nimellispaksuudella d ruuvien kierteiden ulkohalkaisijaa. Ruuvien kierteinen osa huomioidaan laskennassa käyttämällä tehollista halkaisijaa. Nimellistä halkaisijaa d käytetään kuitenkin, kun määritetään liitinväljen reuna- ja päätyetäisyyksiä ja tehollisten ruuvien määrää. (RIL 205-1-2017, s. 127)

Kun mitoitetaan pituussuunnassa kuormitettuja ruuveja, on tarkistettava ruuvien kierteisen osan ulosvetokestävyys kärjen puoleisessa puussa, sen ulosvetokestävyys kannan puolelle tai kannan läpivetokestävyys ja ruuvien vetokestävyys ja nurjahtaminen puristuksessa. Lisäksi tarkistetaan liitosalueen murtuminen ruuviryhmän mukana. Pituussuunnassa kuormitetussa ruuviliitoksessa murtuminen on tavallisesti haurasmurtuma. Tästä johtuen murtotilassa aiheutuva muodonmuutos on pieni ja sen takia jännitysten uudelleen jakautuminen on rajallista. (RIL 205-1-2017, s. 129)

Vinoruuviliitoksissa kaikkien ruuvien pitää olla samanlaisia ja -kokoisia. Ruuvit myös asennetaan samassa suuntakulmassa. Ne sijoitetaan keskeisesti liitosvoimaan nähden. Ruuvit on porattava riittävän syväälle, jotta kanta painuu koko pohjapinnaltaan puuhun tai jos liitoksessa on teräslevy, ruuvien kannan on oltava kontaktissa levyn kanssa. (RIL 205-1-2017, s. 135)

5.2.3 Erilaisia teräksisiä liittimiä

Teräksisiä liittymiä on useita erilaisia, tässä on esitetty niistä muutama lyhyesti. Liitoksia voidaan tehdä piilokonsolien lisäksi ruuviliitoksina tai vaarantappiliitoksina.

Puupalkkien liitoksiin on esimerkiksi alumiinista valmistettu piilokonsoli Sherpa connector (kuva 20). Tällaista liitintä on saatavilla useille eri kuormille, pienemmät XS-M kokoiset on tarkoitettu 5-72 kN kuormille ja L-XXL kokoiset 30-380 kN kuormille. Sherpalla on liitin myös CLT-levyjen liitoksiin. (Sherpa, n.d.)



Kuva 20. Sherpa connector L-XXL kokoinen (Sherpa, n.d.).

Sherpa connectoria voidaan käyttää myös puupalkkien liittämiseen betoniin tai teräkseen. Yhteensä liitoksia, jotka soveltuvat puun liittämiseen puuhun on XS-XXL kokoisia 39 erilaista. Puun liittämiseen betoniin tai teräkseen soveltuvia liittimiä on M-XXL kokoisia yhteensä 31 erilaista. (OIB, 2019, ss. 2–3)

Puurakenteissa näitä voidaan käyttää havupuusta valmistetun massiivipuun kanssa, jonka vahvuus on vähintään C24, liitoksissa, sekä liimapuun, jonka vahvuus on vähintään GL24c. Nämä soveltuvat myös jalopuusta tehdyn liimapuun, viilupuun, ristiin liimatun viilupuun sekä LSL:n (laminated strand lumber) liitoksiin. (OIB, 2019, s. 3)

Palosuojaus tälle liittimelle saadaan joko siten, että se jyrsitään palkin sisään niin, että liitoksen vahvuus on ≤ 5 mm tai siten, että M-XXL kokoisilla liittimillä niiden reunojen ympärillä on vielä 30–50 mm puun reunaa. Riippuen liittimen koosta, tällä saavutetaan R 60 palonkesto aika. R 30 palonkesto aikaa varten liitoksen vahvuus on sama ≤ 5 mm, mutta kiinnitysojan ympärille ei tarvitse jäädä yhtä paljon puuta. (OIB, 2019, s. 7)

Simpson Strong-tiella on myös piilokonsoleita, Concealed beam hangers, jotka on tarkoitettu käytettäväksi myös rakenteellisten palkkien liitoksissa. Liittimet ovat yksiosaisia ja kolmiulotteisia ja ne on valmistettu sinkitystä teräksestä tai ruostumattomasta teräksestä. Niitä voidaan käyttää puurakenteiden välisissä liitoksissa ja puun ja betonin liitoksissa. Liittimiä on myös kaksiosaisia. (ETA-07/0245, 2018, s. 2)

Näitä liittimiä voidaan käyttää massiivipuun, liimapuun, viilupuun ja vastaavien tuotteiden sekä puupohjaisten rakennusosien kanssa. Vahvuusvaatimukset puulle liittimien kanssa ovat C24 tai parempi ja GL24c tai parempi. Puun tiheyden tulisi olla vähintään 350 kg/m^3 . (ETA-07/0245, 2018, s. 27) Palosuojaus saadaan varmistamalla, että puuta jää riittävä määrä liittimen ympärille. Siten on mahdollista saada palonkestoajaksi 30 tai 60 minuuttia. (ETA-07/0245, 2018, s. 23)

Myös Knapp valmistaa erilaisia liittimiä, jotka saadaan jäämään piiloon. Liittimet ovat kaksi- tai yksiosaisia ja ne on tarkoitettu käytettäväksi

puurakenteiden välisissä liitoksissa ja puun ja betonin tai teräksen välisissä liitoksissa. Liittimet valmistetaan galvanoidusta teräksestä. Ne on suunniteltu käytettäväksi päiden liitoksissa rakenteen sivuun tai päiden liitoksissa keskenään tai rakenteiden sivujen liitoksissa toisiinsa kantavissa rakenteissa. Liittimiä voidaan käyttää esimerkiksi massiivipuun, havu- tai jalopuun, liima- tai viilupuun sekä CLT ja vastaavien tuotteiden kanssa. (ETA-10/0189, 2019, s. 2)

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Esitetyt palkkivaihtoehdot valittiin sillä perusteella, että rakennus haluttiin toteuttaa täysin ilman betonia. Puu oli alkuperäinen vaihtoehto, mutta koska rakennukseen haluttiin muuntojoustavuutta, minkä takia jänneväleistä tuli pitkiä, puu välipohjan pääkannattimena ei kuitenkaan ollut ehkä paras vaihtoehto toteutuksen kannalta. Poikkileikkauksesta tulisi niin suuri, että alapuolinen huonekorkeus laskisi liikaa, jos palkkeja ei pystyisi rei'ittämään tarpeeksi talotekniikkaa varten. Myös ilman tätä, poikkileikkaus olisi lähes metrin korkuinen, minkä takia välipohjan paksuus on melko suuri.

Kaikkia palkkivaihtoehtoja ei mitoitettu, eikä mitoituksia tehty muuten kuin värähtelylle. Tällaiseen mitoitusratkaisuun päädyttiin tässä työssä, koska värähtelymitoitus on usein mitoitettavin välipohjissa, tämä koskee sekä puu- että teräsrakenteisia välipohjia.

Värähtelymitoituksella saatu poikkileikkaus liimapuulle oli 190x855 mm, tämä ei kuitenkaan 4000x300 mm CLT-elementin kanssa läpäissyt yhdistetyn värähtelyn tarkastelua, vaikka erikseen molempien värähtelyt olivat hieman yli vaaditun 9 Hz. Näiden yhdistelmällä yhdistetyksi värähtelyksi saatiin noin 9 Hz suurentamalla liimapuun poikkileikkaus 215x990 mm:iin ja CLT-elementin koko 4000x400 mm:iin. Liimapuupalkin paino on laskettu suuremman poikkileikkauksen perusteella ja sen painon ollessa 450 kg/m³. CLT-elementin painon laskennassa on käytetty kuormaa 5 kN/m³ (ks. liite 1).

HEA-palkilla (ks. liite 2) värähtelyn vaatimus 9 Hz täyttyy HEA500-palkilla, mutta jotta yhdistetty värähtely samankokoisen CLT-elementin kanssa kuin liimapuupalkille tehty mitoitus, täyttyy, täytyy valita vähintään HEA650. Tällä palkilla yhdistetty värähtely on kuitenkin vielä alle 9 Hz, jotta pyöristetty tulos saadaan vielä lähemmäs 9 Hz, täytyy palkin olla HEA700 (ks. liite 2).

WQ-palkki ei ollut poikkeus, myös sillä vaadittu mitoitus täyttyy pienemmällä palkilla, kuin yhdistetty värähtely. Myöskään WQ-palkkia ei tässä työssä mitoitettu muuten kuin värähtelyn osalta, joten värähtelyn laskennassa käytettyjä mittoja ei ole muuten perusteltu. Korkeus palkille on päätetty CLT-elementille käytetyn paksuuden perusteella (ks. liite 3).

Erot puupalkkien ja teräspalkkien välisissä korkeuksissa ovat huomattavat, etenkin jos yhdistettyä värähtelyä ei tarvitse huomioida. Yleensä sitä ei tarvitsekaan, sillä Eurokoodi 5 ei sitä vaadi. Käyttämällä teräspalkkia näin pitkällä jänneväliillä puupalkin sijasta, saadaan alapuolista huonekorkeutta enemmän käyttöön. Lisäksi talotekniikka pystytään vielä viemään välipohjaa kannattelevien palkkien ali. Puupalkeilla poikkileikkaus on jo niin korkea, että talotekniikan vienti niiden ali laskee alapuolista huonekorkeutta jo joissakin tapauksissa liikaa. Tai ainakin suuri poikkileikkaus pitää huomioida suunnittelussa.

Puupalkeilla tietysti vaihtoehtona on rei'ittäminen, mutta rei'ille on kuitenkin rajoituksia. Puupalkkeihin tehtävät reiät eivät voi olla halkaisijaltaan kovin suuria, eivätkä ne voi olla aivan vierekkäin. Monesti talotekniikka kuitenkin viedään välipohjassa siten, että putket ovat aivan vierekkäin. Lisäksi on mahdollista, että sen lisäksi, että reikiä ei saada vierekkäin, niitä ei välttämättä saada myöskään tarpeeksi, jos yhdestä reiästä ei mahdu useampaa putkea.

Puupalkeilla on etuna teräkseen nähden palosuojauksen helppous. Teräsrakenteet täytyy aina palosuojata, mutta puupalkeille palosuojaukseksi voi riittää tarpeeksi suuri poikkileikkaus. Tällöin suojaus perustuu siihen, että hiiltymisestä huolimatta tietyn palonkestoajan jälkeen poikkileikkausta on edelleen tarpeeksi jäljellä lujuusteknisesti. Niillekin on kuitenkin joissakin tilanteissa tehtävä palosuojaus ja se kannattaa huomioida etenkin tilanteissa, joissa puu on valittu osittain senkin takia, että se halutaan jättää näkyviin. Esimerkkikohteessa ei ollut tällaista tilannetta, joten teräspalkit olivat hyvä vaihtoehto.

Teräsrakenteiden palosuojauksessa molemmilla ruiskutettavilla ja maalattavilla sekä levytyksellä on omat hyvät ja huonot puolensa. Palosuojamaalaus tai -ruiskutus on helpompi työvaiheena toteuttaa, etenkin kun palosuojamaalaus voidaan tehdä jo tehtaalla. Huonona puolena tässä on se, että maalipinta on herkkä vaurioille kuljetuksen, varastoinnin ja asennuksen aikana, ja sitä joudutaan paikkamaalaamaan työmaalla. Jotkut palkit, esimerkiksi WQ-palkki, joka tarvitsee palosuojamaalauksen vain yhdelle sivulle, voi olla helpoin maalata vasta työmaalla. Levytys taas on selvästi työlämpi ja hitaampi toteuttaa.

Liitoksissa puurakenteille on useita vaihtoehtoja. Teräspalkeille helpoin voi olla tehdä liitokset palkkeihin kiinnitetyillä levyillä, jotka ruuvataan pilariin työmaalla. Liitosten kannalta palkeilla ei ole merkittävää eroa, sillä molemmat saadaan toteutettua kuiva-asennuksina ja molempien liitokset pitää palosuojata.

7 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tekemisessä perehdyttiin erilaisiin vaihtoehtoihin puurakentamisessa. Puurakentamista on jonkun verran jo suuremmissakin kohteissa ja se tulee mahdollisesti ekologisuutensa takia vielä yleistymäänkin, joten aihe tuntui ajankohtaiselta ja jatkon kannaltakin tärkeältä.

Värähtely oli tärkeä osa työtä, sillä se on puurakenteisissa välipohjissa usein mitoittavin tekijä. Eri palkkivaihtoehtoja oli myös helppo vertailla värähtelymitoituksen avulla, sillä sen laskentakaava on materiaaliiriippumaton. Lisäksi värähtely on usein myös teräsrakenteisissa välipohjissa mitoittavin, sillä ihmiset ovat sille hyvin herkkiä. Värähtelystä mukana oli myös yhdistetty värähtely, jota Eurokoodi 5 ei vaadi. Yhdistetyn värähtelyn laskentakaava on selvästi mitoittavampi kuin Eurokoodin vaatima värähtelymitoitus ominaistajuudesta tai 1 kN aiheuttamasta taipumasta lattiapalkin kohdalla.

Esimerkit värähtelymitoituksesta tehtiin siten, että yhdistetty värähtely on noin 9 Hz, jolloin kaikille kolmelle palkille, yksin palkin ominaistajuudeksi tuli noin 12–14 Hz, mikä on hyvin yli Eurokoodin vaatiman taajuuden. Ominaisuuden laskentaan mielenkiintoinen menetelmä oli myös sen laskeminen taipuman kautta. Eurokoodi ei tätä laskentamenetelmää esitä. Tällä menetelmällä laskettiin vain yksi esimerkki värähtelystä ja se tehtiin liimapuupalkille (ks. liite 1).

Työtä varten tehtyjen mitoitusten perusteella WQ-palkki vaikutti parhaalta vaihtoehdolta pitkällä jänneväleillä, sillä myös HEA-palkilta vaadittava poikileikkaus oli melko suuri (ks. liitteet 6 ja 7). WQ-palkin selvänä etuna on, että se voidaan tehdä välipohjan vahvuisena, eikä se siten kasvata välipohjan paksuutta entisestään (ks. liitteet 8 ja 9). Liimapuu palkilla välipohjasta tuli selvästi vahvin (ks. liitteet 4 ja 5).

Kaikilla mietityillä vaihtoehdoilla alapuoliseen tilaan on tehtävä alaslaskettu katto talotekniikkaa varten, joten jos palkin alapinta on samalla tasolla CLT-elementin kanssa, ei alaslaskua tarvita niin paljon. Alaslaskettu katto tarvitaan myös puupalkkien kanssa, sillä on todennäköistä, että reiät, joita palkkeihin voidaan tehdä, eivät ole riittävän suuria tai niitä ei saada tarpeeksi.

Palosuojaus on myös nostettu työssä esille, sillä se on tärkeä osa suunnittelua. Palosuojausta on mietittävä niin kantavien rakenteiden kuin pintojenkin suhteen. Oikeanlaisen palosuojauksen suunnittelemiseksi on myös tärkeää tietää mitä vaatimukset ovat ja mistä ne tulevat. WQ-palkilla on tässäkin etuja muihin teräspalkkeihin nähden, sillä sille ei tarvita palosuojausta kuin alalaipan alapintaa, koska se on CLT-elementtien välissä.

Liitosten mietinnässä etenkin puurakenteiden liitosvaihtoehtoja tuli esille useita. Teräspalkkien liittämässä puuhun ei ole loppujen lopuksi kovin montaa vaihtoehtoa, etenkin kun asennukset on pystyttävä tekemään kuiva-asennuksina täysin ilman betonia. Puupalkkien liitosvaihtoehtoja sen sijaan oli useita, piiloon jääviäkin liittimiä on monia erilaisia. Etenkin muualla Euroopassa on useita erilaisia ratkaisuja puurakenteiden liitoksiin.

Työhön esimerkiksi piirretyissä liitosdetaljeissa CLT-elementti on asennettu HEA-palkin päälle. Tämän voisi liittää myös siten, että elementti asennetaan laippojen väliin, jolloin myös tämän mallinen palkki saadaan jäämään elementtien väliin, jos palkki voi olla yhtä korkea kuin mitä elementti on paksu. Tarvittaessa elementtiin voi tehdä urat ala- ja ylälaippaa varten. Tässä kohteessa tällä tavalla asennettuna palkki tulisi hieman yli 200 mm 400 mm vahvan CLT-elementin yli, joten esimerkkikuvaan sitä ei tästä syystä siten piirretty. Teräspalkkien liitoksissa on ajateltu, että palkkeihin on hitsattu päätyyn tarvittava levy, jolla ne saadaan ruuviliitoksilla kiinnitettyä puurunkoon. Puupalkin kanssa CLT-elementti on ajateltu ruuvattavaksi palkin päälle. Puupalkki liitetään piilokonsolilla päistä muuhun runkoon.

Kevytrakenteisia välipohjakenttiä pystyy toteuttamaan hyvin puu-teräspalkki-rakenteisina ja siinä puulla ja teräksellä on molemmilla hyviä puolia. Työn tarkoitus oli tutkia niiden ominaisuuksia ja niiden käyttöä välipohjakentän primääripalkkina.

LÄHTEET

Anstar Oy. (2004). Anstar A-palkki, pikamitoitustaulukot. Haettu 27.2.2020 osoitteesta <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/palkit/matalapalkit>

Anstar Oy. (2016) A-palkki. Haettu 27.2.2020 osoitteesta https://www.anstar.fi/wp-content/uploads/2018/10/ABeam-k%C3%A4ytt%C3%B6ohje_EC2_2016_fin.pdf

ETA-07/0245 (2018). Simpson strong-tie joist end connector, concealed beam hangers. European technical assessment. Haettu 23.4.2020 osoitteesta https://media.pim.strongtie.eu/gallery_pdf/e/eta070245-sst-je-ch-r6-2018-v01.pdf

ETA-10/0189 (2019). Knapp clip connectors. European technical assessment. Haettu 23.4.2020 osoitteesta https://www.knapp-verbinder.com/wp-content/uploads/2019/10/ETA100189-KNAPP_2019_RICON-GIGANT-RICONS-WALCO.pdf

Heinisuo, M. & Saarinen, E. (2014). Teräsrakenteiden liitokset. Teoksessa Teräsrakenneyhdistys (toim.) *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 -oppikirja*. 2. painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry, 83–112.

Inha, T. (2014). Palomitoitus. Teoksessa Teräsrakenneyhdistys (toim.) *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 -oppikirja*. 2. painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry, 125–139.

Kotiranta, J. (2020a). Opinnäytetyö. Sähköpostiviesti tekijälle 19.2.2020.

Kotiranta, J. (2020b). Puurakenteiden värähtely. Sähköpostiviesti tekijälle 6.5.2020.

Kemppi, M. (2014). Teräsrakenteiden mitoituksen erityiskysymyksiä. Teoksessa Teräsrakenneyhdistys (toim.) *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 -oppikirja*. 2. painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry, 151–159.

Kumar, R. & Martikainen, L. (2014). Rakenneterästen ja ruostumattomien terästen valmistus, ominaisuudet ja tuotteet. Teoksessa Teräsrakenneyhdistys (toim.) *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 -oppikirja*. 2. painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry, 13–25.

Lahtela, T. (2018). *Paloturvallinen puutalo. Asuin- ja toimitilarakentaminen*. Helsinki: Puuinfo Oy. Haettu 16.4.2020 osoitteesta https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Palokirja_LOW_p%C3%A4ivitetty%2021.2.20.pdf

Leskelä, M. & Kumar, R. (2014). Rakenneosien mitoitus. Teoksessa Teräsrakenneyhdistys (toim.) *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 -oppikirja*. 2. painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry, 47–81.

MetsäWood. (2020). Kerto LVL S-beam. Haettu 19.2.2020 osoitteesta <https://www.metsawood.com/fi/tuotteet/kerto/Pages/Kerto-S.aspx#>

OIB. (2019). European technical assessment ETA-12/0067. Österreichisches Institut für Bautechnik. Austrian institute for construction engineering. Haettu 21.4.2020 osoitteesta http://www.sherpa-connector.com/data/Sherpa/download/Zulassung/ETA_12-0067_en_ecopy_save.pdf

Ongelin, P. & Valkonen, I. (2010). *Hitsatut Profiilit –Käsikirja*. Kolmas painos. Keuruu: Rautaruukki Oyj. Haettu 16.4.2020 osoitteesta http://software.ruukki.com/Handbooks+and+Guides/Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Kasikirja-2010_PDF-versio.pdf

Paroc. (n.d.) Palosuojausopas 3/puu. Kevyet ja kantavat puurakenteet. Haettu 29.4.2020 osoitteesta <https://www.paroc.fi/kayttokohteet/palosuojaus>

Peikko Group. (2016). Deltabeam Tekninen käyttöohje. Haettu 10.1.2020 osoitteesta <https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/i/vxE6JQ/b4RPYoQz7WC2U/NQLgHqV7A/DeltapalkkiFI04-2016.pdf>

Puuinfo. (2004). Puurakentaminen. Puu materiaalina. Haettu 28.2.2020 osoitteesta <https://www.rakentaja.fi/artikkelit/595/puurakentaminen.htm>

Puuinfo. (2018). Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje. Eurokoodi 5. 4. painos. Haettu 28.4.2020 osoitteesta <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Eurokoodi%205%20Lyhennetty%20suunnitteluohje%2031.8.%20web.pdf>

Puuinfo. (n.d.a). Liimapuu (GLT). Haettu 19.2.2020 osoitteesta <https://www.puuinfo.fi/puutieto/insin%C3%B6%C3%B6ripuutuotteet/liimapuu-glt>

Puuinfo. (n.d.b). Viilupuu (LVL). Haettu 19.2.2020 osoitteesta <https://www.puuinfo.fi/puutieto/insin%C3%B6%C3%B6ripuutuotteet/viilupuu-lvl>

Puuinfo. (n.d.c). Monikerroslevy (CLT). Haettu 28.2.2020 osoitteesta <https://www.puuinfo.fi/puutieto/insin%C3%B6ripuutuotteet/monikerroslevy>

Ratu 0439 (2015). Palosuojaus. Helsinki: Rakennustieto Oy. Haettu 16.4.2020 osoitteesta https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/Ratu%200439?external_system=Juha&page=23

RIL 167-1 (1988). *Teräsrakenteet 1*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 205-1-2017. *Puurakenteiden suunnitteluohje: eurokoodi EN 1995-1-1*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 205-2-2019. *Puurakenteiden palomitoitus: eurokoodi EN 1995-1-2*. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Saarinen, E. (2014). Suunnitteluperusteet. Teoksessa *Teräsrakenneyhdistys (toim.) Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 -oppikirja*. 2. painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry, 27–43.

SFS-EN-1993-1-2 (2005). *Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 2: Rakenteen palomitoitus*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN-1993-1-8 (2005). *Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 8: Liitosten mitoitus*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 1995-1-1 (2014). *Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 1995-1-2 (2004). *Puurakenteiden suunnittelu. Osa 2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS. (2019). *Terässtandardit*. Haettu 29.4.2020 osoitteesta https://www.sfs.fi/files/1483/Teraskirjanen_A5_2019-11_web.pdf

Sherpa Oy. (n.d.). Wood connectors. Haettu 26.2.2020 osoitteesta <https://www.sherpa-connector.com/en/products/wood-connector/>

Siikanen, U. (2017). *Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovelluksia*. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Simpson Strong-tie. (n.d.). CBH-Concealed beam hanger. Haettu 23.4.2020 osoitteesta <https://pim.strongtie.eu/public/download/gb/en/product/59>

Stora Enso. (n.d.a) CLT-Cross Laminated Timber. Haettu 28.2.2020 osoitteesta <https://www.clt.info/fi/tuote/>

Stora Enso. (n.d.b) CLT:n edut. Haettu 29.4.2020 osoitteesta <https://www.clt.info/fi/tuote/clt-massiivipuurakentaminen/cltn-edut/>

Suomen liimapuu yhdistys ry & Puuinfo Oy. (2015). *Liimapuukäsikirja osa 3*. Helsinki: Suomen liimapuu yhdistys ry ja Puuinfo Oy. Haettu 9.4.2020 osoitteesta <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuuk%C3%A4sikirja%20Osa%203.pdf>

Suomen RakMk 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Puurakenteet. Helsinki: Ympäristöministeriö, rakennukset ja rakentamisen yksikkö. Haettu 4.12.2019 osoitteesta <https://www.eurocodes.fi/ymn-kansalliset-liitteet/>

Suomen RakMk 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Helsinki: Ympäristöministeriö. Haettu 9.4.2020 osoitteesta https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Paloturvallisuus

Talja, A., Toratti T. & Järvinen, E. (2002). Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. VTT tiedote 2124. Haettu 4.12.2019 osoitteesta www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2124.pdf

Teräsrakenneyhdistys ry. (2017). Teräsrakenteiden palosuojamaalaus 2017. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry. Haettu 16.4.2020 osoitteesta http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/845/a5c28b8/palosuojamaalaus_2017_sahkoinen_versio.pdf

Tiainen, T. (2017). Teräsrakenteen palonsuojamaalauksen suunnittelu - kustannusten näkökulma. Haettu 16.4.2020 osoitteesta http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/706/b0da362/tiainen_terasrakenteen_paiva.pdf

TRY Teräsnormikortti 17/2005 (2005). Kävelystä aiheutuvat välipohjan värähtelyt. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys Ry. Haettu 30.12.2019 osoitteesta http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/273/8c9be8a/Normikortti17_2005.pdf

University of California Berkeley, department of civil and environmental engineering. (n.d.) Ominaisuuskaavojen kaavoja. Yrityksen Ideastructura Oy:n tekijälle toimittama materiaali. 6.5.2020.

LIIMAPUUPALKIN GL30c VÄRÄHTELYMITOITUS

Värähtelymitoitus

Liimapuu GL30c

$$b := 215\text{mm} \quad h := 990\text{mm} \quad L_{\text{v}} := 7\text{m} \quad k := 4.5\text{m}$$

$$I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 1.738 \times 10^{10} \cdot \text{mm}^4$$

$$E := 13000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$g_k := 1.15 \cdot \left(2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0.83 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 3.254 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_k := 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot g = 0.294 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$m_{\text{v}} := \frac{g_k + q_k}{g} = 361.867 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$EI_1 := E \cdot I = 2.26 \times 10^{14} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$f_{01} := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \sqrt{\frac{EI_1}{k \cdot m}} = 11.943 \cdot \text{Hz}$$

Taipuma johtuen 1kN pistekuormasta

$$F_{\text{v}} := 1000\text{N} \quad L_2 := 7000\text{mm} \quad k = 4.5\text{m}$$

$$E_b := 2.667 \cdot 10^{14} \text{N} \cdot \text{mm}^2 \quad E_b = E \cdot I$$

$$k_{\delta} := \sqrt[4]{\frac{E_b}{EI_1}} = 1.042$$

$$\delta_{\text{v}} := \min \left(\frac{F \cdot L_2^2}{42 \cdot k_{\delta} \cdot EI_1}, \frac{F \cdot L_2^3}{48 \cdot k \cdot EI_1} \right)$$

$$\delta = 0.00000495 \text{ m}$$

$$\delta \leq 0.5\text{mm} \quad \text{OK}$$

Yhdistetty värähtely

Liimapuu GL30c + CLT

$$b_2 := 4000\text{mm} \quad h_2 := 400\text{mm}$$

$$E_2 := 12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad I_2 := \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = 2.133 \times 10^{10} \cdot \text{mm}^4$$

$$EI_L := E_2 \cdot I_2 = 2.667 \times 10^{14} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$f_{0L} := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{\text{k} \cdot \text{m}}} = 12.973 \cdot \text{Hz}$$

$$f_0 := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0L}^2} + \frac{1}{f_k^2}}} = 8.786 \cdot \text{Hz} \approx 9\text{Hz} \quad \text{OK}$$

Värähtelymitoitus taipuman kautta

$$g_k := 3.254 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad q_k := 0.294 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad k := 4.5\text{m}$$

$$w := (g_k + q_k) \cdot k \cdot 1\text{m} = 15.966 \cdot \text{kN}$$

$$\Delta := \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = 2.209 \text{m} \cdot \text{mm}$$

$$f_{12} := 0.18 \cdot \sqrt{\frac{g}{\Delta}} = 0.18 \cdot \sqrt{\frac{g}{2.209\text{mm}}} = 11.993 \cdot \text{Hz}$$

$$\frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{5}{384}} \cdot \sqrt{g \cdot \frac{384}{5} \cdot \frac{E \cdot I}{w \cdot L^4}} = 11.944 \frac{1}{\text{m}^{0.5}} \cdot \text{Hz}$$

HEA-PALKIN VÄRÄHTELYMITOITUS

HEA 650 S355

$$L := 7\text{m} \quad k := 4.5\text{m}$$

$$I := 1752 \cdot 10^6 \text{mm}^4$$

$$E := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$g_k := 1.15 \cdot \left(2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1.86 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 4.439 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_k := 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot g = 0.294 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$m := \frac{g_k + q_k}{g} = 482.652 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$EI_1 := E \cdot I = 3.679 \times 10^{14} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$f_{01} := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \sqrt{\frac{EI_1}{k \cdot m}} = 13.194 \cdot \text{Hz}$$

Taipuma johtuen 1kN pistekuormasta

$$F := 1000\text{N} \quad L_2 := 7000\text{mm} \quad k = 4.5\text{m}$$

$$E_b := 2.667 \cdot 10^{14} \text{N} \cdot \text{mm}^2 \quad E_b = EIL$$

$$k_\delta := \sqrt[4]{\frac{E_b}{EI_1}} = 0.923$$

$$\delta := \min \left(\frac{F \cdot L_2^2}{42 \cdot k_\delta \cdot EI_1}, \frac{F \cdot L_2^3}{48 \cdot k \cdot EI_1} \right)$$

$$\delta = 0.00000344 \text{ m}$$

$$\delta \leq 0.5\text{mm} \quad \text{OK}$$

Yhdistetty värähtely

HEA 650 + CLT

$$b_2 := 4000\text{mm} \quad h_2 := 400\text{mm}$$

$$E_2 := 12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad I_2 := \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = 2.133 \times 10^{10} \cdot \text{mm}^4$$

$$EI_L := E_2 \cdot I_2 = 2.667 \times 10^{14} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$f_{0L} := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{\text{k} \cdot \text{m}}} = 11.233 \cdot \text{Hz}$$

$$f_0 := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0I}^2} + \frac{1}{f_{0L}^2}}} = 8.553 \cdot \text{Hz} \approx 9\text{Hz} \quad \text{OK}$$

WQ-PALKIN VÄRÄHTELYMITOITUS

WQ-palkin jäyhyysmomentti

$$b_{f1} := 390\text{mm} + 2 \cdot 10\text{mm} = 410 \cdot \text{mm}$$

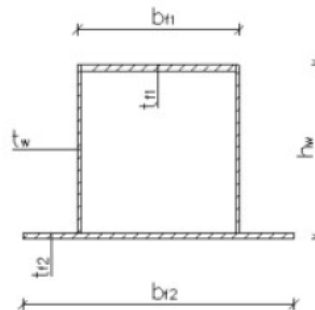
$$h_w := 435\text{mm} - 35\text{mm} = 400 \cdot \text{mm}$$

$$b_{f2} := 650\text{mm}$$

$$t_{f1} := 45\text{mm}$$

$$t_w := 10\text{mm}$$

$$t_{f2} := 35\text{mm}$$



$$A_w := t_w \cdot h_w = 4 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{f1} := t_{f1} \cdot b_{f1} = 1.845 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{f2} := t_{f2} \cdot b_{f2} = 2.275 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

$$z_0 := \frac{A_{f1} \cdot \left(\frac{t_{f1}}{2} + h_w + t_{f2} \right) + 2 \cdot A_w \cdot \left(\frac{h_w}{2} + t_{f2} \right) + A_{f2} \cdot \frac{t_{f2}}{2}}{A_{f1} + 2 \cdot A_w + A_{f2}} = 217.866 \cdot \text{mm}$$

$$I_{f1} := \frac{b_{f1} \cdot t_{f1}^3}{12} + A_{f1} \cdot \left(\frac{t_{f1}}{2} + h_w + t_{f2} \right)^2 = 3.865 \times 10^9 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_w := \frac{t_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot \left(t_{f2} + \frac{h_w}{2} \right)^2 = 2.742 \times 10^8 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{f2} := \frac{b_{f2} \cdot t_{f2}^3}{12} + A_{f2} \cdot \left(\frac{t_{f2}}{2} \right)^2 = 9.29 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_y := I_{f1} + 2 \cdot I_w + I_{f2} = 4.423 \times 10^9 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{y2} := I_y - (A_{f1} + 2 \cdot A_w + A_{f2}) \cdot z_0^2 = 2.087 \times 10^9 \cdot \text{mm}^4$$

Värähtelymitoitus

WQ-palkki

$$L_1 := 7\text{m} \quad k := 4.5\text{m}$$

$$I := I_{y2}$$

$$E := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$g_k := 1.15 \cdot \left(2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 4.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_k := 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot g = 0.294 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$m := \frac{g_k + q_k}{g} = 499.069 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$EI_1 := E \cdot I = 4.383 \times 10^{14} \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$f_{01} := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_1}{\text{k} \cdot \text{m}}} = 14.162 \text{Hz}$$

Taipuma johtuen 1kN pistekuormasta

$$F := 1000\text{N} \quad L_2 := 7000\text{mm} \quad k = 4.5\text{m}$$

$$E_b := 2.667 \cdot 10^{14} \text{N} \cdot \text{mm}^2 \quad E_b = EI$$

$$k_\delta := \sqrt[4]{\frac{E_b}{EI_1}} = 0.883$$

$$\delta := \min \left(\frac{F \cdot L_2^2}{42 \cdot k_\delta \cdot EI_1}, \frac{F \cdot L_2^3}{48 \cdot k \cdot EI_1} \right)$$

$$\delta = 0.00000301 \text{ m}$$

$$\delta \leq 0.5\text{mm} \quad \text{OK}$$

Yhdistetty värähtely

WQ + CLT

$$b_2 := 4000\text{mm} \quad h_2 := 400\text{mm}$$

$$E_2 := 12500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad I_2 := \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = 2.133 \times 10^{10} \cdot \text{mm}^4$$

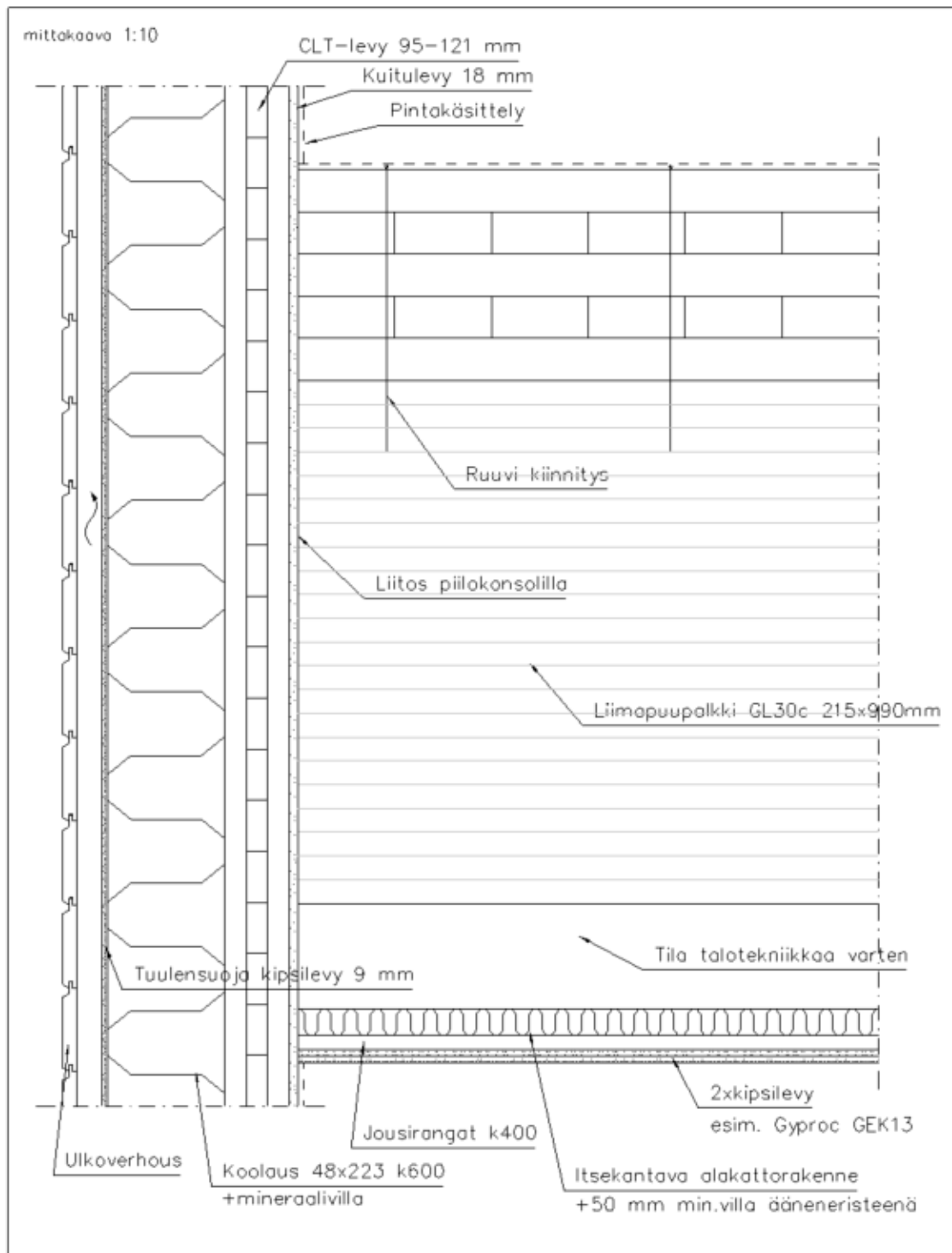
$$EI_L := E_2 \cdot I_2 = 2.667 \times 10^{14} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$f_{0L} := \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{\text{kg} \cdot \text{m}}} = 11.046 \cdot \text{Hz}$$

$$f_0 := \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0l}^2} + \frac{1}{f_{0L}^2}}} = 8.71 \cdot \text{Hz} \quad \approx \quad 9\text{Hz} \quad \text{OK}$$

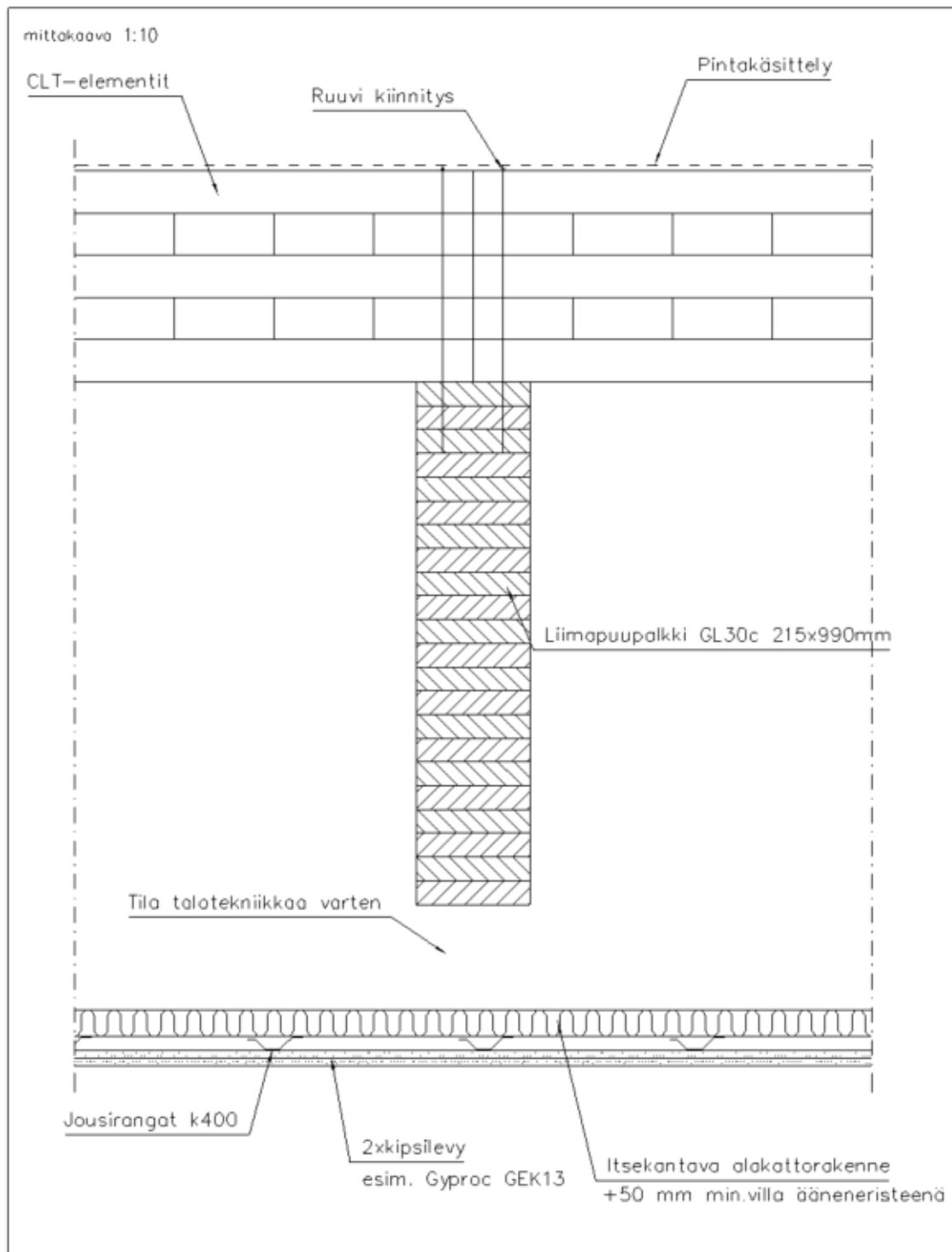
LIIMAPUUPALKIN LIITOS KANTAVAAN SEINÄÄN

Kohde	Sisältö	
	Liimapuupalkin liitos kantavaan seinään	
Suunnittelija	Työn nro RAK 002	VP DET 1
	Päiväys	



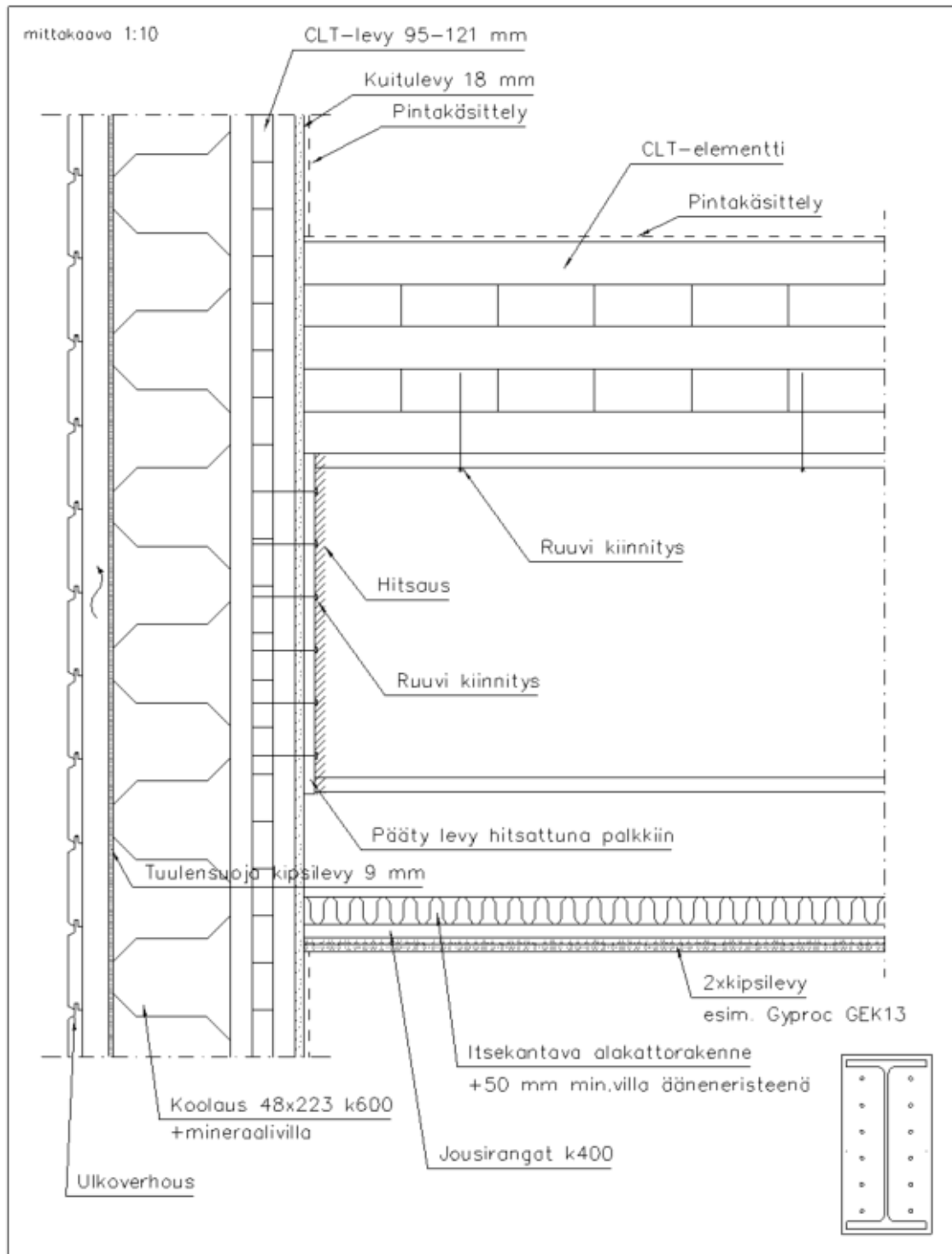
LIIMAPUUPALKIN LIITOS CLT-ELEMENTTIIN

Kohde	Sisältö	
	Liimapuupalkin liitos CLT-elementtiin	
Suunnittelija	Työn nro	VP DET 2
	RAK 002	
	Päiväys	Tekijä



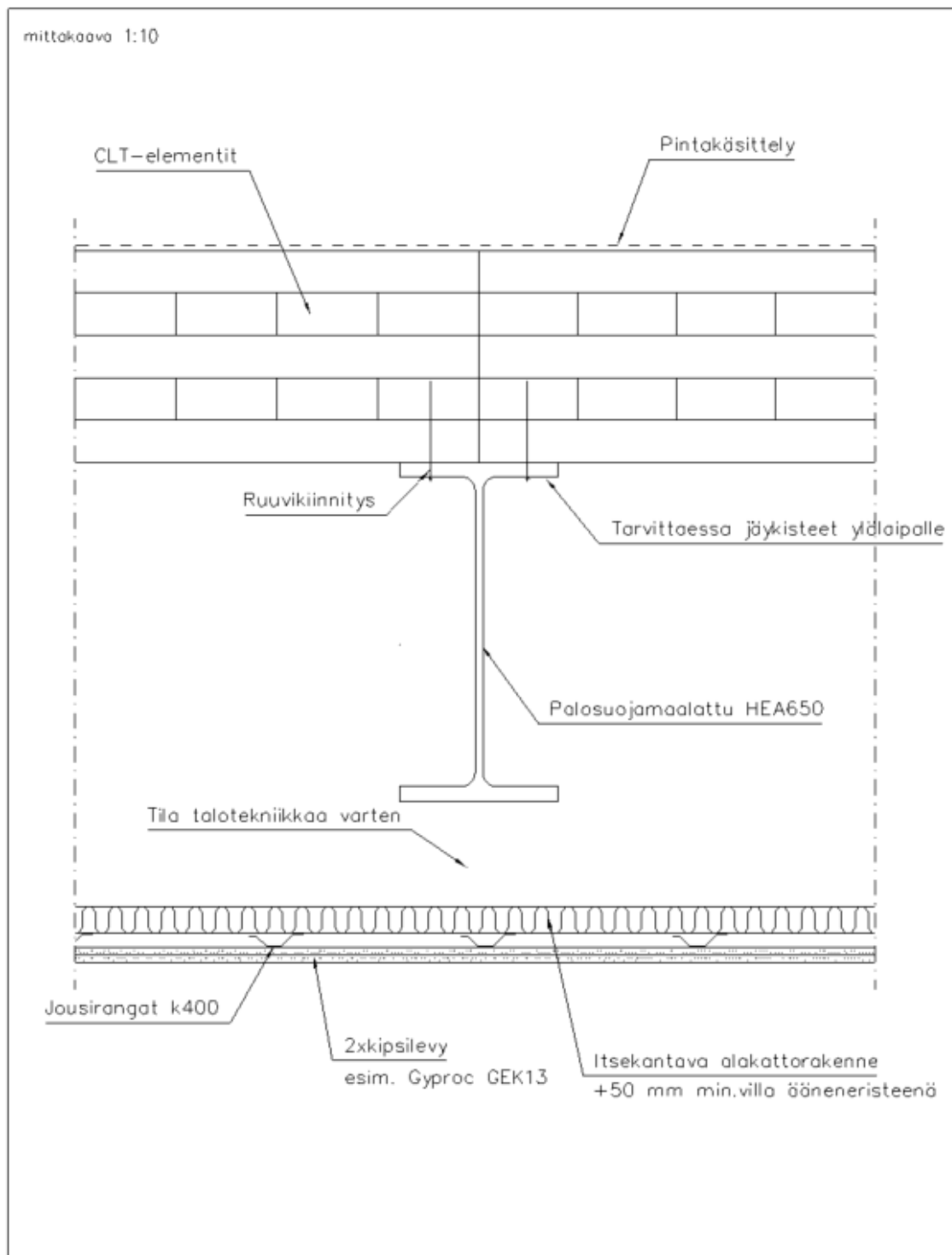
HEA-PALKIN LIITOS KANTAVAAN SEINÄÄN

Kohde	Sisältö		VP DET 3
	HEA-palkin liitos kantavaan seinään		
Suunnittelija	Työn nro	Tekijä	
	RAK 002		
	Päiväys		



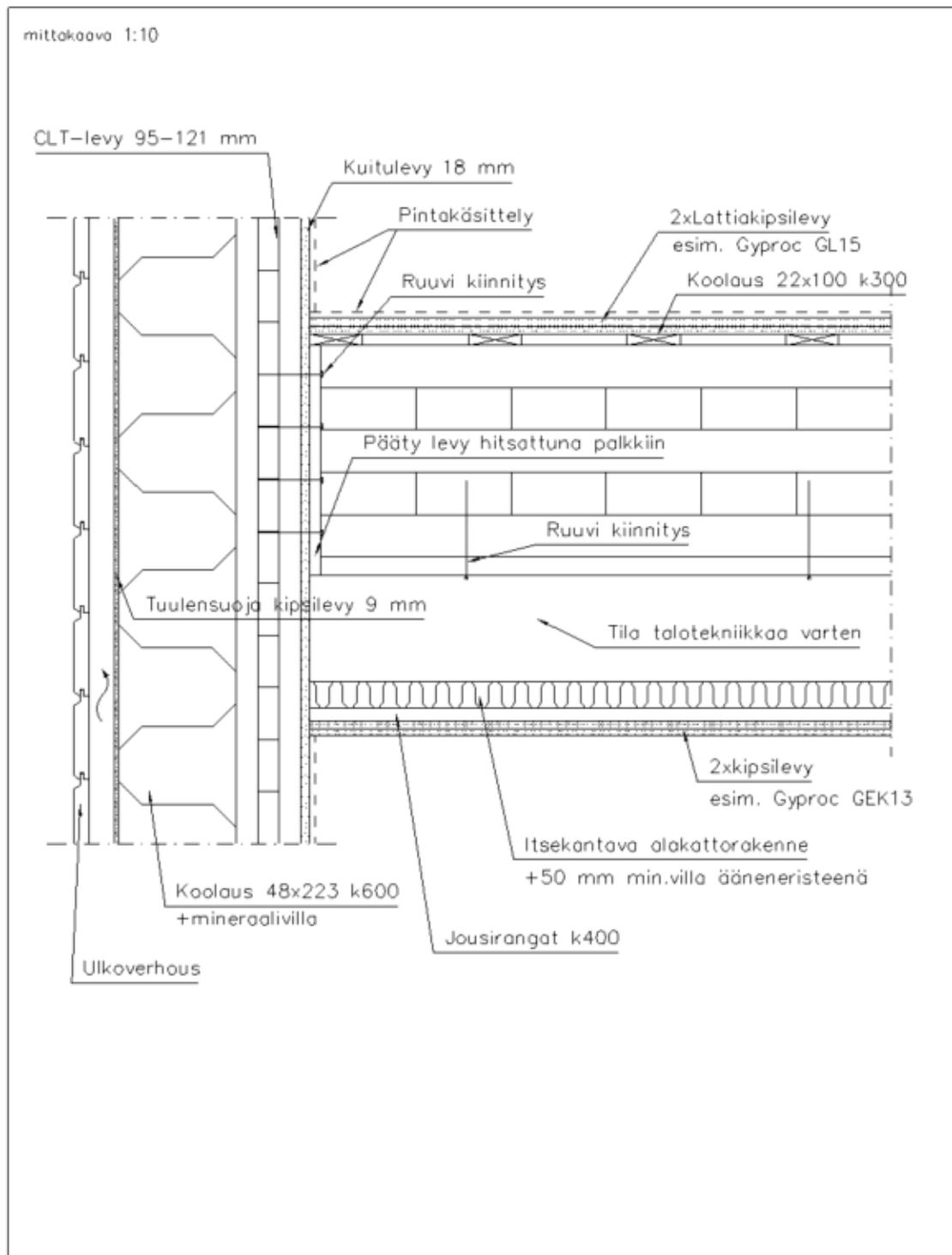
HEA-PALKIN LIITOS CLT-ELEMENTTIIN

Kohde	Sisältö		VP DET 4
	HEA-palkin liitos CLT-elementtiin		
Suunnittelija	Työn nro	RAK 002	
	Päiväys	Tekijä	



WQ-PALKIN LIITOS KANTAVAAN SEINÄÄN

Kohde	Sisältö	
	WQ-palkin liitos kantavaan seinään	
Suunnittelija	Työn nro	VP DET 5
	RAK 002	
	Päiväys	Tekijä



WQ-PALKIN LIITOS CLT-ELEMENTTIIN

Kohde	Sisältö		VP DET 6
	WQ-palkin liitos CLT-elementtiin		
Suunnittelija	Työn nro	Tekijä	VP DET 6
	RAK 002		
	Päiväys		

