

Turunen Ville

# FFTT-järjestelmän rakenteiden soveltuvuus eurokoodimitoitukseen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

25.3.2014

Tekijä(t) Otsikko  Sivumäärä Aika	Turunen Ville FFTT-järjestelmän rakenteiden soveltuvuus eurokoodimitoitukseen  54 sivua 25.3.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja Valvoja	Toimitusjohtaja Mikko Viljakainen Lehtori Timo Leppänen
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin FFTT-järjestelmää, ja sen rakenteiden soveltuvuutta eurokoodimitoitukseen. Työ toteutettiin Puuinfo Oy:lle, jonka pääasiallinen toimintatarkoitus on lisätä puurakentamisen tietoutta ja edistää puurakentamista kaikilla osa-alueilla. Myös FFTT-konseptilla on tulevaisuudessa mahdollisuus puurakentamisen lisäämiseksi. Työtä varten tutkittiin myös miksi puurakentamista kannattaa kehittää ja lisätä myös Suomessa.</p> <p>Työssä perehdyttiin kanadalaisen arkkitehdin Michael Greenin työryhmän julkaisemaan The case for tall wood –raporttiin sekä CLT hand book –kirjaan. Lisäksi työtä varten haastateltiin Stora Enson CLT-osaston ammattilaisia, jotka kertoivat omia näkemyksiään FFTT-järjestelmän toimivuudesta, ja kertoivat mahdollisia rakenteen riskikohtia. Riskikohdiksi huomattiin tuulen aiheuttamien vetävien voimien ankkurointi perustuksilla ja liitoksissa.</p> <p>Työtä varten toteutettiin laskentamalli Autodesk Robot structural analysis -ohjelmalla, josta saatiin CLT-elementteihin kohdistuneet kuormitukset. Rakenteiden kestävyys suomalaisilla kuormituksilla tarkastettiin vertaamalla käsin laskettuja kestävyyyksiä laskentamallista saatuihin kuormituksiin. Laskennassa käytettiin eurokoodi SFS-EN 1995-1-1 liitteen B mekaanisin liittimin koottujen palkkien teoriaa, sekä teoksen CLT Handbook ohjeita.</p> <p>Työn tuloksena havaittiin, ettei FFTT-raportin ilmoittamilla rakenteilla torni sellaisenaan sovellu eurokoodimitoitukseen. Kuitenkin pienillä muutoksilla, kuten kerrosten vähentämisellä pystytään FFTT-tornin rakenteita toteuttamaan.</p>	
Avainsanat	FFTT-järjestelmä, CLT, Puukerrostalot

Author(s) Title	Ville Turunen Suitability of FFTT- systems suitability for Eurocode Design
Number of Pages Date	54 pages 25 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Timo Leppänen, Senior Lecturer Mikko Viljakainen, CEO
<p>In this thesis, the FFTT-concept and its structural suitability for Eurocode design, were studied. The thesis was made for Puuinfo Oy whose main goal is to increase knowledge about wooden construction and the usage of wood. In the future FFTT-concept also has possibility to increase wood construction in Finland. The reason why usage of wood should be increased in construction was also studied.</p> <p>For the thesis Michael Green's FFTT-report <i>The case for tall wood and CLT –handbook</i> was studied. Also CLT-construction professionals from Stora Enso were interviewed on their own views about functionality of FFTT-system and possible risk structures in building frame. The highest risk in the structure was detected in connection between foundation and clt-wall element.</p> <p>An FEM –calculation model was made from a FFTT-tower for the thesis. The model was made with Autodesk Robot Structural Analysis –program. Stresses for the structures were obtained from the calculation model. The durability of structures was checked by comparing hand calculated strengths of the structures to maximum stresses from the calculation model. Calculations were based on Eurocode SFS-EN 1995-1-1 appendix B and instructions of CLT Handbook.</p> <p>Results of this thesis showed that the FFTT-system does not suit for Eurocode design with the structures that were shown by the original FFTT-report. However with minor adjustments and changes in the structures the FFTT-tower can still be executed also in Eurocode designs.</p>	
Keywords	FFTT-concept, CLT, Wooden high-rise buildings

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tavoitteet ja rajaus	2
2	Puurakentamisen lisäämisen hyödyt	3
2.1	Hiilijalanjäljen pieneneminen	5
3	CLT -levyt rakennusmateriaalina	6
3.1	CLT-levyjen rakenteellinen toiminta	8
4	FFTT-rakennusjärjestelmä	9
4.1	Rakenteet	14
4.1.1	Ulkoseinät	14
4.1.2	Väliseinät	14
4.1.3	<i>Välipohja</i>	14
4.1.4	Rungon jäykistäminen	15
4.2	FFTT-järjestelmän rakentaminen	16
4.2.1	Rakennusvaiheet	16
4.3	Pohjaratkaisut	18
4.3.1	Vaihtoehto 1:	18
4.3.2	Vaihtoehdot 2 ja 3: 20-kerrosta/30-kerrosta	19
4.3.3	Vaihtoehto 4: 30-kerrosta	21
5	Kuormat Eurokoodin mukaan	21
1.1	Lähtötiedot	21
1.2	Kuormat kanadalaisten lainsäädännön mukaan	22
5.1	Pystykuormat	22
5.1.1	Murtorajatilamitoitus	22
5.2	Vaakakuormat	23
5.2.1	Tuulikuorma	23
6	Laskentamalli	31
7	Rakennusosien tarkastelut	32
7.1	Välipohja	32

7.1.1	CLT-välipohjaelementin taivutusjäykkyys	32
7.1.2	Värähtelymitoitus Eurokoodin mukaan	35
7.1.3	Taivutusmitoitus	37
7.1.4	Tulokset	38
7.2	Kantavat ulkoseinät	39
7.2.1	Puristus clt-seinäelementissä	39
7.2.2	Tulokset	42
8	Liitokset	42
8.1	Seinäelementin ja perustusten liitos	43
8.1.1	Tulokset	47
9	Muut suunnittelun näkökulmat	48
9.1	Seismiset kuormat	48
9.2	Suomen palomitoituksen vertailu raporttiin	48
10	Johtopäätökset	49
11	Yhteenveto	50
	Lähteet	53

## Lyhenteet

CLT= Ristiin liimattu puutavara(Cross laminated timber)

$E$ = Kimmokerroin [MPa]

$EI$ = Rakenteen taivutusjäykkyys

$EI_{eff}$ = Rakenteen tehollinen taivutusjäykkyys

FFTT= "Finding forest through the trees"

$G$ = Liukkerroin[MPa]

$I$ =Jäyhyysmomentti [ $mm^4$ ]

LVL= Laminated veneer lumber = Viilupuu, kertopuu

LSL= Laminated strand lumber= Puulastuista liimaamalla ja puristamalla valmistettu tuote

$MPa = N/mm^2$  = Jännitys

$v$  = Tuulen referenssinopeus

$z$  = rakennuksen korkeus

$z_0$  = rosoisuusmitta, joka riippuu maastoluokasta

## 1 Johdanto

Suomi on tyypillisesti ollut matalan rakentamisen maa, jossa kerrostalojen korkeus harvoin ylittää 10 kerrosta. Kaupunkien väkilukujen kasvaessa tarvittavien asuntojen määrä taajama-alueilla kasvaa jatkuvasti etenkin Pääkaupunkiseudulla, joka johtaa väistämättä tehokkaamman maankäytön tavoitteluun. Helsingin alueen käytettävien rakennusmaa-alueiden vähentyessä suuntaus on yhä korkeampien rakennusten rakentamiseen. Helsingin alueella on vireillä useita yli 20-kerroksisia tornitalohankkeita Kalasatamassa, Jätkäsaarella sekä Pasilan alueella.

Lähes kaikki tähänastiset korkeat yli 12-kerroksiset rakennukset on toteutettu betoni- tai teräsrakenteisena eri puolilla maailman. Tulevat tiukentuvat päästömääräykset, ekologisempi ajattelutapa, joka tähtää pienempään hiilijalanjälkeen kaikilla alueilla sekä uudet rakennusmateriaalit ja suunnittelun mahdollisuudet ovat kuitenkin tuoneet myös puun mukaan yhä korkeampien rakennusten mahdolliseksi rakennusmateriaaliksi. Myös uudet puun jalostustavat, kuten ristiin laminoitu CLT- levy mahdollistaa yhä erilaisten puurakennusten toteuttamisen. Toistaiseksi toteutuneista kohteista korkein puukerrostalo sijaitsee Lontoossa, joka on 9 kerrosta korkea.



Kuva 1. Lontoon 9-kerroksinen puukerrostalo [15].

Puurakentamisen lisäämiseksi on kehitetty uusia tapoja lisätä puun käyttöä tulevaisuuden rakennusaineena myös kerrostaloissa. FFTT-konsepti sekä Cree Life-cycle tower ovat tästä tyypillisiä esimerkkejä. Cree life-cycle tower -konsepti on itävaltalaisen rakennusliikkeen Cree By Rhombergin omaa toimintaansa varten kehitetty nopea puurakentamismenetelmä, kun taas tässä työssä käsiteltävä, FFTT-järjestelmä on suunniteltu täysin vapaasti käytettäväksi menetelmäksi kaikille rakentajille. FFTT-järjestelmän nimi tulee englannin kielen sanoista ”finding forest through the trees”, metsän näkeminen puilta. Nimi viittaa järjestelmän laajempaan ajatukseen muuttaa tulevaisuuden rakennusala ekologisemmaksi, eikä vain kehittää uutta puukerrostalojen rakennustapaa. Järjestelmän suunnittelija, kanadalainen Michael Green, on ekologisen ajattelutavan puolestapuhuja ja toivoo järjestelmän herättävän keskustelua puurakentamisesta. FFTT-järjestelmän pääasiallinen tarkoitus on puurakentamisen lisäämisen avulla vähentää rakennusalan ja rakentamisen aiheuttamia päästöjä ympäristöön.

Vaikka järjestelmät mahdollistavat useiden kymmenien kerrosten korkuisien talojen rakentamisen, voi niiden mukanaan tuomat ideat ja ratkaisut lisätä puurakentamisen määrää myös tavallisemmissa 3-5 kerroksisissa rakennuksissa. Myös puurakentamisen mahdollisuuksien tuominen julkisuuteen lisää kiinnostusta puurakentamista kohtaan myös kuluttajissa, mahdollisissa asuntojen ostajissa.

Tämän insinööriyön tilaajana on voittoa tavoittelematon Puuinfo Oy, jonka toiminnasta saadut varat käytetään puurakentamisen tietouden kasvattamiseksi. Sen tehtävänä on luoda kysyntää puutuotteille rakentamisessa ja sisustamisessa. Tavoitteeseensa Puuinfo pyrkii välittämällä tutkittua ja puolueetonta tietoa puun käytöstä ammattirakentajille sekä kuluttajille.

## 1.1 Tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena oli FFTT-järjestelmän rakenteiden kestävyys selvitäminen kun käytetään eurokoodin mukaisia kuormituksia ja suunnitteluperusteita. Eurokoodi ei kuitenkaan vielä täysin sovellu FFTT-konseptin materiaaliin ristiin laminoidun puutavaran suunnitteluun, sillä se ei tunne CLT:tä materiaalina eikä siitä löydy ristiin laminoidun puutavaran lujuustietoja. Laskennassa joudutaan soveltamaan kaikille mekaanisesti liitetyille kappaleille sovellettavia kaavoja. Tästä syystä joiltain osin on myös sovellettu muita teoksia kuten kanadalaista CLT Handbook –kirjaa. FFTT-konseptissa on 4 erilaista rakenteellista ratkaisua, joista perehdytään vain yhteen, korkeimpaan mahdolli-

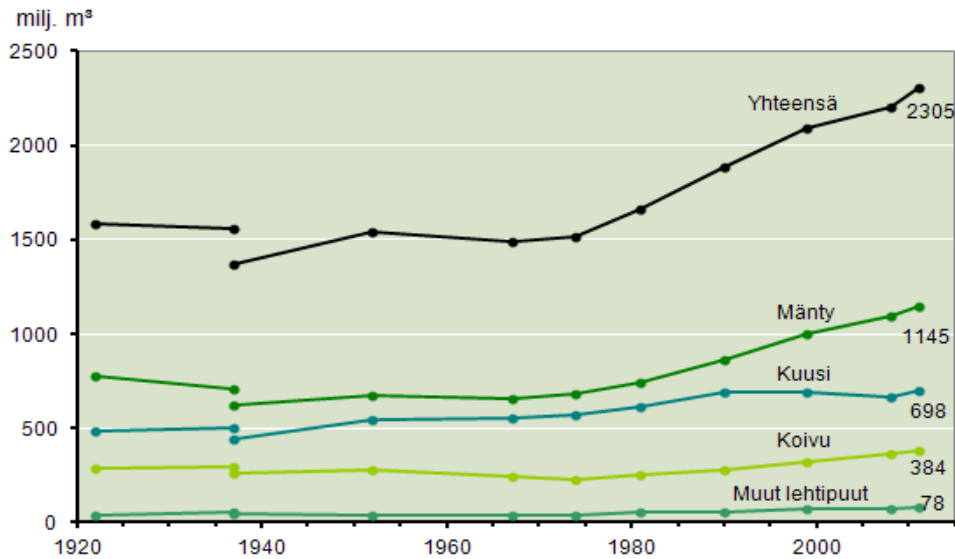


seen rakenteeseen. Myös rakenteiden tarkastelussa tutkitaan vain kriittisimmät pisteet eri tilanteiden osalta. Työstä rajattiin pois maanjäristysmitoitus sekä palomitoitus. FFTT-konseptin kohdemaana on suunnitelmissa ollut Kanada, jossa maanjäristykset esiintyvät kuormana. Tästä syystä myös alkuperäisissä suunnitelmissa maanjäristysmitoitukseen on kiinnitetty erityistä huomiota. Palomitoitus rajattiin pois, sillä sen laajuus ei mahdollistanut mitoituksen sisällyttämistä tähän työhön.

## **2 Puurakentamisen lisäämisen hyödyt**

Suomen pinta-alasta 70 % on metsää ja se on prosenttiosuudeltaan Euroopan metsäisin maa. Myös Suomen puuvarannot, noin 2,3 miljardia kuutiometriä, ovat maailmalla merkittävät ja kasvavat nopeammin kuin puuta ehditään käyttää [1]. Nykyisellä käytöllä Suomen metsät kasvavat kaiken Suomessa rakentamiseen käytettävän puutavaran määrän yhdessä vuorokaudessa. Puun käytön lisäämiselle rakentamisessa on siis raaka-aineen riittävyyden ja kotimaisuuden suhteen vankat perusteet.[1,2.]

Vaikka puu onkin aina ollut perinteinen suomalainen rakennusmateriaali, on puurakentaminen Suomessa keskittynyt lähes kokonaan pientaloihin. Suomalaisten pientalojen runko- ja julkisivumateriaalina puun markkinaosuus on pysynyt 80 - 90 % tasolla, kun vapaa-ajan rakentamisessa markkinaosuus on lähes 100 %. Kerrostalorakentamisessa puun markkinaosuus on kuitenkin ollut pitkään alle yhden prosentin. Ruotsissa puurakentamisen osuus on kymmenessä vuodessa kaksinkertaistunut 20 prosenttiin. Kuitenkin parhaillaan Suomessa on suunnitteilla puukerrostalokohteita yli 6000 asunnon verran eri puolilla maata. Myös kokonaisia alueita on kaavoitettu puukerrostalorakentamiselle. Tutkimuksen mukaan suomalaiset myös haluavat asua puukerrostaloissa: TNS Gallupin vuonna 2012 toteuttaman puukerrostalotutkimuksen mukaan kerrostaloon kolmen vuoden sisällä muuttoa kaavailevista kotitalouksista jopa 107 000 harkitsee muuttoa puukerrostaloon, jos sellaiseen olisi mahdollisuus. [3,4.]



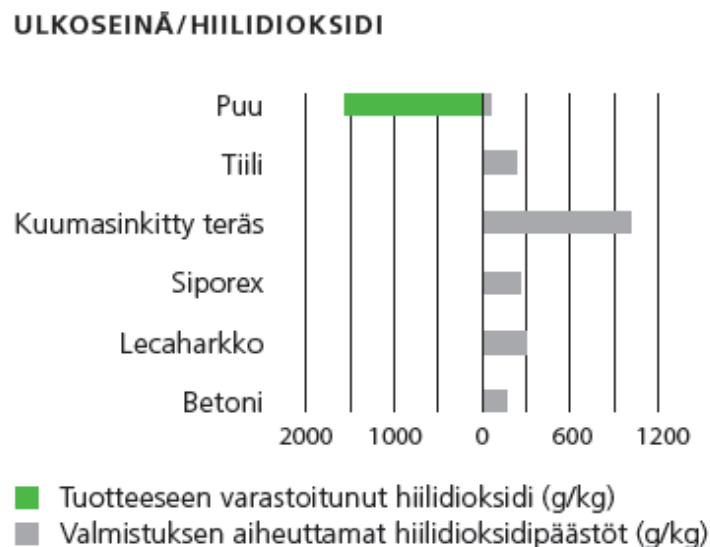
Kuva 2. Suomen puuvarantojen kasvu [2.]

Teräsbetonirakentamisen vahva asema 70-luvulta asti on tyypillistä suomalaiselle kerrostalorakentamiselle. Tähän on syynä tiukahkot paloturvallisuusmääräykset, jotka ovat kuitenkin viime vuosina muuttuneet puurakentamiselle edullisemmiksi. Suomen vahvaa betonielementtirakentamisen perinnettä voidaan kuitenkin hyödyntää myös puurakentamisessa, sillä puukerrostalot ovat lähes poikkeuksetta elementtirakenteisia. Myöskään työssä käsiteltävä FFTT-järjestelmä ei tee asiassa poikkeusta, sillä kaikki järjestelmän komponentit voidaan toteuttaa täysin esivalmistettuna. [3.]

Puun käytön lisäämisellä rakentamisessa toisi hyötyjä myös kansantaloudellisesti. Pelkkä kotimaisen puurakentamisen lisääminen toisi kuitenkin vain satoja uusia työpaikkoja, sillä samaan aikaan työpaikkoja vähenisi betoni- ja terästuoteteollisuudesta niiden markkinaosuuksien pienentyessä. [5.] Puukerrostalokonseptien kehittäminen ja niiden suosion nousu mahdollistaisivat kuitenkin viennin kasvattamisen, sillä kevyenä materiaalina puurakenteita, kuten CLT-elementtejä, on mahdollista kuljettaa taloudellisesti pitkiäkin matkoja. Metsäalan strategisen ohjelman mukainen tavoitteellinen 500 miljoonan euron viennin kasvattaminen toisi Suomeen jopa yli 6000 uutta työpaikkaa sekä lisäisi valtion verotuloja noin 70 miljoonalla eurolla [5.]. Puukerrostaloissa, kuten myös FFTT-järjestelmässä, käytetyt CLT-elementit lisäävät puutavaran käyttöä ja sen jalostusastetta ja näin ollen luovat enemmän kansantaloudellista hyötyä kuin pelkän sahatavaran käyttö rakennusmateriaalina. Esimerkiksi kuusikerroksisen sekarunkoisen normaalista liimapuusta valmistetun kerrostalon sahatavaran käyttö rakenteisiin olisi kerrosneliometriä kohti vain noin 0,07 kuutiometriä, kun vastaavassa CLT elementtitalossa sahatavaran käyttö olisi jopa 0,58 m<sup>3</sup>/kem<sup>2</sup>. [5.]

## 2.1 Hiilijalanjäljen pieneneminen

Merkittävimpiä hyötyjä puurakentamisen lisäämisessä on ympäristönäkökulma. Kansallisten päästömääräysten tiukentuessa on ekologisuus sekä hiilijalanjäljen laskenta tullut tärkeäksi myös rakennusalalla. Elinkaarimallitarkastelussa energiatehokkuusvaatimusten tiukentuessa ja rakennuksen käytön aikaisen energiankulutuksen pienentyessä nousevat rakennusmateriaalien valmistuksessa ja niiden kierrätyksessä syntyvät päästöt yhä suurempaan asemaan.



Kuva 3. Rakennusmateriaalien valmistuksessa syntyvät hiilidioksidipäästöt.[6.]

Rakentaminen ja rakennettu ympäristö tuottaa kaikista maailman hiilidioksidipäästöistä 40 %. Yksi merkittävin hiilidioksidin lähde tästä on sementin valmistus. Rakennusmateriaaleista puutuotteilla, kuten CLT-levyillä on pienin hiilijalanjälki. Hiilijalanjälki on negatiivinen, sillä kasvaessaan puu sitoo itseensä hiilidioksidia noin 1000 kg jokaista puukuutiometriä kohden. [6.]

Ilman puun käyttöä rakenteissa siihen puun kasvaessa sitoutunut hiilidioksidi vapautuu takaisin kiertoon sen lahotessa metsässä tai palaessa, joten puurakenteet ovat itsessään tärkeitä hiilidioksidiloukkuja. Puutuotteiden valmistuksessa syntyvä hake sekä sahanpuru ja itse puutuotteet elinkaarensa lopussa voidaan käyttää energian tuottamiseen, jolloin jätettä syntyy vain vähän. [2.]

### 3 CLT -levyt rakennusmateriaalina

FFTT-konseptin perusmateriaalina käytetään CLT-levyjä. Ristiin laminoitua eli CLT(cross laminated timber) rakennuslevyjä ovat massiivipuusta valmistettuja, ristiin liimatusta lamellikerroksista koostuvia levyjä. Eripaksuisia kerroksia voidaan valita 3, 5, 7 tai useampia CLT-levyjä maksimipaksuuden ollessa 400 mm. Jokainen kerros on laminoitu kohtisuoraan toisiaan vastaan formaldehydittömällä polyuretaaniliimalla. Ristiin laminointi takaa CLT-levyille niiden lujuuden sekä muotopysyvyyden. Tyypillisesti CLT-elementeissä käytettävä puulaji on kuusi, mutta myös muita puulajeja voidaan käyttää. CLT-elementin ulkopinnat luokitellaan näkyviin jäävään ja piilotettavaan luokkaan oksaisuuden ja puiden virheiden mukaan. [7.]



Kuva 4. Eri paksuisia CLT -levyjä [9.]

CLT-levyjen käyttökohteita ovat ulko- ja väliseinät, välipohjat sekä katot. Levyihin tehdään aukotus tehtaalla arkkitehtisuunnitelmien mukaan. Käytettäessä valmiita CLT-elementtejä tehtaalla levyihin lisätään myös tarvittavat eristeet, tiivisteet sekä verhoukset. Levyjen maksimitat ovat 2,95 m x 16 m, mikä mahdollistaa nopean asennustyön ja minimoi levyjen välisten liitosten määrän työmaalla. Liitoksien vähäinen määrä mahdollistaa ilmatiiviimmän rakentamisen. CLT-levyn etuja ovat lisäksi helppo työstettävyys työmaalla sekä rakenteiden yksinkertaisuus. Huomattavasti teräsbetonirakenteita kevyempänä CLT -rakennusten perustuskustannukset ovat etenkin heikohkoissa perustamisolosuhteissa pienemmät, eikä kalliita paalutuksia tarvitse tehdä yhtä paljon. [9.]



Kuva 5. Tyypillinen CLT -seinäelementti esivalmistetuilla ovi- ja ikkuna-aukoilla. [9.]

CLT-levyjen etuna ovat myös siinä käytettävän puun laatuvaatimukset. Vaikka sahatarava olisikin heikkolaatuista, saavutetaan CLT-levyillä liimauksen ja ristiin asettelun ansiosta vaadittu lujuus. Näkyvät kerrokset voidaan tarvittaessa valmistaa visuaalisesti hyvälaatuisella puutavaralla, jolloin elementtien pinnat voidaan jättää halutessa verhoilematta, kun palomääräykset otetaan huomioon.[12.]

### 3.1 CLT-levyjen rakenteellinen toiminta

CLT-levyt toimivat rakenteessa kantavana ja jäykistävänä rakenteena. Lujuuslaskennassa CLT-levyjen lujutena voidaan käyttää puutavaran, useimmiten C24, lujutta. C24 luokka tarkoittaa puutavaraa, jonka taivutuslujuus on  $24 \text{ N/mm}^2$ . CLT-levyn höyrynläpäisevyys on todettu laboratoriomittauksissa lähes olemattomaksi, joten se toimii myös höyrynsuluttomana rakenteena. Tämä vaatii erityistä huomiota saumojen tiivistämiseen. CLT-levyillä on myös matala lämmönläpäisykerroin ( $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), joten se toimii osaltaan myös lämmöneristeenä [7.]. CLT-levyissä ei ilmene juurikaan puulle tyypillistä kuivumiskutistumista, koska levyjen kosteuspitoisuus tasautuu jo valmistusvaiheessa 8-10 % väliin. Tavallisen sahatavaran kosteuspitoisuus vaihtelee 15 – 25 % välillä [16.]. Korkeissa rakennuksissa kutistumat voivat muodostua merkittäviksi. Rakenteellisesti vähemmän merkityksellisessä paksuussuunnassa kutistumista voi kuitenkin hieman ilmetä. CLT-elementtien ja muiden puutuotteiden kuivumiskutistuminen normaaleissa kosteusolosuhteissa on pituus- ja leveyssuunnassa vain 0,02 % puun kosteuden muuttuessa yhden prosentin. Paksuussuunnassa sama kutistuma on 0,24 %. [7.]

CLT – teknisiä tietoja	
<b>Mittavaihtelu kosteuspitoisuuden mukaan</b>	Laajenema ja kutistuma DIN 1052:2008 -standardin mukaisesti normaalikosteusolosuhteissa: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pituus-/leveyssuunnassa: 0,02 prosenttia puun kosteuspitoisuuden muuttuessa yhden prosentin</li> <li>▪ Paksuudessa: 0,24 prosenttia puun kosteuspitoisuuden muuttuessa yhden prosentin</li> </ul>
<b>Paloluokitus, pintaluokka</b>	Euroopan komission päätöksen 2003/43/EY mukaisesti: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Puulevyt pois lukien lattiat → Euroclass D-s2, d0</li> <li>▪ Lattiat → Euroclass Dfl-s1</li> </ul>
<b>Vesihöyryn diffuusioresistanssi <math>\mu</math></b>	EN 12524 -standardin mukaan → 20–50
<b>Lämmönläpäisykerroin <math>\lambda</math></b>	0,11 $\text{W/m}^2\text{K}$ (SP Sweden raportti 10.7.2009)
<b>Ominaislämpökapasiteetti, <math>c_p</math></b>	EN 12524 -standardin mukaan → 1600 $\text{J/(kgK)}$
<b>Ilmatiivisyys</b>	CLT valmistetaan yksittäisistä levyistä, minkä ansiosta ilmatiivisyys on erinomainen. 3-kerroksisen CLT-levyn ja sen puskusaumojen ilmatiivisyys on testattu EN 12114 -standardin mukaisesti. Kokeessa todettiin ilmavuodon olevan niin pieni, ettei sitä pystytty mittaamaan.
<b>Käyttöluokat/käyttö</b>	Soveltuu EN 1995-1-1 -standardin mukaisiin käyttöluokkiin 1 ja 2

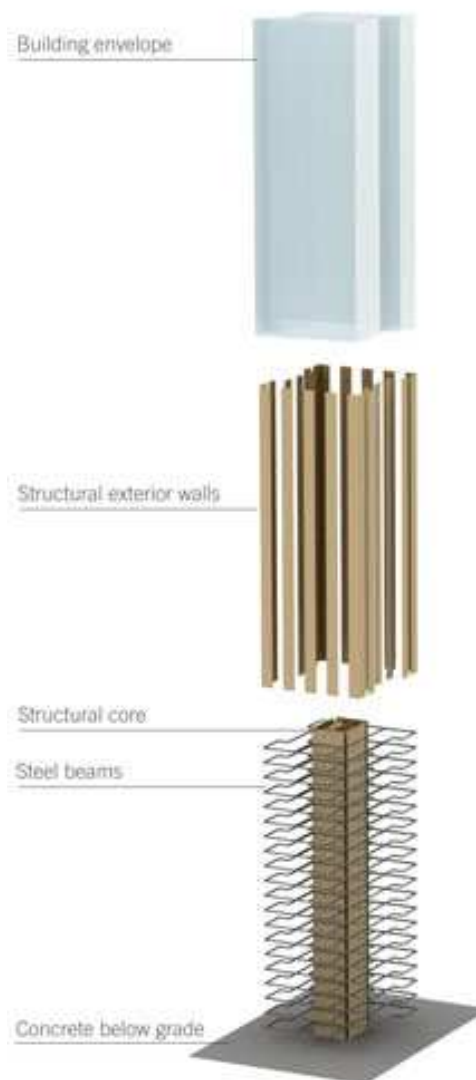
Kuva 6. Stora Enson CLT:n materiaaliominaisuuksia [7]

Eurokoodissa SFS-EN 1995-1-1 ei ole erillistä ohjetta CLT:tä koskien, eikä puurakenteiden suunnitteluohjeita voi aina suoranaisesti käyttää CLT-elementtien mitoituksessa.

Euroopassa CLT -elementtien laskenta perustuu yleensä mekaanisin liittimin koottujen palkkien teoriaan, joka on esitetty eurokoodissa SFS - EN 1995-1-1 liitteessä B. [8.]

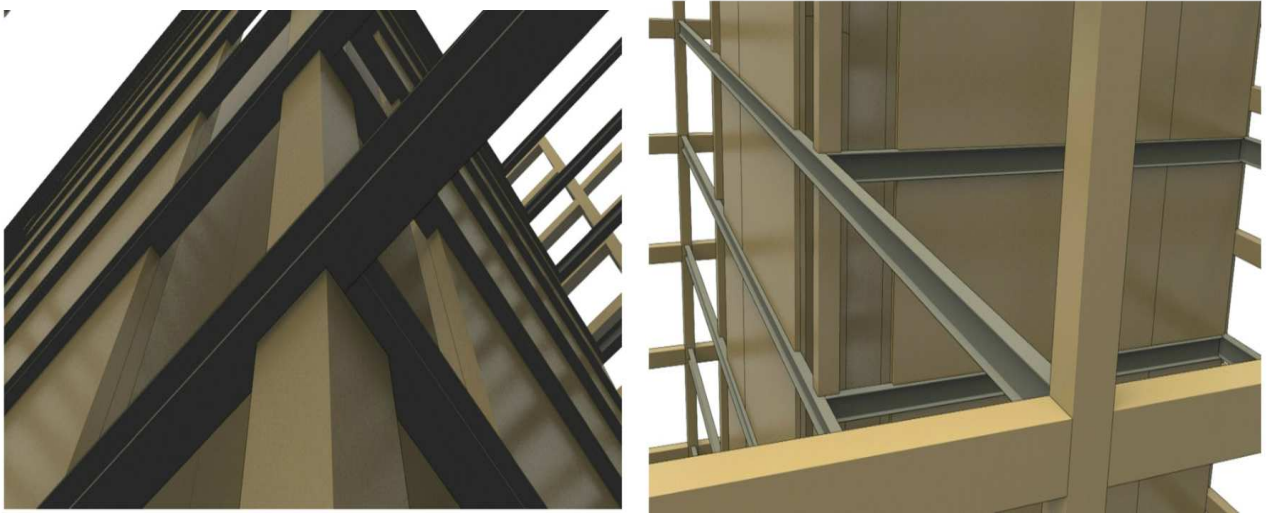
#### 4 FFTT-rakennusjärjestelmä

FFTT-järjestelmä on kanadalaisen arkkitehdin Michael Greenin työryhmän vuonna 2012 kehittämä avoin puukerrostalokonsepti. Se mahdollistaa jopa 30-kerroksisten puutalojen rakentamisen. Järjestelmä perustuu CLT-levyihin, joita käytetään ulko- ja väliseinissä, välipohjissa ja hissikuilussa. Se soveltuu erikorkuisina vaihtoehtoina asuin- ja toimitilarakentamiseen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös Kertopuu- tai LSL-levyjä. LSL-levyt ovat puulastuista liimaamalla ja puristamalla valmistettuja levyjä.



Kuva 7. FFTT-järjestelmän rakenteet, kantavat ulkoseinät, kantava hissikuilu sekä teräspalkisto [8].

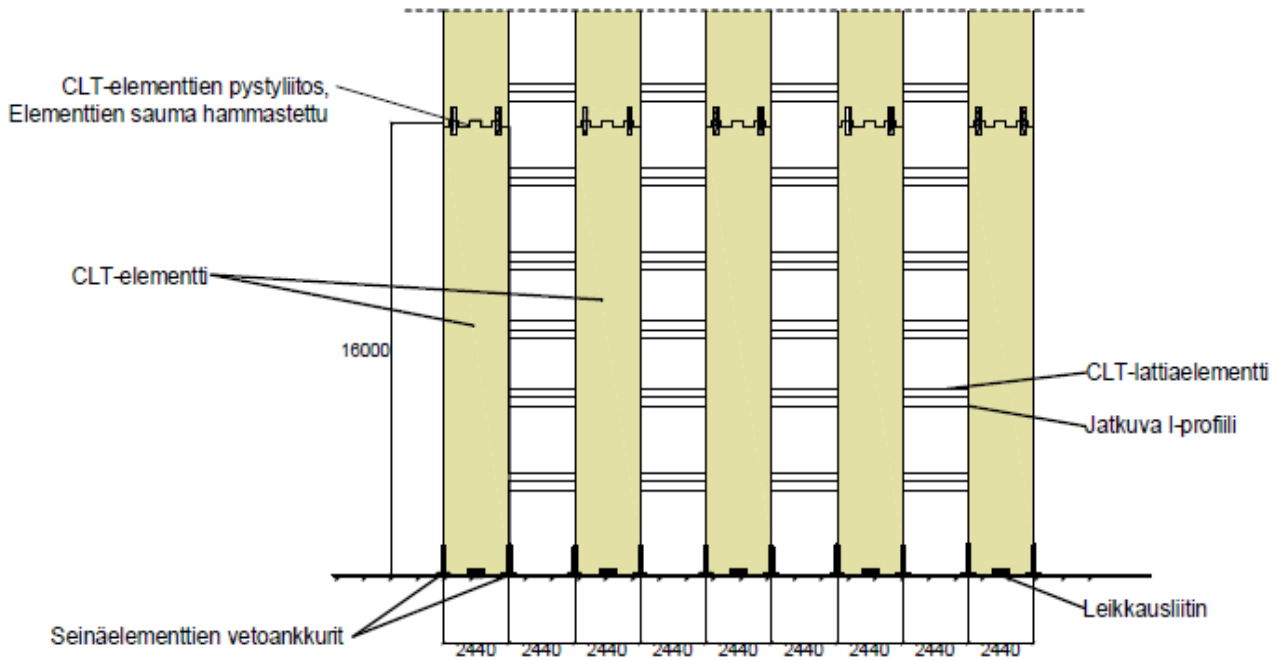
Alle 12-kerroksiset FTTT-järjestelmän rakennukset voidaan toteuttaa myös pilari-palkki-rungolla. Tällöin CLT-levyjä käytetään hissikuilussa ja rakennuksen keskiosassa sijaitsevassa porraskäytävässä. Järjestelmässä välipohja tukeutuu teräspalkkeihin, jotka kiinnitetään CLT-elementteihin tai liimapuupilareihin pulttiliitoksella. Teräspalkkien tehtävänä on välipohjan kannatteleminen lisäksi lisätä rakennuksen joustavuutta, jota vaaditaan maanjäristysmitoituksessa. Lisäksi teräsprofiilit kiinnittävät julkisivut hissikuiluun sekä toisiinsa, ja mahdollistavat vaakavoimien siirtymisen seinien kautta perustuksille. Niiden tavoite on myös nopeuttaa rakentamista. Teräsprofiilien kiinnitys seinäelementteihin näkyy tarkemmin kuvassa 13. [8.]



Kuva 8. Teräspalkkien sijoittuminen CLT-profiileihin [8.]

Järjestelmä eroaa aikaisemmista puukerrostalokonsepteista CLT-levyjen asettelussa. Tavanomaisessa puurakentamisessa levyt ovat tyypillisesti yhden kerroksen korkuisia, ja rakennettaessa edetään kerroskorkeuden verran kerrallaan. FTTT-järjestelmässä CLT-elementit asetetaan julkisivulle pystyyn ja kytketään toisiinsa teräsprofiililla. Yhdellä elementillä kyetään pystyttämään edelliseen verrattuna 6 kerrosta julkisivua.





Kuva 9. FFTT-järjestelmän julkisivu ja sen liitokset

Kantavien pystyelementtien väli voidaan jättää ikkunaksi. Tämä minimoi työmaalla tehtävät elementtien liitokset, sillä vaakaliitoksia ei ikkunoiden liitoksia lukuun ottamatta julkisivulle tule ollenkaan. Julkisivuelementtien liitoksia 30-kerroksinen 90 metriä korkea talo vaatii CLT-elementeistä valmistettaessa vain 5 kappaletta, sillä yhden elementin maksimimitta on 16 metriä.[8.]



Kuva 10. Näkymä FFTT-tornista Kruunuhakaan, Kuva: Työn ohessa tehty ArchiCad malli.

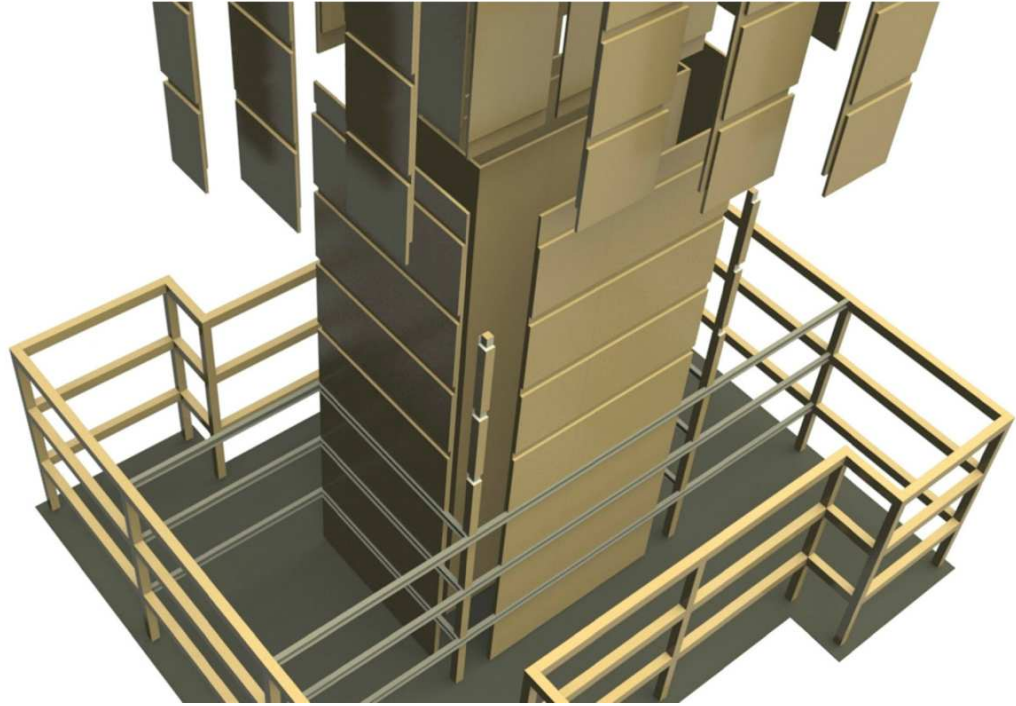
FFTT-konseptista on raporttiin tehty neljä erilaista rakenteellista ratkaisua, riippuen toivotusta kerrosmäärästä. Matalammat ratkaisut alle 12- kerroksiset voidaan toteuttaa myös osittain liimapuulla kuvan 12 mukaisesti, kun taas korkeimmissa 20- ja 30- kerroksisissa rakennuksissa tarvitaan järeämpää CLT:tä.

FFTT-järjestelmän nopea ja yksinkertainen rakennustapa mahdollistaa hintakilpailun teräsbetonisia rakennuksiin nähden. Myöskään rakennustyöntekijät eivät tarvitse vaativaa erikoiskoulutusta. FFTT-konseptin raportin arvion mukaan, Kanadan markkinoilla 20- kerroksisen FFTT-tornin kustannukset tulisivat olemaan vain noin 1,5 % suuremmat kuin vastaavan paikalla valetun teräsbetonisen rakennuksen. [8.]



Kuva 11. FFTT-torni kantavilla väliseinillä tekee julkisivun suunnittelun vapaammaksi [8.]

FFTT-järjestelmässä säästöä syntyy vastaavaan betonirakennukseen verrattuna nopean valmistumisen lisäksi myös perustamiskustannuksissa. CLT-rakennus painaa noin neljä kertaa vähemmän kuin vastaava teräsbetonirunkoinen rakennus. Tämä mahdollistaa jopa 70 % kevyemmät perustukset [17]. Rakentamisen nopeus tuo hyötyä myös sijoittajille, sillä kiinteistöihin sijoitettu pääoma saadaan tuottamaan nopeammin lyhyen rakentamisajan ansiosta. [5.]



Kuva 12. FFJT-tornin liimapuinen ulkokehä kiinnitetään teräsprofiilein hissikuiluun. Liimapuuta käytettäessä voidaan rakentaa 12-kerroksinen rakennus. [8.]

Joissain CLT-rakentamistavoissa ulkoseinien jatkuessa välipohjien päältä CLT-levyille tyypillinen paksuussuuntainen kuivumiskutistuminen voi korkeassa rakennuksessa muodostua haitallisen suureksi. FFJT-järjestelmässä välipohjien kutistuminen ei aiheuta ongelmia, sillä jokainen välipohja tukeutuu teräsprofiilin päälle, eikä näin ollen aiheuta moninkertaista kutistumista kerrosten lukumäärän mukaan. Välipohja kiinnitetään pilareihin itseporautuvilla ruuveilla. [8.]

## 4.1 Rakenteet

### 4.1.1 Ulkoseinät

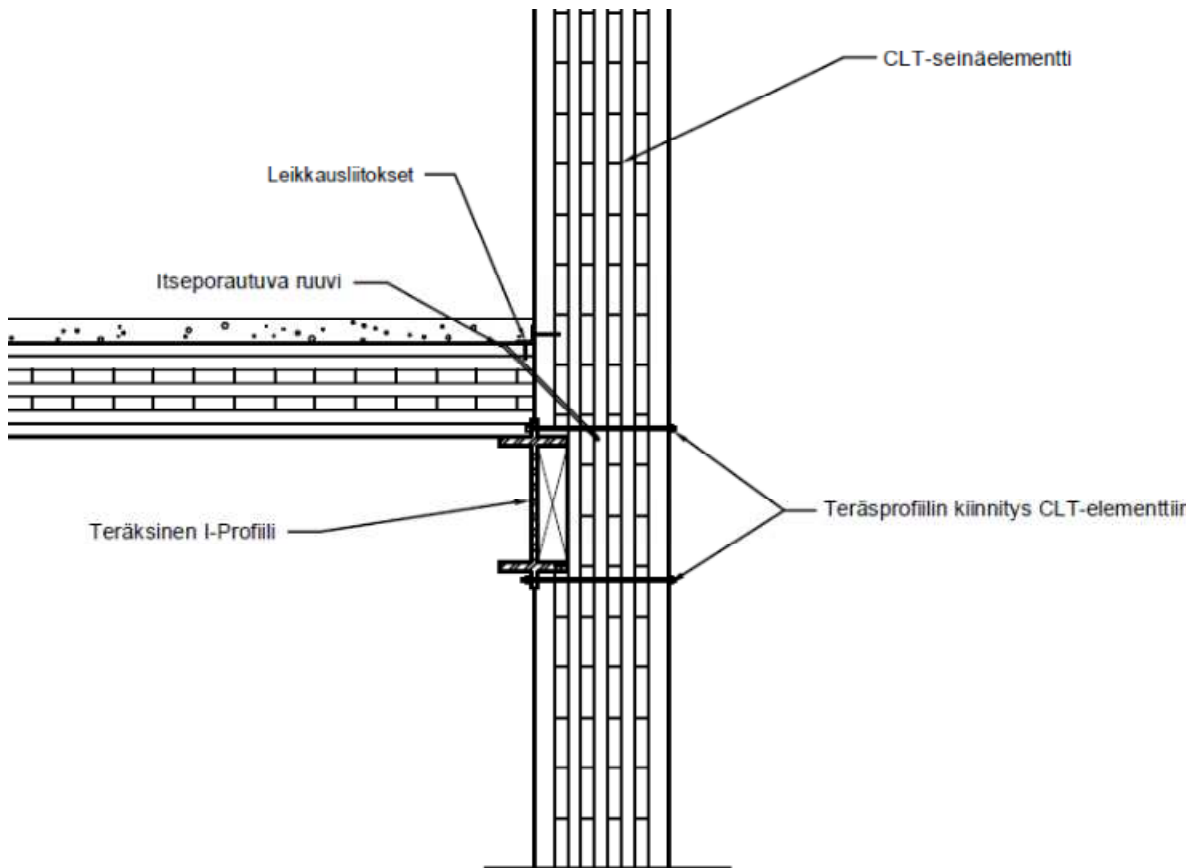
Korkeimmissa vaihtoehdoissa ulkoseininä toimivat CLT-pilarit ovat mitoiltaan 2400 mm x 300 mm. Yksi pilari on 16 metriä korkea ja ne kytketään toisiinsa teräsprofiileilla. Pilareiden välit raportissa ovat kokonaan ikkunoita, mutta myös muita ratkaisuja voidaan käyttää. Toisella julkisivulla seinäelementtien koot vaihtelevat 1000 mm x 300 mm ja 2600 mm x 300 mm välillä.[8.]

### 4.1.2 Väliseinät

Hissikuilun ja porrashuoneen kantavat väliseinät ovat CLT-elementtejä, joiden paksuus on 200 mm, korkeus 16 m ja pilareiden leveys vaihtelee sijoituksen mukaan. Kantavana rakenteena toimivat väliseinien ja hissikuilun lisäksi myös limapuupilarit. Joissain vaihtoehdoissa käytetään lisäksi myös huoneistojen välisiä seiniä kantavana rakenteena. [8.]

### 4.1.3 Välipohja

Välipohjana toimii CLT-elementin ja betonin liittorakenne. CLT-elementtinä FFTT-raportissa on esitetty esimerkkinä 200 mm CLT-elementti, jonka päällä on jälkivalettu 51 mm betonilaatta. Välipohjaan olennaisena kuuluu myös teräksestä valmistettu I-profiili, jonka päälle välipohjalaatat vapaasti tukeutuvat. Profiilin mitoitus ei otettu raportissa tarkemmin kantaa. Välipohja sijoittuu teräsprofiilin päälle, ja se kiinnitetään itseporautuvilla ruuveilla seinäelementtiin kuvan 13 mukaisesti. [8.]



Kuva 13. Välipohjan liittyminen ja tukeutuminen seinärakenteeseen ja teräsprofiiliin.

Teräsprofiili, jonka päälle välipohja tukeutuu, kiinnitetään seinäelementtiin kuvan 13 mukaisella pulttiliitoksella. Leikkausliittimet välipohjan ja seinäelementtien välillä siirtävät vaakasuuntaiset tuulikuormat seinää pitkin perustuksille.

#### 4.1.4 Rungon jäykistäminen

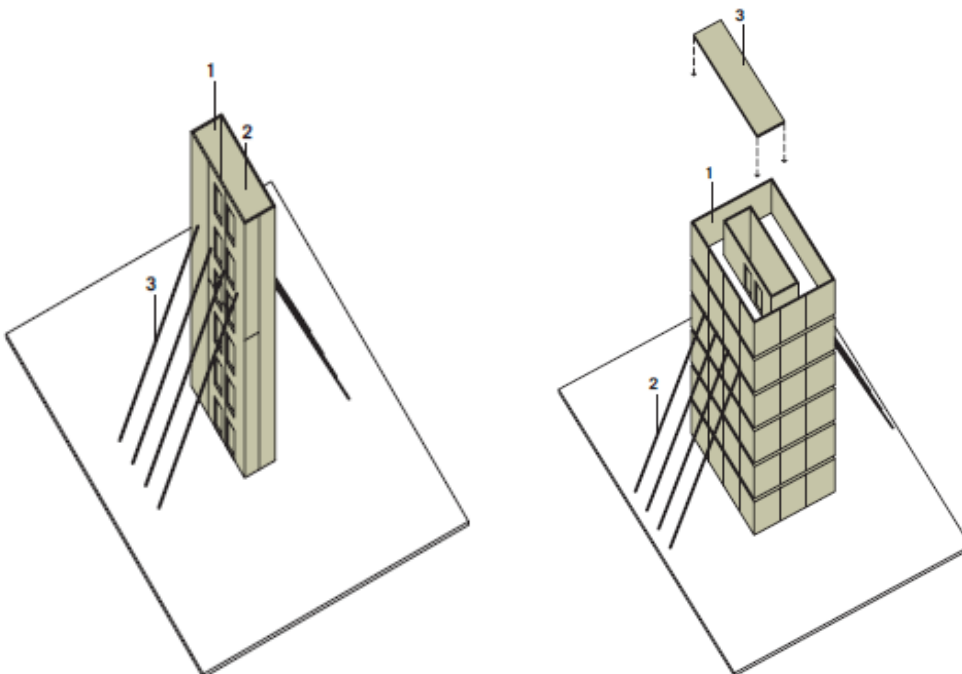
FFTT-järjestelmän rungon jäykistäminen perustuu mastopilareina toimiviin julkisivuelementteihin sekä jäykkinä levyinä toimiviin välipohjiin teräsprofiileineen. Lisäksi rakennuksen keskellä sijaitsevat hissikuilu sekä porraskäytävän rakenteet toimivat sydänjäykistyksen periaatteella. Rungon jäykistyksen ja jatkuvan sortumisen osalta Suomen lainsäädäntö edellyttää seuraamusluokan 3b rakennuksiin (mm. kaikki yli 15 kerrosta korkeat rakennukset) järjestelmällistä riskiarviointia, jolloin otetaan huomioon sekä ennakoitavissa olevat että ennakoimattomat vaaratilanteet. Riskiarviointi on tästä työstä kuitenkin rajattu sen laajuuden vuoksi pois.

## 4.2 FFTT-järjestelmän rakentaminen

FFTT-järjestelmän rakennettavuus on suunniteltu kustannuksia silmällä pitäen, jotta puurakentaminen pystyisi kilpailemaan teräs- ja betonirakentamisen kanssa. Tärkein kustannuksiin vaikuttava tekijä on sen nopea rakennettavuus. FFTT-järjestelmässä kaikki puiset rakennusosat ovat esivalmistettuja mahdollisimman nopean ja yksinkertaisen asennuksen varmistamiseksi. Teräspalkkien ja seinäelementtien liitokset on suunniteltu yksinkertaisiksi, joka mahdollistaa useiden elementtien liittämisen toisiinsa jo maassa. Tämä tekee mahdolliseksi kuuden kerroksen korkuisten seinien pystytyksen yhdellä nostolla.[8.]

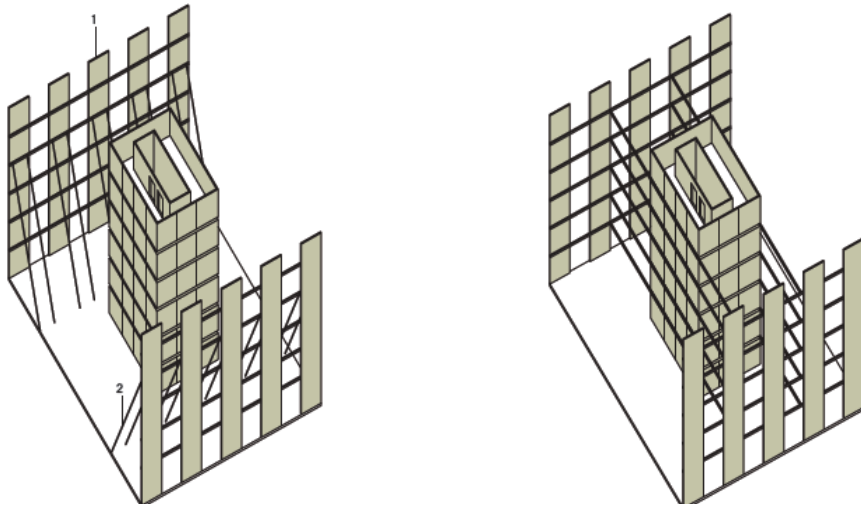
### 4.2.1 Rakennusvaiheet

Rakennuksen toteutettavuuteen nopeasti ja yksinkertaisesti on kiinnitetty huomiota, jotta järjestelmä pystyisi kilpailemaan betonirakentamisen kanssa. Ensimmäisessä rakennusvaiheessa pystytetään rakennuksen CLT-elementeistä valmistettu hissikuilu ja sitä ympäröivät seinät. Seinät tuetaan erillisillä tuilla kuvan 14 mukaisesti, kunnes julkisivun teräspalkkisto on liitetty toisiinsa. Myös portaat sekä porraskäytävän välipohjaelementit asennetaan paikoilleen. Kun koko porraskäytävä hissikuiluineen on pystytetty ja kiinnitetty, erilliset kuvan 14 mukaiset vinotuet poistetaan.[8.]



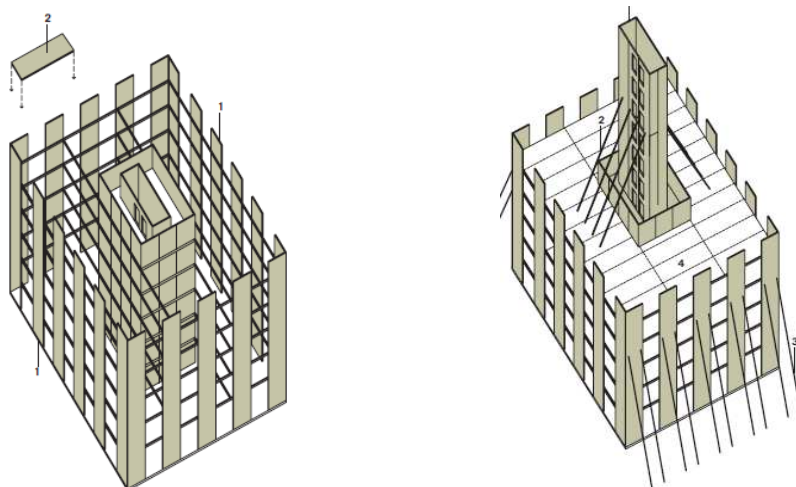
Kuva 14. FFTT-järjestelmän ensimmäinen rakennusvaihe [8.]

Seuraavaksi nostetaan pystyyn ulkoseinät, joihin jo maan pinnalla on kiinnitetty teräspalkkisto (Kuva 15). Pystytetyt julkisivut kiinnitetään toisiinsa teräspalkeilla, jotka kiinnittävät myös hissikuilun ja sisäkuoren seinät julkisivuihin. Teräspalkkien ollessa kytketyt toisiinsa, voidaan rakennusaikaiset tuet poistaa (Kuva 15).[8.]



Kuva 15. Toinen vaihe. Julkisivujen kiinnitys teräsprofiileilla toisiinsa. [8.]

Loput julkisivuelementit, jotka on kytketty maassa toisiinsa teräsprofiilein, nostetaan paikoilleen. Tämän jälkeen rakennusaikaiset vinotuennat voidaan poistaa rakennuksen sisäpuolelta (Kuva 15). Seinien ja teräspalkiston ollessa pystyssä, voidaan kuuden ensimmäisen kerroksen välipohjajaelementit laskea paikoilleen teräsprofiilien päälle. Elementit asennetaan paikoilleen ja kiinnitetään ulkoseiniin.



Kuva 16. Kun kuuden ensimmäisen kerroksen välipohjajalaatat on kytketty toisiinsa, aloitetaan seuraavien kerrosten rakentaminen ensimmäisen vaiheen mukaan. [8.]

Kuuden ensimmäisen kerroksen ollessa seinien, teräsprofiilien ja välipohjan osalta valmis, aloitetaan seuraavien kerrosten rakentaminen samalla tavalla kuin ensimmäisten kerrosten (Kuva 16). Alempien kerrosten seinät tuetaan pystytyksen ajaksi ulkopuolisilla tuilla.[8.]

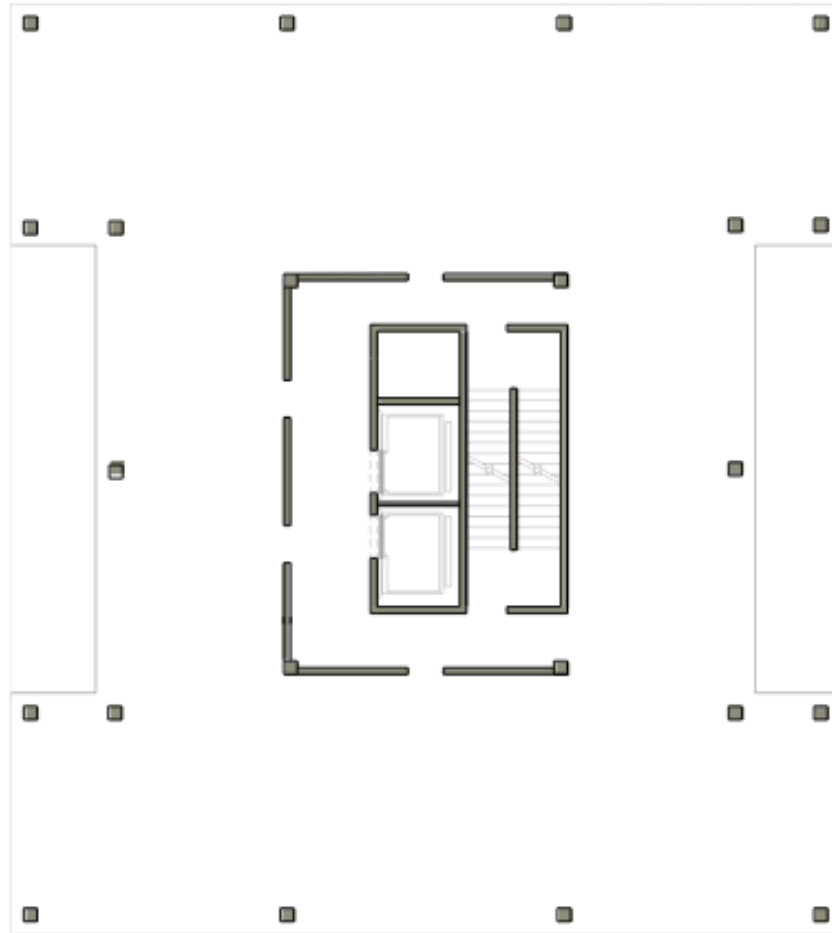
### 4.3 Pohjaratkaisut

FFTT-raportissa tutkitaan neljää erilaista rakenteellista vaihtoehtoa, jotka mahdollistavat eri korkuisten rakennusten rakentamisen. Eroavaisuuksia vaihtoehdoissa on kantavien seinien sijoittelussa sekä palkiston materiaalissa. Matalammat 12-kerroksiset rakennukset on mahdollista toteuttaa osin liimapuupalkeilla sekä pilareilla. Tässä työssä keskitytään 30-kerroksisen rakennukset mahdollistaviin vaihtoehtoihin, joissa kaikki palkistot ovat terästä. FFTT-raportin mukaan myös vaihtoehto 3 mahdollistaa 30-kerroksisen rakennuksen, vaikka se ensisijaisesti onkin kehitetty 20-kerroksisten rakennusten suunnitteluun. Rakennuksen ulkomitat kaikissa tapauksissa ovat 21 m x 28 m. [8.]

#### 4.3.1 Vaihtoehto 1:

Vaihtoehdossa 1 rakennus toteutetaan pilari-palkki rungolla, sekä kantavalla hissikuilulla ja porraskäytävällä. Pilarit, hissikuilu, porraskäytävän seinät ja palkit ovat liimapuusta. CLT-elementtejä käytetään rakennuksen hissikuiluissa sekä porraskäytävässä, joiden varaan runko jäykistetään. CLT-elementtien ja liimapuupilarien sijainti näkyy kuvissa 17 ja 12. Vaihtoehto tekee mahdolliseksi 12-kerroksisten rakennuksen toteuttamisen. Vaihtoehto mahdollistaa julkisivujen ja kerrosten pohjaratkaisuiden vapaamman suunnittelun, sillä kantavat väliseinät sijaitsevat keskellä rakennusta. [8.]



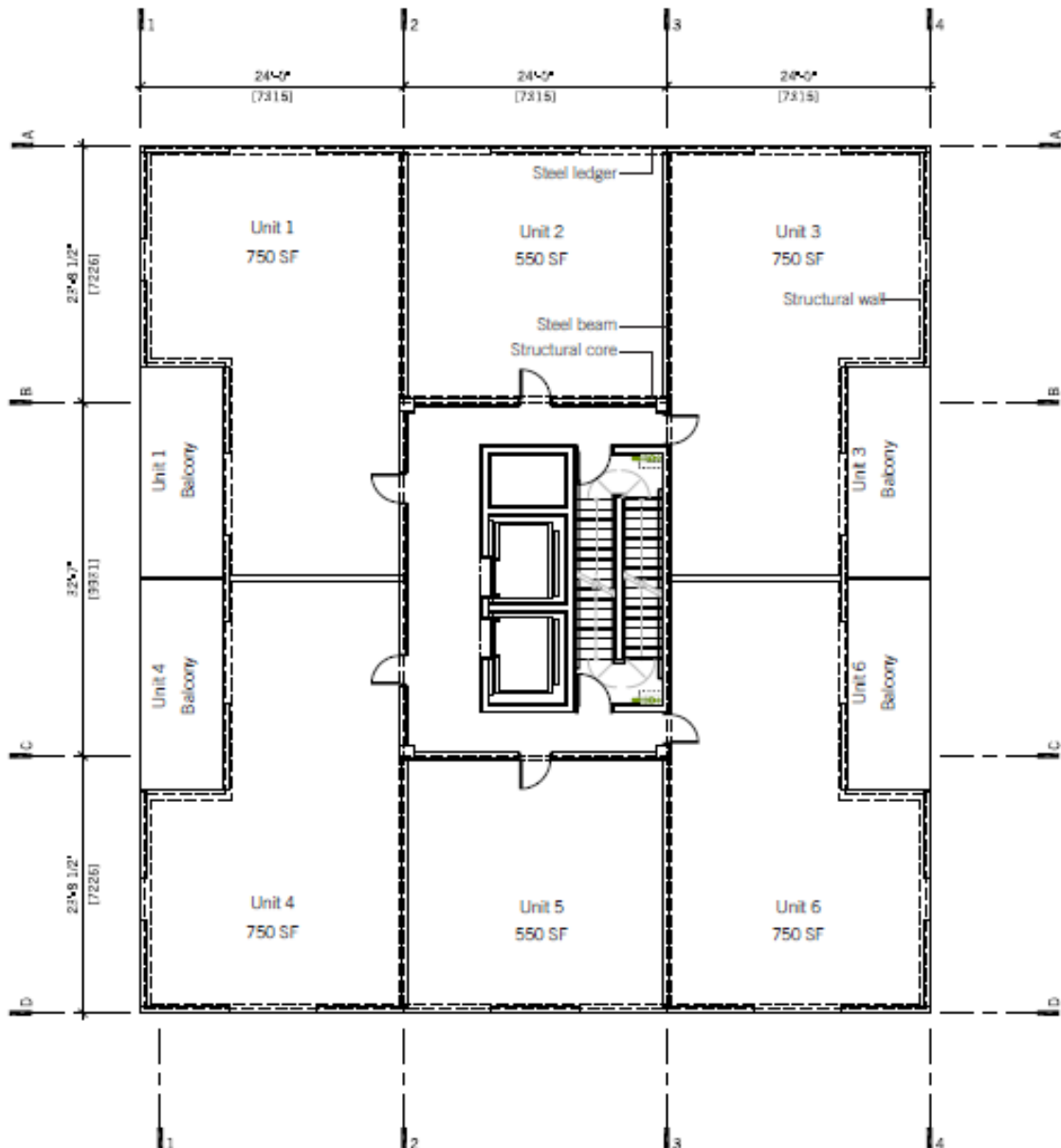


Kuva 17. 12-kerroksisen FTT-tornin kantavien seinien ja pilareiden sijoittuminen.[8.]

#### 4.3.2 Vaihtoehdot 2 ja 3: 20-kerrosta/30-kerrosta

20-kerroksinen rakennus voidaan FTT-järjestelmässä toteuttaa kantavilla väliseinillä sekä liimapuupilareilla, joihin teräspalkisto tukeutuu, tai kantavilla ulkoseinillä, jolloin liimapuupilareita ei tarvita. Lisäksi molemmissa vaihtoehdoissa käytetään porrastiloja sekä hissikuiluja rakennusta kantavana sekä jäykistävänä elementtinä. Portaat ja kaikki kantavat seinät hissikuilut mukaan lukien ovat toteutettu CLT-elementeistä. Lisäksi porraskäytävän reunoilla sijaitsee liimapuupilarit. Teräspalkisto kiertää rakennuksen ulkoseinien myötäisesti sekä kiinnittää hissikuilun rakennuksen julkisivuihin. Välipohjalaatat tukeutuvat teräsprofiiliin.[8.]

Ratkaisu, jossa käytetään kantavia väliseiniä, ei sovellu toimitilarakentamiseen tilojen huonon muunneltavuuden takia. Sen etuna on julkisivujen vapaampi suunnittelu. Kantavien julkisivujen avulla kerrostila saadaan hyödynnettyä tehokkaammin, sillä tilaa rajaavia pilareita eikä väliseiniä tarvita. Tämä tekee mahdolliseksi toimitilarakentamisessa vaadittavan tilojen muunneltavuuden mahdollisuus rakennuksen käyttötarkoitusten muuttuessa. Kantavat seinät sijoittuvat rakennukseen kuvan 18 mukaisesti.



Kuva 18. FFTT-tornin pohjaratkaisu kantavilla julkisivuilla sekä väliseinillä [8.]

Alkuperäisen Tall Wood -raportin tekijät huomasivat tämän vaihtoehdon toimivan myös 30-kerroksisena. Tässä työssä keskitytään tutkimaan tätä mallia, jossa ei ole kantavia väliseiniä hissikuilua ja porraskäytävän seiniä lukuun ottamatta. [8.]

### 4.3.3 Vaihtoehto 4: 30-kerrosta

30 -kerroksisen puukerrostalon mahdollistava vaihtoehto vaatii kantavat julkisivut sekä väliseinät. Tämä rajoittaa vaihtoehdon asuntorakentamiseen. 30-kerroksinen vaihtoehdon edut ovat pelkästään sen korkeus, sillä kantavat väliseinät ja julkisivut rajoittavat rakennuksen käyttöä, muunneltavuutta ja julkisivun suunnittelun vapautta merkittävästi. [8.]

## 5 Kuormat Eurokoodin mukaan

### 1.1 Lähtötiedot

FFTT -raportti määrittää rakenteet seuraavasti:

Rakennusmateriaalit: Puu, teräs sekä jälkivalettu betoni välipohjien pintarakenteena. Jälkivalettu betoni osallistuu välipohjien jäykkyuden parantamiseen.

Seinät: CLT-elementit. Ulkoseinien seinäelementtien mitat ovat 300x2400 mm. Yhden seinäelementin korkeus on 16 metriä. Kantavaan rakenteeseen voidaan tarvittaessa lisätä lämmöneristettä, sekä julkisivuverhoilu. Kantavien ulkoseinien väliin jäävät 2,4 metriä leveät aukot voidaan hyödyntää ikkunoina. Ulkoseinät kiinnitetään molemmista reunoistaan jäykällä pulttiliitoksilla perustuksiin. Ulkoseinät toimivat mastopilareina, jotta rakennuksen runko saadaan jäykistettyä. Väliseinien paksuus on 200 mm ja ne on valmistettu CLT-elementeistä. Väliseinät toimivat kanavina rakenteina hissikulussa sekä porraskäytävässä.

Välipohjat: 200mm CLT-elementti, 51 mm pintabetonivalu, joka muodostaa liittorakenteen. Välipohja tukeutuu rakennusta kiertävän teräsprofiilin päälle. Teräsprofiili toimii myös ikkunan ylityspalkkina.

Sijainti: Helsinki, Lumikuorma maanpinnalla 2,5 kN/m<sup>2</sup>

Seuraamusluokka on CC3, yli 8-kerrosta. Seuraamusluokan vuoksi lisätään rakenteiden kestävyysvarmuutta kertomalla saadut murtorajatilakuormat kuormakertoimella  $K_{FI} = 1,1$

## 1.2 Kuormat kanadalaisten lainsäädännön mukaan

FFTT-raportin rakenteiden kestävyuden laskennassa on käytetty kanadalaista lainsäädäntöä. Suurin eroavaisuus suomalaiseseen laskentaan on tuulikuormien määräytyminen. FFTT-raportissa julkisivuun vaikuttava tuulenpaine on vain 0,48 kN/m<sup>2</sup>, kun taas eurokoodi SFS-EN 1991 mukaiseksi tuulenpaineeksi saatiin maksimissaan 1,74 kN/m<sup>2</sup> [8]. Laskelmat tuulikuormista on esitetty jäljempänä. Tuulenpaineen aiheuttamien vaakavoimien ja mahdollisten kaatavien voimien aiheuttamiin kuormituksiin on kiinnitetty huomiota. Myös eurokoodi SFS-EN 1995-1 ohjeen tiukkaan välipohjan värähtelymitoitukseen on kiinnitetty huomiota.

## 5.1 Pystykuormat

Rakennuksen kuormina on käytetty Eurokoodin SFS-EN 1991-1-1 ja sen kansallisen liitteen mukaisia kuormia. Se määrittää pystykuormat seuraavasti:

Hyötykuormat:

Toimistorakennus: 3 kN/m<sup>2</sup>

Asuinrakennus: 2 kN/m<sup>2</sup>

Laskelmissa käytetään asuinrakennuksen hyötykuormaa 2 kN/m<sup>2</sup>

Välipohjan omapainona on käytetty FFTT-raportin antamaa omaa painoa, joka muodostuu seuraavasti:

CLT -levy + pintabetoni + talotekniikka = 4 kN/m<sup>2</sup>

### 5.1.1 Murtorajatilamitoitus

Lasketaan Laskentamalliin syötettävät pystysuuntaiset kuormat.

$$g_d = \gamma^* G_{i,inf} + \gamma_{q,1} q_{k,1} \quad (1)$$

*Hyötykuorma:*

$$q_d = 1,1 \cdot 1,5 \cdot 2 \text{ kN/m} = 3,3 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

*Hyötykuorma + oma paino, jota tarvitaan välipohjan mitoituksessa:*

Koska kyseessä seuraamusluokka CC3, kuormakerroin  $K_{F1}=1,1$ .

$$q_d = 1,1 \cdot (1,15 \cdot 4 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 2 \text{ kN/m}^2) = 8,36 \text{ kN/m}^2 \quad (3)$$

*Lumikuorma katolle*

Loiva katto, lumikuorma maanpinnalla Helsingissä  $2,5 \text{ kN/m}^2$

$$q_{lumi} = 0,8 \cdot 2,5 \text{ kN/m}^2 = 2 \text{ kN/m}^2 \quad (4)$$

## 5.2 Vaakakuormat

### 5.2.1 Tuulikuorma

Tuulikuormien laskennassa on käytetty eurokoodia SFS EN 1994-1-1 ja sen kansallista liitettä, joka soveltuu alle 200 m korkeiden rakennuksien laskentaan. Oletetaan rakennuksen sijaitsevan Helsingissä meren läheisyydessä tasaisessa maastossa. Viereisien rakennuksien ei oleteta aiheuttavan turbulenssia rakennukseen. Raportissa tutkitaan vain pitkälle sivulle kohdistuvan tuulikuorman aiheuttamat voimat.

*Pitkä sivu*

$$\text{Korkeus } h = 3 \text{ m} \times 20 = 90 \text{ m} \quad (5)$$

$$\text{Leveys } b = 24,38 \text{ m}$$

Julkisivun pinta-ala:

$$A = 24,380 \text{ m} \cdot 90 \text{ m} = 2194,2 \text{ m}^2 \quad (6)$$

Maastoluokka 0.

Referenssituulennopeus  $22 \text{ m/s}$  (käytetään rannikkoalueen tuulennopeutta).

Kun maastoluokka ja referenssituulennopeus  $v$  [m/s] tunnetaan, niin laskelmissa käytettävä perustuulikuorma, puuskanopeuspaine  $q_p$  [kN/m<sup>2</sup>], voidaan laskea korkeudella  $z$  [m] kaavasta

$$q_p = k_r^2 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 7 \right] \cdot \frac{v^2}{1600}, \text{ jossa} \quad (7)$$

$$k_r = 0,18$$

$z$  = rakennuksen korkeus

$z_0$  = rosoisuusmitta, joka riippuu maastoluokasta

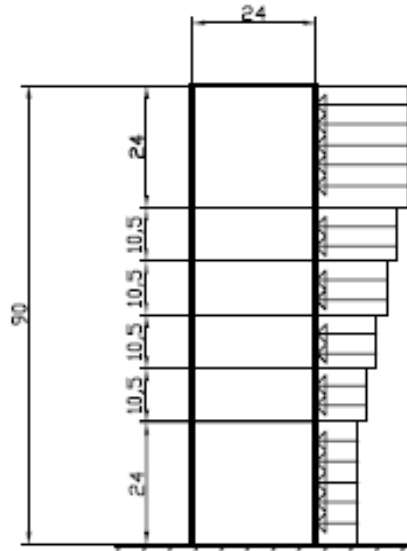
$v$  = Tuulen referenssinopeus, merialueilla 22 m/s

Kaavaa voidaan käyttää olettaen, että rakennus ei sijaitse korkealla mäellä (kerroin  $1_0=c$ ), vieressä ei ole muita rakennuksia ja ilman tiheys on 1.25 kg/m<sup>3</sup> ja tietty turbulenssikerroin ( $ik$ ) on arvossa 1. [10.]

Maastoluokka	$z_0$ m	$z_{min}$ m
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuullesteitä	0,01	1
II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuullesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)	0,3	5
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m	1,0	10
HUOM. Liitekohdassa A.1 on kuvia maastoluokista.		

Taulukko 1. Maastoluokat ja maastoparametrit [11, s.36.]

Taulukosta 1 nähdään, että maastoluokassa 0,  $z_0 = 0,003$



Kuva 19. Tuulikuorman muodostuminen rakenteelle.

Rakennuksen alaosan tuulikuorma välillä 0 m - 24,38 m  $b=24,38$  m

$$q_p = 0,18^2 \cdot \ln\left(\frac{24,38}{0,003}\right) \cdot \left[ \ln\left(\frac{24,38}{0,003}\right) + 7 \right] \cdot \frac{22^2}{1600} = 1,412 \text{ kN/m}^2 \quad (8)$$

Rakennuksen keskiosa on jaettu neljään vyöhykkeeseen kuvan 19 mukaisesti. Jokaisen vyöhykkeen korkeus 10,3 metriä. Lasketaan puuskanopeuspaine jokaiselle vyöhykkeelle kaavan 8 mukaisesti.

Puuskanopeuspaine välillä 24,38 m – 34,68 m:

$$q_p = 0,18^2 \cdot \ln\left(\frac{34,68}{0,003}\right) \cdot \left[ \ln\left(\frac{34,68}{0,003}\right) + 7 \right] \cdot \frac{22^2}{1600} = 1,4996 \text{ kN/m}^2$$

Puuskanopeuspaine välillä 34,68 m – 44,98 m:

$$q_p = 0,18^2 \cdot \ln\left(\frac{44,98}{0,003}\right) \cdot \left[ \ln\left(\frac{44,98}{0,003}\right) + 7 \right] \cdot \frac{22^2}{1600} = 1,5658 \text{ kN/m}^2$$

Puuskanopeuspaine välillä 44,98 m – 55,28 m:

$$q_p = 0,18^2 \cdot \ln\left(\frac{55,28}{0,003}\right) \cdot \left[ \ln\left(\frac{55,28}{0,003}\right) + 7 \right] \cdot \frac{22^2}{1600} = 1,619 \text{ kN/m}^2$$

Puuskanopeuspaine välillä 55,28 m – 65,58 m:

$$q_p = 0,18^2 \cdot \ln\left(\frac{65,58}{0,003}\right) \cdot \left[ \ln\left(\frac{65,58}{0,003}\right) + 7 \right] \cdot \frac{22^2}{1600} = 1,664 \text{ kN/m}^2$$

Rakennuksen yläosan tuulikuorma välillä 90 m-65.65 m, b=24,38 m z=90

$$q_p = 0,18^2 \cdot \ln\left(\frac{90}{0,003}\right) \cdot \left[ \ln\left(\frac{90}{0,003}\right) + 7 \right] \cdot \frac{22^2}{1600} = 1,7488 \text{ kN/m}^2$$

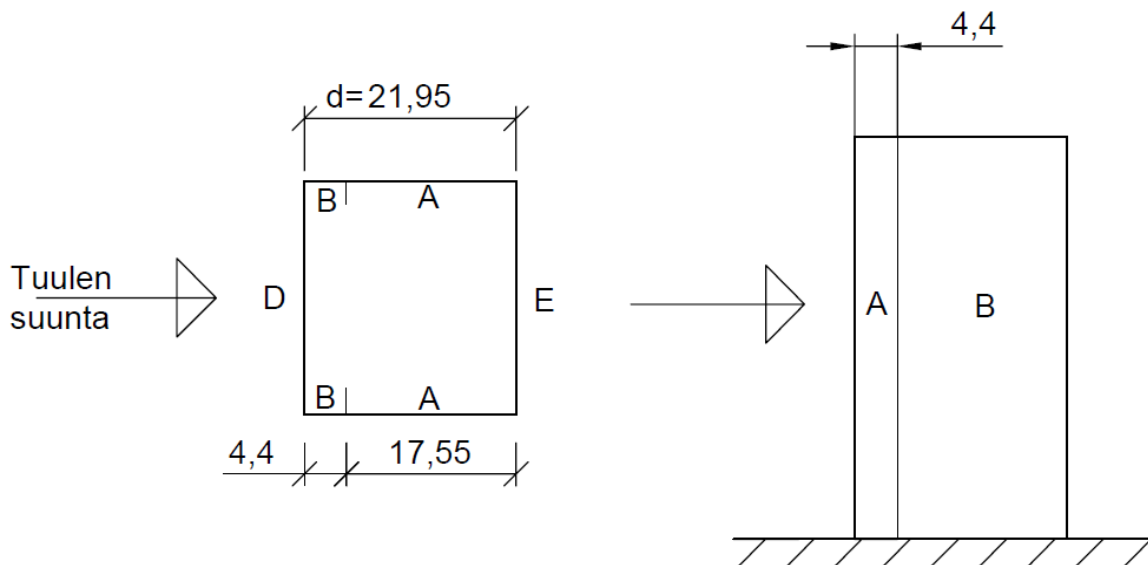
Lasketaan tuulikuormat painekertoimen avulla

Ulkopintoihin vaikuttava tuulenpaine  $W_e$  saadaan kaavasta:

$$W_e = q_p(z) \cdot C_{pe} \tag{9}$$

$$h/d = 90 \text{ m} / 21,945 \text{ m} = 4,101$$

## Tuulenpaineen vyöhykkeet





Painekertoimet  $C_{pe}$  eri vyöhykkeillä:

$$A=-1,2 \quad B=-0,8 \quad C=-0,5 \quad D=+0,8 \quad E= -0,66$$

Rakennukseen vaikuttava tuulenpaine tuulen kohdistuessa 24,39 m pitkältä sivulta

Eri vyöhykkeisiin vaikuttava tuulenpaine:

**Rakennuksen alaosaan vaikuttava tuulenpaine välillä  $h= 0 \text{ m} - 24,38 \text{ m}$**

$$\text{Vyöhyke A:} \quad W_e = 1,412 \text{ kN/m}^2 * -1,2 = -1,694 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke B:} \quad W_e = 1,412 \text{ kN/m}^2 * -0,8 = -1,13 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke C:} \quad W_e = 1,412 \text{ kN/m}^2 * -0,5 = -0,706 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke D:} \quad W_e = 1,412 \text{ kN/m}^2 * 0,8 = 1,13 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke E:} \quad W_e = 1,412 \text{ kN/m}^2 * -0,66 = -0,932 \text{ kN/m}^2$$

**Puuskanopeuspaine välillä  $24,38 \text{ m} - 34,68 \text{ m}$ :**

$$\text{Vyöhyke A:} \quad W_e = 1,4996 \text{ kN/m}^2 * -1,2 = -1,8 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke B:} \quad W_e = 1,4996 \text{ kN/m}^2 * -0,8 = -1,2 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke C:} \quad W_e = 1,4996 \text{ kN/m}^2 * -0,5 = -0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke D:} \quad W_e = 1,4996 \text{ kN/m}^2 * 0,8 = 1,2 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke E:} \quad W_e = 1,4996 \text{ kN/m}^2 * -0,66 = -0,99 \text{ kN/m}^2$$

**Puuskanopeuspaine välillä  $34,68 \text{ m} - 44,98 \text{ m}$ :**

$$\text{Vyöhyke A:} \quad W_e = 1,5658 \text{ kN/m}^2 * -1,2 = -1,879 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke B:} \quad W_e = 1,5658 \text{ kN/m}^2 * -0,8 = -1,253 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke C:} \quad W_e = 1,5658 \text{ kN/m}^2 * -0,5 = -0,783 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke D:} \quad W_e = 1,5658 \text{ kN/m}^2 * 0,8 = 1,253 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke E:} \quad W_e = 1,5658 \text{ kN/m}^2 * -0,66 = -1,033 \text{ kN/m}^2$$

**Puuskanopeuspaine välillä 44,98 m – 55,28 m:**

$$\text{Vyöhyke A: } W_e = 1,619 \text{ kN/m}^2 * -1,2 = -1,943 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke B: } W_e = 1,619 \text{ kN/m}^2 * -0,8 = -1,295 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke C: } W_e = 1,619 \text{ kN/m}^2 * -0,5 = -0,81 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke D: } W_e = 1,619 \text{ kN/m}^2 * 0,8 = 1,295 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke E: } W_e = 1,619 \text{ kN/m}^2 * -0,66 = -1,069 \text{ kN/m}^2$$

**Puuskanopeuspaine välillä 55,28 m – 65,58 m:**

$$\text{Vyöhyke A: } W_e = 1,664 \text{ kN/m}^2 * -1,2 = -1,997 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke B: } W_e = 1,664 \text{ kN/m}^2 * -0,8 = -1,331 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke C: } W_e = 1,664 \text{ kN/m}^2 * -0,5 = -0,832 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke D: } W_e = 1,664 \text{ kN/m}^2 * 0,8 = 1,331 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke E: } W_e = 1,664 \text{ kN/m}^2 * -0,66 = -1,098 \text{ kN/m}^2$$

**Rakennuksen yläosan tuulikuorma välillä 90 m-65.65 m**

$$\text{Vyöhyke A: } W_e = 1,7488 \text{ kN/m}^2 * -1,2 = -2,099 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke B: } W_e = 1,7488 \text{ kN/m}^2 * -0,8 = -1,399 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke C: } W_e = 1,7488 \text{ kN/m}^2 * -0,5 = -0,874 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke D: } W_e = 1,7488 \text{ kN/m}^2 * 0,8 = 1,399 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Vyöhyke E: } W_e = 1,7488 \text{ kN/m}^2 * -0,66 = -1,154 \text{ kN/m}^2$$

Korkeus/vyöhyke	A [kN/m <sup>2</sup> ]	B [kN/m <sup>2</sup> ]	C [kN/m <sup>2</sup> ]	D [kN/m <sup>2</sup> ]	E [kN/m <sup>2</sup> ]
0-24,39 m	-1,694	-1,13	-0,706	1,13	-0,932
24,39 m - 34,68 m	-1,8	-1,2	-0,75	1,2	-0,99
34,68 m - 44,98 m	-1,879	-1,253	-0,783	1,253	-1,033
44,98 m - 55,28 m	-1,943	-1,295	-0,81	1,295	-1,069
55,28 m - 65,65 m	-1,997	-1,331	-0,832	1,331	-1,098
65,65 m - 90 m	-2,099	-1,399	-0,874	1,399	-1,154

Taulukko 2. Rakennuksen eri pinnoille kohdistuvat tuulikuormat

Lasketaan CLT-seinäelementille tuleva tuulen aiheuttama voima, jota käytetään laskentamallissa. Jotta tuulikuorma voidaan lisätä laskentamalliin, lasketaan jokaiselle seinäpilarille tuleva tuulikuorma metrille. Oletetaan ikkunalasien jakavan voiman puoleksi niitä tukeville elementeille, sillä FEM-mallissa ikkunoiden tilalla on aukot, joihin tuulikuormaa ei pystytä syöttämään. Lasketaan kuormat välille 0 m - 32 m, 32 m – 64 m ja 64 m - 90 m, jotta ne voidaan syöttää laskentamalliin.

Väli 0 m - 32 m:

Kaksi reunimmaista elementtiä julkisivulla.

Tuulikuorma kohdistuu elementin sekä välissä sijaitsevan ikkuna-aukon leveyteen:

$$6,226 \text{ m} / 2 \text{ m} = 3,1 \text{ m} \quad (10)$$

$$3,1 \text{ m} * 1,13 \text{ kN/m}^2 = 3,5 \text{ kN/m} \quad (11)$$

Kapeat pilarit parvekesyvennyksessä

$$2,44 \text{ m} + 3,6 \text{ m} = 6,04 \text{ m}$$

$$1,13 \text{ kN/m}^2 * 6,04 \text{ m} = 6,8 \text{ kN/m}$$

Keskimmäinen pilari parvekesyvennyksessä.

$$6,3\text{m} * 1,13 \text{ kN/m}^2 = 7,1 \text{ kN/m}$$

Elementit välillä 32m-64m

Käytetään tuulenpaineen arvoa  $1,33 \text{ kN/m}^2$

Reunimmaisiet elementit (2 kpl)

$$3,1\text{m} * 1,33 \text{ kN/m}^2 = 4,1 \text{ kN/m}$$

Kapeat pilarit parvekesyvennyksessä.

$$6,04\text{m} * 1,33 \text{ kN/m}^2 = 8 \text{ kN/m}$$

Keskimmäinen pilari parvekesyvennyksessä.

$$6,3\text{m} * 1,33 \text{ kN/m}^2 = 8,4 \text{ kN/m}$$

Väli 64 m-90 m:

Reunimmaisiet elementit (2 kpl)

$$1,4 \text{ kN/m}^2 * 3,1\text{m} = 4,35 \text{ kN/m}$$

Kapeat pilarit parvekesyvennyksessä.

$$6,04\text{m} * 1,4 \text{ kN/m}^2 = 8,45 \text{ kN/m}$$

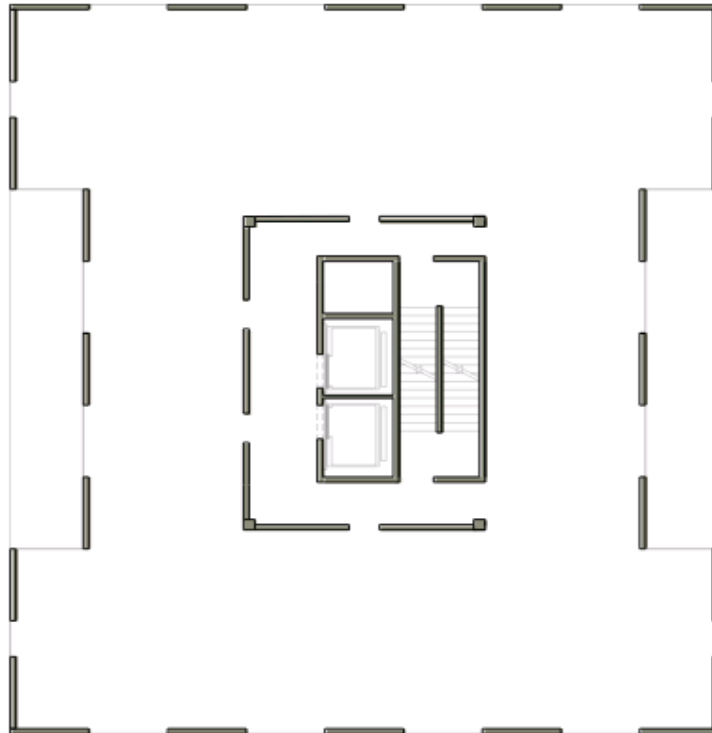
Keskimmäinen pilari parvekesyvennyksessä.

$$6,3\text{m} * 1,4 \text{ kN/m}^2 = 8,8 \text{ kN/m}$$

Saadut tuulikuormat syötetään Robot Structural Analysis -ohjelmalla tehtyyn laskentamalliin. Tuulikuormista käytetään pitkälle sivuille tulevia kuormia, jolloin laskentamallista saadaan suurimmat mahdolliset tuulen aiheuttamat voimat perustuksille ja muille rakenteille.

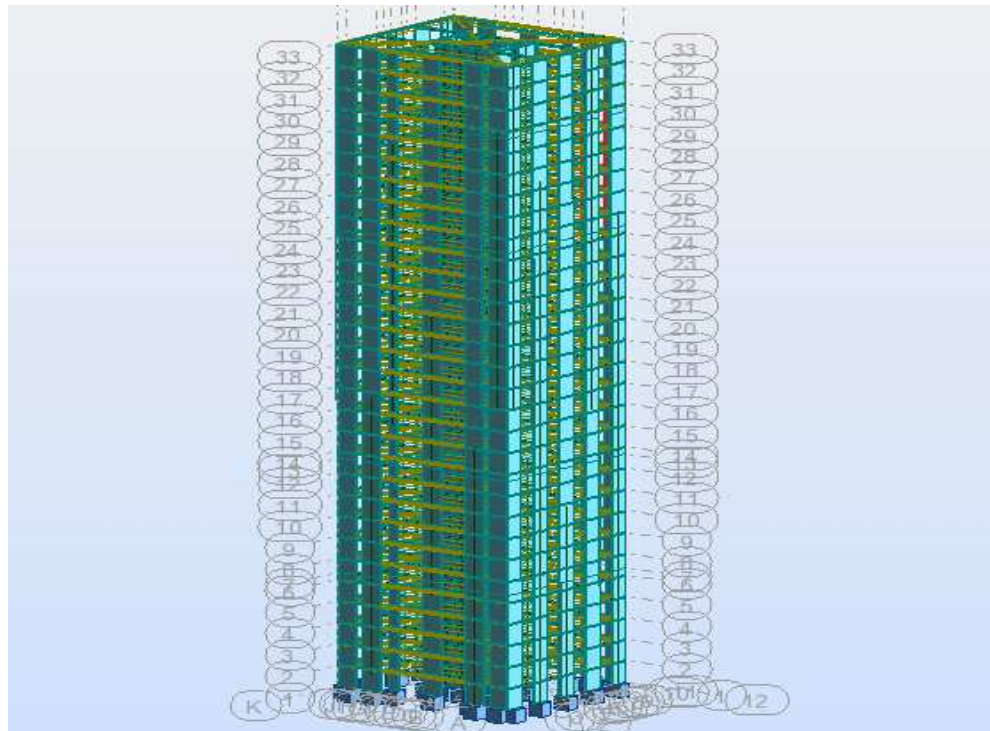
## 6 Laskentamalli

Rakenteisiin kohdistuvat jännitykset selvitettiin Robot structural analysis 2010 -ohjelman avulla. Rakenteesta valmistettiin kuvan 21 mukainen malli. Mallissa CLT-seinäelementit mallinnettiin pilareina, joiden materiaalina käytettiin puutavaraa, ja jonka kimmokerroin saatiin Stora Enson CLT-puutavaran lujuudet taulukosta. Ohjelmalla mallinnettiin rakennuksen puuosat, olettaen ensimmäisen kerroksen olevan betonirakenteinen. Kantavien CLT-seinien paikat näkyvät kuvassa 20.



Kuva 20. Kantavien seinien sijoittuminen laskentamallissa FFTT-tornissa Ulkoseinien kantavat rakenteet sekä hissikuilut on kytketty toisiinsa teräsprofiileilla.[8.]

Puuosat kiinnitetään jäykästi alla oleviin betonirakenteisiin. Välipohjat mallinnettiin jäykkänä laatastona, jonka oletetaan jakavan vaakasuuntaiset voimat pystyrakenteille niiden jäykkyyksien mukaan. Välipohja sijoitettiin tukeutuvaksi teräsprofiileihin, jotka kiertävät rakennusta jokaisessa kerroksessa. Välipohjan liitos seinäelementteihin on kuvattu kappaleessa 4.1.3. Portaita ja hissien ovien puoleista seinää ei mallinnettu. Mallintamisen ongelmana tulee vastaan CLT-materiaalin puuttuminen ohjelmasta, joten pilarit mallinnettiin C24 lujuusluokan puutavarana. Robot mallissa elementtien ja teräsprofiilien liitokset jouduttiin toteuttamaan pistemäisellä liitoskohdalla, kun todellisessa rakenteessa liitos toteutetaan koko seinäelementin leveyden matkalta. Kuormat FEM-malliin saatiin käsin laskemalla.



Kuva 21. FFTT-torni mallinnettuna Robot structural analysis –ohjelmalla.

## 7 Rakennusosien tarkastelut

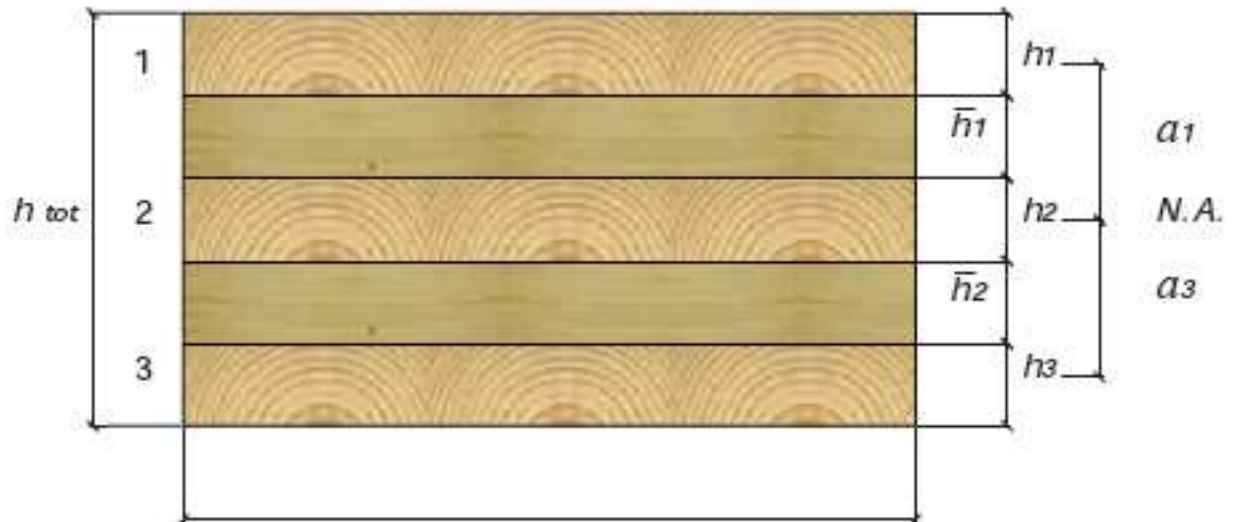
### 7.1 Välipohja

#### 7.1.1 CLT-välipohjaelementin taivutusjäykkyys

Eurokoodissa ei ole erillistä ohjetta CLT-välipohjan mitoittamiseen. CLT-elementtien mitoituksessa voidaan käyttää mekaanisin liitoksin koottujen palkkien laskentaohjetta (gamma-menetelmää), joka on eurokoodista SFS-EN 1995-1-1 liitteestä B.

Väliohjalaattana mallissa on esitetty puu-betoni liittolaattaa, jonka leveys on 1000 mm.

Lasketaan CLT-elementin taivutusjäykkyys ilman pintabetonia käyttäen CLT-handbookin esittämää gamma-menetelmää.[12.]



Tarkastellaan metrin levyistä kaistaa:

$$b=1000 \text{ mm}$$

$$h_{tot} = \text{kokonaispaksuus } 200 \text{ mm}$$

$$h_1 = h_2 = h_3 = 40 \text{ mm}$$

$$E=12\,000 \text{ MPa}$$

$$G_R = 50 \text{ MPa}$$

$$f_b = 30 \text{ MPa}$$

$$a_1 = a_3 = 80 \text{ mm}$$

$$l=7315 \text{ mm}$$

Lasketaan  $\gamma$  kaavalla:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \times EA}{l^2} \times \frac{\bar{h}}{G_R \times b}}, \text{ jossa} \quad (12)$$

$b$  leveys

$h_{tot}$  CLT-elementin kokonaispaksuus

$h_1 = h_2 = h_3$  kerrosten paksuudet

$E$  kimmokerroin

$G_R$  liukukerroin

$a_1 = a_3$  kerrosten etäisyys painopisteestä

$l$  jänneväli

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \times EA}{l^2} \times \frac{\bar{h}}{G_R \times b}} \quad \gamma_1 = 0,9496$$

Lasketaan jäyhyysmomentti  $I$

$$I = bh^3 / 12 = 5,333 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (13)$$

Lasketaan CLT-välirohjan tehollinen taivutusvastus:

$$EI \left( 3 + \frac{(2 \times \gamma \times A \times a^2)}{I} \right) \quad (14)$$

$$= 6,026 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$$



CLT-elementin päällä on 51 mm betonilaatta,

Betonilaatta on ankkuroitu leikkausliittimin CLT-elementtiin, oletetaan liitoksen toiminta täydelliseksi.

Betonilaatan taivutusjäykkyys, 1000 mm leveä kaista

Lasketaan taivutusjäykkyys halkeilemattomassa tilassa

$E_c = 30\,000\text{ MPa}$

$$I_c = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{1000\text{ mm} \times (51\text{ mm})^3}{12} = 11,05 * 10^6\text{ mm}^4 \quad (15)$$

Betonipeite rakenteen puristetulla puolella, oletetaan betonilaatta halkeilemattomaksi.

$$E_c I_c = 30\,000\text{ MPa} * 11,05 * 10^6\text{ mm}^4 = 3,315 * 10^{11}\text{ Nmm}^2 \quad (16)$$

Kelluvan betonilaatan jäykkyys voidaan lisätä CLT-elementin jäykkyyteen [13.]

$$EI_{\text{kok}} = 3,315 * 10^{11}\text{ Nmm}^2 + 6,026 * 10^{12}\text{ Nmm}^2 = 6,357 * 10^{12}\text{ Nmm}^2 \quad (17)$$

### 7.1.2 Värähtelymitoitus Eurokoodin mukaan

Suomen kansallinen liite värähtelymitoituksessa suosittelee käyttämään eurokoodista poikkeavaa mitoitusmenetelmää, joka täyttää vähintään kaikki SFS-EN 1995-1-1 normin asettamat vaatimukset värähtelyn suhteen.

Lattiarakenteen omapaino [ $\text{kg/m}^2$ ]

$$0,051\text{m} * 2\ 600\ \text{kg/m}^3 + 0,2\text{m} * 500\ \text{kg/m}^3 = 232,5\ \text{kg/m}^2 \quad (18)$$

Hyötykuorman pitkäaikaisosuus (kg) saadaan kaavasta

$$0,3 * q_k \quad (19)$$

$$0,3 * 200\ \text{kg} = 60\ \text{kg}$$

Lasketaan m, lattian oman painon ja pitkäaikaisen hyötykuorman pinta-alayksikköä kohden yhteenlaskettu massa:

$$\text{oma paino } 207,5\ \text{kg/m}^2$$

$$m = 60\ \text{kg} + 207,5\ \text{kg} = 267,5\ \text{kg} \quad (20)$$

Oletetaan välipohjan toimivan kahteen suuntaan kantavana rakenteena,

Lasketaan välipohjan ominaistajuus  $f_1$ , jonka tulee olla suurempi kuin 9 Hz

$$f_1 = \frac{\pi}{2 * l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{s * m}} = \frac{\pi}{2 * (7\text{m})^2} \sqrt{\frac{6,357 * 10^6\ \text{Nm}^2}{1\text{m} * 267,5\ \text{kg/m}}} = 4,94\ \text{Hz} < 9\ \text{Hz} \quad (21)$$

Lattia ei täytä värähtelymitoituksen ehtoa taajuuden osalta johtuen suuresta jännevälisestä ja eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 värähtelykriteeristä. Ratkaisuksi taajuusvaatimuksen täyttämiseksi välipohja voitaisiin toteuttaa paksumman CLT-laatan ja pintabetonilaatan yhdistelmää.

Tarkistetaan maksimitaipuma värähtelymitoituksen yhteydessä.

Lasketaan välipohjan taipuma 1 kN pistekuormasta joka kuormittaa välipohjaa jännevälän keskeltä. Taipuman maksimiarvo on 0,5 mm:

lasketaan  $\delta_1$

$$\delta_1 = \frac{1}{48} \times \frac{FL^3}{EI_{eff}} = \frac{1}{48} \times \frac{1000 \text{ N} \times (7350 \text{ mm})^3}{6,357 \times 10^{12}} = 1,3012 \text{ mm} \quad (22)$$

Betonikantiselle välipohjalle, jonka leveys on vähintään 2 m,  $k_B$  kerroin voidaan laskea lausekkeesta:

$$k_B = 0,1 + L / 30, \quad (23)$$

jossa L on laatan jänneväli.

$$k_B = 0,1 + 7,35 / 30 = 0,345$$

$$k_B * \delta_1 < 0,5 \text{ mm} \quad (24)$$

$$k_B * \delta_1 = 0,345 * 1,3012 \text{ mm} = 0,4489 \text{ mm} \quad (25)$$

Taipuma ei ylitä sallittua raja-arvoa 0,5 mm. [18.]

### 7.1.3 Taivutusmitoitus

Taivutuslujuuden laskennassa sovelletaan eurokoodin gamma-menetelmää

Lasketaan pelkän CLT-elementin taivutuskestävyys ilman betonipeitettä:[12.]

$$\text{Lasketaan } F_b = k_{mod} * f_k / \alpha = 0,8 * 24 / 1,2 = 16 \text{ N/mm}^2 \quad (26)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \times EA}{l^2} \times \frac{\bar{h}}{G_r \times b}} = 0,9496 \quad (27)$$

$$\Phi = 0,9$$

$$EI_{eff} = 6.025 \cdot 10^{12}$$

$$I_{eff} = 6,02 \cdot 10^{12} / 12\,000 = 5,02 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$M_r = \Phi * F_b * \frac{I_{eff}}{\gamma_1 * a_1 + 0,5h_1} = 57,578 \text{ kNm} \quad (28)$$

CLT-laatta kestää 57,58 kNm momentin.

Suurin momentti CLT-laatassa, tutkitaan metrin kaistaa:

Kuorma:  $8,36 \text{ kN/m}^2 \rightarrow$  metrin kaistalla  $8,36 \text{ kN/m}$

Laatan maksimipituus: 7,35 m

$$M_{max} = 1/8 * 8,36 \text{ kN/m} * (7,325\text{m})^2 = 56,45 \text{ kNm} \quad (29)$$

Pelkän CLT-laatan taivutuskestävyys riittää kannattamaan välipohjan taivutusmomenttia vastaan.

#### 7.1.4 Tulokset

Lattia ei täytä värähtelymitoituksen ehtoa taajuuden osalta johtuen suuresta jännevälisestä ja eurokoodin SFS-EN 1995-1-1 värähtelykriteeristä. Pientämällä jänneväliä tai lisäämällä lattian CLT-elementin paksuutta pystytään lattian värähtelyä pienentämään. Taivutuskestävyyden osalta pelkän CLT-elementin suuri taivutusjäykkyys riittää kannattamaan välipohjarakenteen kuorman SFS EN 1990 mukaisille tyypillisille välipohjakuormille.

## 7.2 Kantavat ulkoseinät

### 7.2.1 Puristus clt-seinäelementissä

Lasketaan CLT-elementin puristuskestävyys sauvassa, johon muodostuu suurin normaalivoima. Laskennassa käytetään CLT Handbookissa esitettyä menetelmää. [12, s.23.]

Hoikkuusluku  $\lambda_{\text{eff}}$  saadaan kaavasta:

$$\lambda_{\text{eff}} = l \times \sqrt{\frac{A_{\text{tot}}}{I_{\text{eff}}}} \quad (30)$$

Missä,

$A_{\text{tot}}$  CLT-elementin kokonaispinta-ala,

$l$  Nurjahduspituus

$I_{\text{eff}}$  Tehollinen jäyhyysmomentti

Tehollinen jäyhyysmomentti  $I_{\text{eff}}$  saadaan kaavasta:

$$I_{\text{eff}} = \frac{(EI)_{\text{eff}}}{E_{\text{mean}}} \quad (31)$$

Seinän CLT-levyn kerrosten mitat:

$$h_1 = 80 \text{ mm}$$

$$h_2 = 60 \text{ mm}$$

$$\bar{h} = 40 \text{ mm}$$

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} = 120 \text{ mm}$$

Seinäelementin taivutusjäykkyys

$$EI_{eff} = 2 \times (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2) + (E_2 I_2)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \times EA}{l^2} \times \frac{\bar{h}}{G_r \times b}} = 0,912 \quad (12)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \times 11\,000 \text{ N/mm}^2 \times 2440 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}}{3000 \text{ mm}^2} \times \frac{40 \text{ mm}}{50 \text{ N/mm}^2 \times 2440 \text{ mm}}} = 0,912 \quad (12)$$

Sijoitetaan  $\gamma_1$  taivutusjäykkyyden kaavaan (12):

$$EI_{eff} = 2 \times \left( 11\,000 \text{ N/mm}^2 \times \frac{2440 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}^3}{12} + 0,912 \times 11\,000 \text{ N/mm}^2 \times 80 \text{ mm} \times 2440 \text{ mm} \times (120 \text{ mm})^2 \right) + \left( 11\,000 \text{ N/mm}^2 \times \frac{2440 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}^3}{12} \right) = 5,690 \times 10^{13} \text{ Nmm}^2 \quad (32)$$

Lasketaan saadulla Taivutuskestävyyden arvolla tehollinen jäyhyysmomentti jakamalla tehollinen taivutusvastus  $EI_{eff}$  kimmokertoimen E arvolla:

$$I_{eff} = \frac{5,690 \times 10^{13} \text{ Nmm}^2}{11\,000 \text{ N/mm}^2} = 5,1735 \times 10^9 \text{ mm}^4 \quad (33)$$

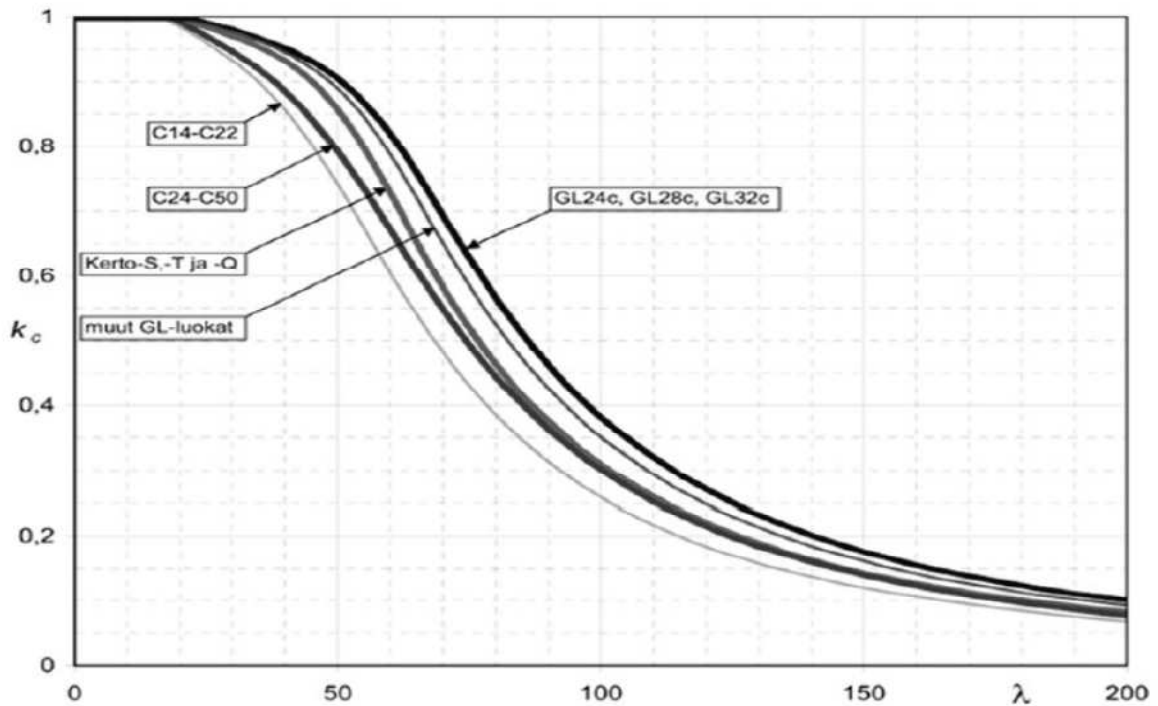
Lasketaan tehollinen hoikkuusluku  $\lambda_{eff}$ :

Nurjahduspituus  $l_c = 0,85 \times l$  olettaen tarkasteltavan kerrosvälin olevan tuettu toisesta päästä jäykästi.

$$l_c = 2550 \text{ mm}$$

$$\lambda_{eff} = 1500 \text{ mm} \times \sqrt{\frac{300 \times 2440 \text{ mm}^2}{5,1735 \times 10^9 \text{ mm}^4}} = 30,33 \quad (34)$$

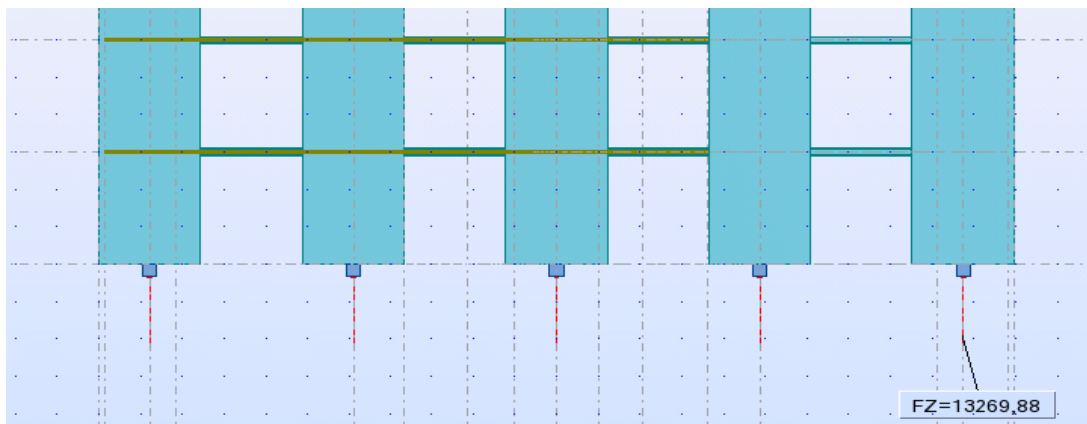
Laskentaa voidaan tästä jatkaa normaalin puuseinän mitoituksen periaatteilla Eurokoodi 1995-1-1 kohdan 6.21 mukaan. [12.]



Kuva 22. Puumateriaalin nurjahduskäyrä, jolta selvitetään  $K_c$ -kerroin.

Selvitetään  $K_c$  kerroin kuvasta 22.  $K_c$  kerroin hoikkuusluvulla 30,33 on 0,95.

Elementti on mallinnettu pilarina, joten siihen kohdistuva jakautunut puristusjännitys esitetään tietomallissa pistekuormana. Voidaan olettaa kuorman olevan jakautunut tasaisesti koko elementin pinta-alaan, sillä tuulikuormien aiheuttama resultantin siirtyminen ehkäistään vetoankkureilla.



Kuva 23. Suurin normaalivoima pilarin juurella.

Suurin puristus: 13 270 kN

$$A_{kok} = 2440 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} = 732\,000 \text{ mm}^2$$

$$\text{Suurin puristusjännitys } \sigma_c \text{ reunalla on } \frac{13\,270\,000 \text{ N}}{732\,000 \text{ mm}^2} = 18,13 \text{ N/mm}^2 \quad (35)$$

CLT Elementin muunnettu puristuslujuus lasketaan kaavalla:

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} * K_y \quad (36)$$

$$\text{Puristuslujuus: } 24 \text{ N/mm}^2 * 0,95 = 22,8 \text{ kN}$$

Lasketaan CLT-seinäelementin puristuksen käyttöaste:

$$18,127 \text{ N/mm}^2 / 22,8 \text{ N/mm}^2 = 79 \% \quad (37)$$

CLT-seinäelementit kestävät seinäpilareihin kohdistuvat puristusjännitykset käyttöasteen ollessa 79 %. [18.]

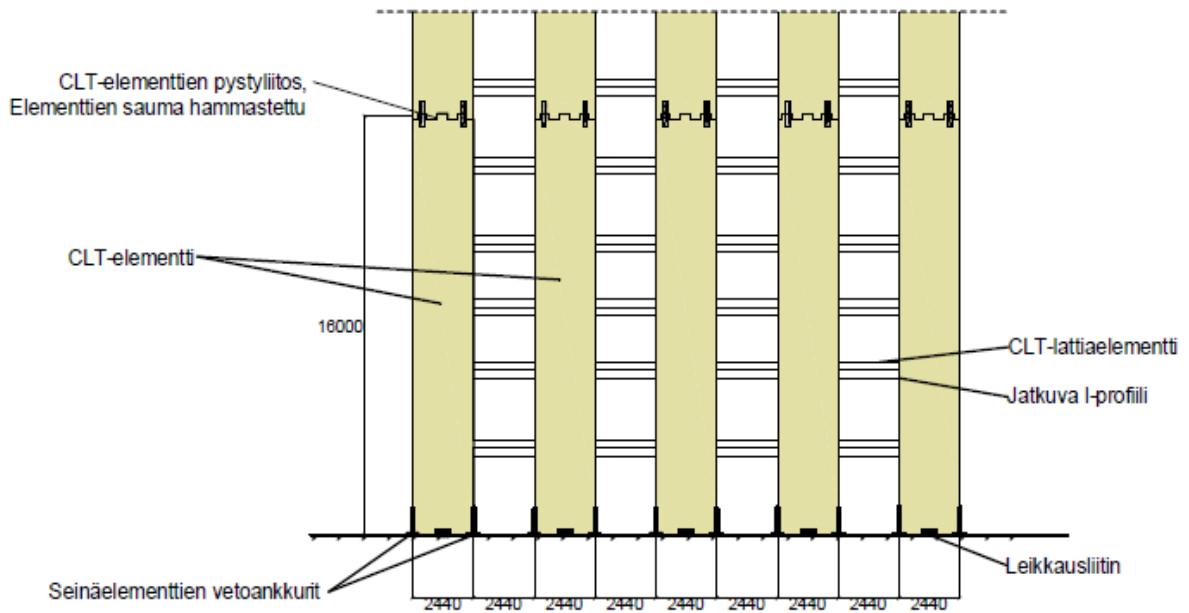
## 7.2.2 Tulokset

Pilareina toimivat ulkoseinät kestävät rakenteen omasta painosta ja hyötykuormista muodostuvan puristuksen. Myös nurjahdusta ei pääse syntymään. Seinien käyttöaste on kuitenkin korkea, noin 80 %, jota voidaan pienentää asettamalla alimmaisiksi seinäpilareiksi leveämmät, esimerkiksi 400 mm leveät CLT-seinäpilarit.

## 8 Liitokset

Työtä varten haastateltiin CLT-rakentamisen asiantuntijoita Stora Enso Oy:ltä, joka antoi omia näkemyksiä mahdollisista kantavuuden kannalta kriittisistä kohdista [19]. Kriittisimmät kohdat muodostuvat perustusten ja elementin liitokseen sekä julkisivun vaakaliitokseen, joihin kohdistuu vetoa. Kriittisin liitos on kuvassa 24 reunimmaisen elementin liitos perustuksiin tuulen puolella. FFTT-järjestelmää suunniteltaessa liitoksista pyrittiin tekemään mahdollisimman yksinkertaiset nopean ja helpon rakentamisen mahdollistamiseksi.





Kuva 24. FFFT-järjestelmän ulkoseinän rakenne.

FFTT-järjestelmän suurin eroavaisuus perinteiseen CLT-rakentamiseen on ulkoseinäelementtien sijoittelu pystyyn. Liitos on toteutettu pulttiliitoksella. Myös seinäelementtien liitos perustuksiin on piirretty samanlaisella vetoankkurilla. Suurimmat kuormitukset tulevat liitokseen perustuksiin.

### 8.1 Seinäelementin ja perustusten liitos

Selvitetään CLT-seinäelementin ja perustuksen liitoksen kestävyys, sillä suurin momentti joka aiheuttaa epäkeskisyttä muodostuu tuelle.

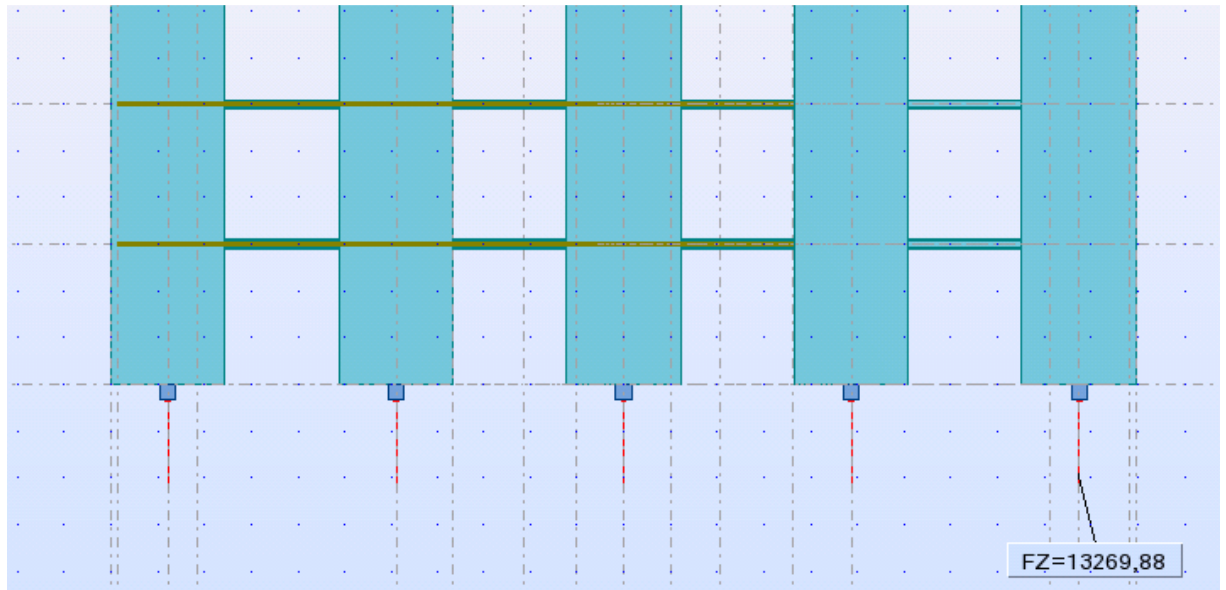
Suurin momentti tuelle saadaan laskentamallista.

Tuulikuorma aiheuttaa CLT-elementin alareunaan momentin jonka suuruus on:

$$14\,485,68 \text{ kNm}$$

Lasketaan elementtiin kohdistuvan normaalivoiman epäkeskisyys  $e_0$

$$e_0 = \frac{M_d}{N_d} = \frac{14\,485,68 \text{ kNm}}{N_d} \quad (37)$$



Kuva 25. Normaalivoima pilarissa, jota tuulen aiheuttama vaakavoima pyrkii kaatamaan.

Suurin normaalivoima, joka vaikuttaa pilarissa: 13 269 kN

Sijoitetaan arvot epäkeskisyyden lausekkeeseen

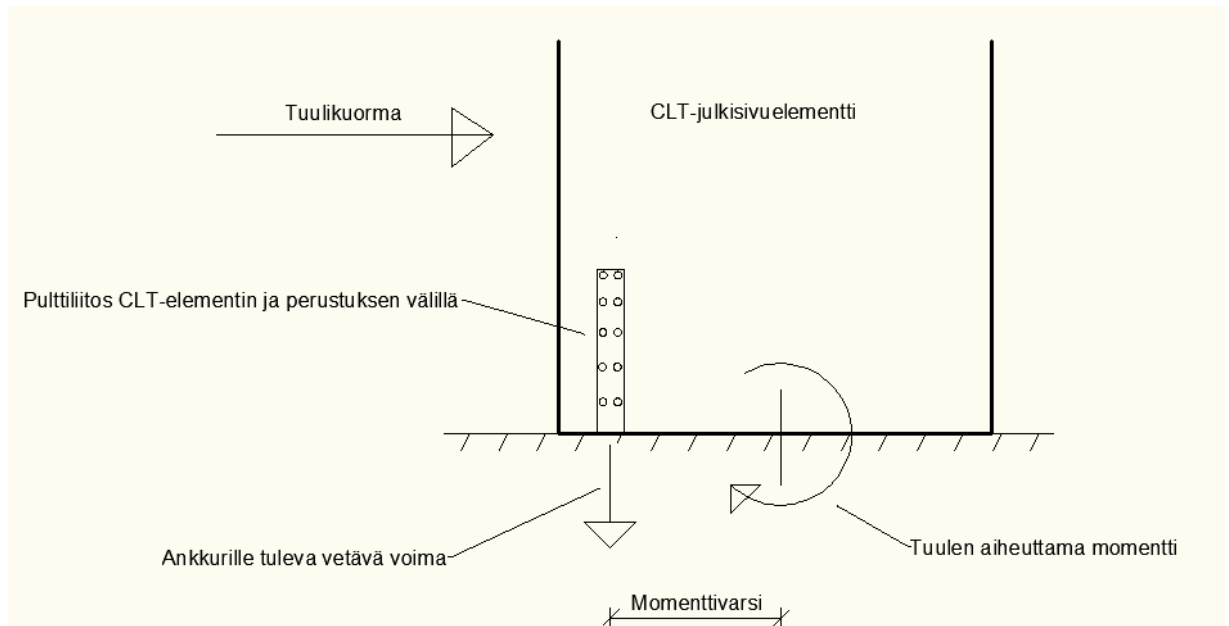
$$e_0 = \frac{M_d}{N_d} = \frac{14\,485,68 \text{ kNm}}{13\,269 \text{ kN}} = 1,091 \text{ m} \quad (38)$$

Seinän reunan etäisyys keskipisteestä:  $2,44 \text{ m} / 2 = 1,22 \text{ m}$

Resultantin paikka tulee olemaan  $1,22 \text{ m} - 1,091 \text{ m} = 0,129 \text{ m}$  reunasta.

CLT-elementti ei kestä suureksi kasvavaa puristuskuormaa, sillä puristuspuunnan pituus tulee pieneksi.

Oletetaan seinän reunoilla sijaitsevien vetoankkureiden olevan 10 cm päässä elementin reunasta, tuen etäisyys painopisteestä 1,12 metriä:



Kuva 26. CLT-elementin liittimeen vaikuttava vetävä voima

Jotta resultantti saadaan seinän painopisteeseen, on ankkuroitavan voiman otettava vastaan voima  $F$  (kuva 26).

$$F = \frac{1,0901m * 13\,065\,kN}{1,12\,m} = 12\,726\,kN \quad (39)$$

Suunnitellaan liitos kaksi leikkeisenä pulttiliitoksena, jossa puun molemmille puolille tulee teräслиittimet.

Pulttiliitoksessa pultteihin kohdistuu leikkausvoimaa. Lasketaan yhden pulttiliitoksen leikkauskestävyys  $R_k$ :

$$R_k = \min \left[ 0,4 * f_h * t_u * d * \sqrt{1 + \frac{3 * M}{f_h * d * t_u^2}} ; 2 * \sqrt{m_y * f * d} \right] \quad (40)$$

Lasketaan reunapuristuslujuus  $f_{h,0,k}$  puulle:

$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * d) * p_k, \quad (41)$$

jossa ominaistiheyden yksikkö on  $p_k$  [kg/m<sup>3</sup>]

$d$  on pultin paksuus [mm]

$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * d) * p_k$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * 30 \text{ mm}) * 450 \text{ kg/m}^3 = 25,83 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan pultin myötömomentti kaavasta[18]:

$$M_y = 0,3 * f_{u,k} * d^{2,6} \quad (42)$$

$$M_y = 0,3 * 1000 \text{ N/mm}^2 * 30^{2,6} \text{ mm} = 2,007 * 10^6 \text{ Nmm}$$

$$R_k = \min \left[ 0,4 * f_h * t_u * d * \sqrt{1 + \frac{3 * M}{f_h * d * t_u^2}}; 2 * \sqrt{m_y * f * d} \right] \quad (40)$$

$f_h = 25,83 \text{ N/mm}^2$  toisen liittimen ollessa terästä

$$t_u = \frac{t_1 * f_{h,1,k}}{f_h} \quad (43)$$

Missä  $t_1 = \text{CLT}$  -elementin paksuus 300 mm, tällöin

$$t_u = 300 \text{ mm}$$

Lasketaan yhden pultin kestävyys  $R_k$ , joka on pienempi arvoista:

$$0,4 * 25,83 \frac{N}{mm^2} * 300mm * 30 mm * \sqrt{1 + \frac{3 * 2,007 * 10^6 Nmm}{25,83 \frac{N}{mm^2} * 30 mm * 300 mm^2}} = 96,918 \text{ kN}$$

Tai

$$2 * \sqrt{2,007 * 10^6 * 25,83 * 30} = 78,87 \text{ kN. [18.]}$$

Yhden pultin maksimi leikkauslujuus 300 mm paksussa CLT-elementissä on 78,87 kN

Lasketaan tarvittava pulttien määrä

$$12\,726 \text{ kN} / 78,8 \text{ kN} = 162 \text{ kpl}$$

### 8.1.1 Tulokset

FFTT-raportti ei ilmoita ankkurointia tarkemmin, mutta voidaan todeta, etteivät normaaliit puuhun tehtävät pulttiliitokset riitä tässä tapauksessa puun reunapuristuslujuuden ja suuren ankkuroitavan voiman vuoksi.

Seinän ankkurointi FFTT-raportissa tapahtuu teräksisillä profiileilla pulttiliitoksin, joiden kiinnitykseen CLT-elementteihin ei ole otettu tarkemmin kantaa. Voidaan kuitenkin todeta näin suuren ankkuroitavan vetovoiman aiheuttavan ongelmia CLT-elementtiin kiinnittyessä. Elementtiin joudutaan kiinnittämään yli 100 pulttia, jotta elementti saadaan ankkuroitua maahan riittävästi. Rakennuksen korkeuden pudotessa 20 kerrokseen, tuelle syntyvä momentti pienenee huomattavasti, jolloin epäkeskisyyden aiheuttamat ongelmat pienenevät merkittävästi. Ongelma voidaan ratkaista myös rakennukseen asennettavilla vetotangoilla.

## 9 Muut suunnittelun näkökulmat

### 9.1 Seismiset kuormat

Vaikka suomen seismiset olosuhteet ovat hyvin stabiilit, eikä rakennuslainsäädäntö edellytä maanjäristyksen huomioimista rakennusten mitoituksessa, vaatii Helsingin rakennusvalvonta korkeilta yli 16-kerroksisilta rakennuksilta esityksen maanjäristyskestävyydestä [14]. FFTT-järjestelmä on kuitenkin suunniteltu silmällä pitäen Kanadan länsirannikon olosuhteita, joissa myös maanjäristykset ovat mahdollisia. Jotta rakennus kestää maanjäristyksiä tulee sille tehdä seisminen suunnittelu, jossa lasketaan maanjäristystä vastaava saattinen korvausvoima. Useimmiten tämä tarkastelu perustuu vaste-spektrimenettelyyn, johon Suomessa hyväksytty menettely on esitetty ohjeessa SFS-EN 1998. [14.]

### 9.2 Suomen palomitoituksen vertailu raporttiin

Suomalainen lainsäädäntö tekee mahdolliseksi tällä hetkellä enintään 8-kerroksisen puukerrostalon rakentamisen taulukkopalomitoituksella. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että yli 8-kerroksisia puurakennuksia ei voitaisi toteuttaa nykyisen lainsäädännön mukaan. Yli 8-kerroksisia puukerrostaloja pystytään toteuttamaan toiminnallisen palomitoituksen turvin. Toiminnallisessa mitoituksessa olennaisten paloteknisten vaatimusten täyttyminen osoitetaan laskennallisesti tai muulla tavalla kuten tietomallinnusohjelmilla simuloimalla. Tyypillisiä toiminnallisen mitoituksen työkaluja ovat palo- ja poistumissimulointiohjelmat ja erilaiset palodynamiikan kaavat.

FFTT-raportissa rakenteiden paloturvallisuuden varmistamiseksi on suunniteltu kaksi erilaista tapaa. Ensimmäisessä menetelmässä on kantavien rakenteiden laskettu kestävän hiiltymisen ja sprinklauksen avulla vaadittavan ajan. Toinen varmempi menetelmä on kantavien puurakenteiden suojaaminen kipsilevyillä ja muilla paloeristysmateriaaleilla. Paloturvallisuuden kannalta riskialttiimpana kohtana voidaan pitää välipohjaa kannattavia teräsprofiileja, kuin massiivipuorakenteita.

## 10 Johtopäätökset

Insinööriyön tuloksena saatiin selvitettyä suurimpien mahdollisten ongelmakohtien toimivuutta FFTT-järjestelmässä. Etenkin laskentamallista saatujen tulosten kohdalla rakenteiden kuormitukset toimivat suuntaa-antavina, sillä Robot structural analysis -ohjelma ei vielä tunne ristiin laminoitua puuta materiaalina ja laskennassa jouduttiin käyttämään tavallisen puutavaran lujuuksia. Tietomalliohjelmat kuitenkin kehittyvät vauhdilla ja myös CLT-tullaan sisällyttämään niihin valmiina materiaalina. Työstä jätettiin pois yksi merkittävä puurakenteiden suunnitteluun vaikuttava tekijä, palomitoitus. FFTT-järjestelmässä palomitoituksen toteuttamiseen pystytään kuitenkin riittävillä pa-  
loeristepaksuuksilla myös Suomen rakennusmääräysten vaatimusten mukaisesti.

Järjestelmästä selvitetty kriittiset kohdat toimivat puristusmurtoa vastaan riittävästi. Paksut ja leveät CLT-elementit on tuettu teräsprofiilein kerrosväleistä, joka estää seinäpilarien nurjahduksen. Puristus pysyy myös maltillisena puun keveyden ansiosta. Rakenteiden alhainen omapaino aiheuttaa kuitenkin myös ongelmia tuulikuorman aiheuttamaa kaatavaa voimaa laskettaessa. Paksut julkisivulevyt vaativat seinän kokonaispaksuuden kasvattamisen, jotta Suomen tiukat energiamääräykset täyttyvät lämmöneristysten osalta.

Jo työn alkuvaiheessa kriittisimmäksi kohdaksi arvioitu tuulen aiheuttamien vetojännitysten ankkurointi tuottaa FFTT-järjestelmässä ongelmia. Tuulen aiheuttamat kaatavat voimat, ja niiden ankkurointi, tuottavat ongelmia sekä perustuksilla että alimmissa vaakaliitoksissa ja niiden kiinnittämiseksi jouduttaisiin turvautumaan massiivisiin pulttiliitoksiin. Alkuperäisessä Tall Wood -raportissa tehdyt tarkastelut mahdollistivat normaalin pulttiliitoksen, sillä kanadalaisessa laskennassa käytetty tuulikuorma oli kolme kertaa eurokoodimitoituksen vastaavaa pienempi.

Ratkaisuja suuren vetojännityksen pienentämiseksi ovat rakennuksen korkeuden mataltaminen, mikä vähentää tuulen aiheuttamaa momenttia tuella huomattavasti. Myös vaakavoimia vastaanottavien seinien uudelleen suunnittelulla pystytään liitokselle tulevaa vetävää voimaa pienentämään.

Lisäksi työssä tarkistettiin yleisesti puisten välipohjien mitoittavaksi tekijäksi muodostuva välipohjan värähtelymitoitus. Tarkastelussa havaittiin raportin antaman rakenteen toimivan. CLT-elementin suuri taivutusvastus mahdollistaa pitkätkin jännevälit, etenkin

jos rakenteena käytetään puu-betoni-liittolaattaa. Taivutuskestävyydestä tarkastelussa jo pelkkä CLT-elementin taivutuskestävyys riittää kannattamaan rakenteen.

Työn lopputuloksena saatiin, ettei FFTT-järjestelmä sellaisenaan sovellu Eurokoodimittoitukseen suurten tuulikuormien takia. Kuitenkin pienillä muutoksilla kuten kantavien seinien leveyden kasvattamisella ja kerrosten vähentämisellä järjestelmästä voitaisiin tehdä toimiva myös Eurooppaan.

## 11 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin puurakenteisen FFTT-järjestelmän soveltuvuutta eurokoodimittoitukseen. Sen uudenlaiset rakenneratkaisut mahdollistavat nopean ja yksinkertaisen rakennustavan myös korkeille yli 20-kerroksisille puurakennuksille.

Työn ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin, miksi puurakentamista ylipäätään kannattaa kehittää myös muihin kuin tyypillisiin puurakentamiskohteisiin, pientaloihin. Lisäämisen hyötyjä tutkittiin ympäristön ja Suomen talouden kannalta. Työn tuloksena puurakentamisen lisäämisen hyötyjä on useita kuten pienempi hiilijalanjälki, materiaalin kotimainen riittävyys ja viennin kasvamisen lisäämisen myötä uusien työpaikkojen syntyminen. Myös puutavaran korkeampi jalostusaste lisää työpaikkojen määrää. Vaikka puurakentaminen tiedetysti on hiilijalanjäljeltään parempi vaihtoehto betonirakentamiseen verrattuna, tarvitaan myös taloudellista hyötyä jotta puurakentamista halutaan kehittää ja lisätä myös rakennuttajien puolella. FFTT-järjestelmässä ilmoitetuilla rakenteilla kustannukset kohosivat vain noin 1,5 % suuremmaksi vastaavaan betonirakennukseen verrattaessa. Myös CLT-materiaalina, johon myös FFTT-järjestelmä perustuu, esiteltiin työssä.

Työssä perehdyttiin järjestelmän rakenneratkaisuihin, ja luotiin niiden pohjalta laskentamalli Autodesk Robot structural analysis -ohjelmalla. Laskentamallin tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina, sillä materiaalina jouduttiin käyttämään normaalia puutavaraa ristiin liimatun sijaan. Laskentamallista saaduilla rakenteisiin kohdistuvilla kuormituksilla selvitettiin kriittisten rakennusosien kestävyys.

Rakenteita tutkittaessa huomattiin järjestelmän toimivan hyvin puristavia kuormia vastaan. CLT-elementtien kevyen oman painon vuoksi puristus ei tuottanut missään ongelmia. Välipohjan toiminta varmistettiin värähtelymitoituksen osalta, joka useimmissa



tapauksissa muodostuu mitoittavaksi tekijäksi. Värähtelymitoituksen osalta CLT-betoni-liittorakenne ei toiminut riittävästi johtuen suuresta jännevälistä. Ongelma välipohjien mitoituksessa pystytään kuitenkin ratkaisemaan helposti lisäämällä välipohjan taivutusjäykkyyttä tai pienentämään jännevälejä. Suomen mitoituskäytäntöihin nähden suurimmat ongelmat syntyvät CLT-elementtien liitoksiin, joihin syntyy tuulen aiheuttamaa vetoa. FFFT-raportin esittämän kanadalaisen suunnittelunormin mukaan tuulikuormitukset muodostuvat merkittävästi pienemmäksi, joka mahdollistaa rakenteiden toiminnan FFFT-raportin esittämällä tavalla. Eurokoodimitoituksen mukaiset tuulikuormat ovat huomattavasti suuremmat kuin kanadalaisten suunnittelunormien, jonka vuoksi järjestelmä ei ainakaan sellaisenaan sovellu Eurokoodimitoitukseen. Pienillä rakenteellisilla muutoksilla, kuten kerrosten vähentämisellä tai alimpien kerrosten elementtien mitoituksen muuttamisella, järjestelmästä voitaisiin kehittää toimiva myös Eurooppaan. Suomessa suunnittelun rajoituksena ovat lisäksi tiukat energiamääräykset.

FFTT-konseptia voidaan pitää eräänlaisena päänavauksena puurakentamisen puolesta puhujilta. Vaikka FFFT-konseptia ei ole vielä rakennettu tai suunniteltu käytettäväksi yhteenkään oikeaan rakennushankkeeseen, voi sillä tulevaisuudessa olla kysyntää. Sen yksinkertainen rakennustapa ja kohtuulliseksi jäävät kustannukset mahdollistavat sen taloudellisesti ja riskienhallinnan puolesta. FFFT-järjestelmää ja sen ratkaisuja soveltamalla voidaan myös kehittää puurakentamista yleisesti.

Vahvuudet	Heikkoudet	Mahdollisuudet	Uhkakuvat
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Hiilijalanjäljen pieneneminen</li> <li>•Nopea ja helppo rakentaa</li> <li>•Kevyt rakenne</li> <li>•Yksinkertainen toteutus</li> <li>•Suunnitelmat valmiiksi sovellettavissa avoimen järjestelmän avulla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Ei käytännön kokemuksia</li> <li>•Tuulikuorman aiheuttamat kaatavat voimat</li> <li>•Mielikuva huonosta paloturvallisuudesta</li> <li>•Kalliimpi toteuttaa kuin vastaava teräsbetonirakenne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Puun käytön kasvattaminen, ja sitä kautta hiilijalanjäljen pieneneminen</li> <li>•Suomen viennin kasvaminen</li> <li>•Työpaikkojen syntyminen puualalle</li> <li>•Myös muiden puukerrostalojärjestelmien kehittyminen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Palomääräysten tiukentuminen voi vaikeuttaa korkeiden puurakennusten toteutusta</li> <li>•Rakennuttajille liian suuri riski kokeilla uutta järjestelmää</li> <li>•Taloudellisesti liian suuri ero betonirakentamiseen, etenkin ensimmäisissä kohteissa</li> </ul>

Kuvio 1. SWOT –analyysi FFFT-konseptista.

FFTT-järjestelmän ongelmia ovatkin käytännön kokemusten puuttuminen. Myös yleinen uskomus puun toimimattomuudesta palotilanteessa sekä korkeiden rakennusten materiaalina nostavat kynnystä korkeiden puukerrostalojen kehittämiseen ja rakentamiseen. Myös vähäiset kokemukset CLT-levyjen käytöstä nostavat kynnystä niiden käyttämiseksi materiaalina. Laskennan näkökulmasta suurimmat puutteet huomattiin liimatun puutavaran laskentaohjeiden puutteellisuutena. Myöskään insinöörilukutuksessa CLT:tä materiaalina ei käsitellä juuri lainkaan. Tietoa CLT:stä löytyy huomattavasti enemmän Pohjois-Amerikasta, jossa aiheesta on julkaistu useita teoksia, kuten CLT Handbook [12]. Nykyisellään CLT-rakenteiden laskenta perustuu Euroopassa mekaanisesti koottujen palkkien laskentaan, jonka vuoksi CLT-rakenteiden mitoitukseen olisi hyvä saada täysin oma osio myös Eurokoodiin.

## Lähteet

- 1 Maa – ja metsätalousministeriö, <http://www.mmm.fi/fi/index/etusivu/metsat.html>
- 2 Suomen metsävaratietoja, verkkodokumentti, Metsätutkimuslaitos, <http://www.metla.fi/tiedotteet/2013/pdf/liite1-suomen-metsavaratietoja.pdf> luettu 14.4.2013
- 3 Puurakentamisen asema suomessa, verkkodokumentti, Puuinfo Oy <http://www.puuinfo.fi/modernit-puukaupungit/puun%20asema%20rakentamisessa> luettu 2.3.2013
- 4 Puukerrostalotutkimus 2012, verkkodokumentti, Puuinfo Oy, <http://www.puuinfo.fi/ajankohtaista/puukerrostalotutkimus-2012> luettu 10.6.2013
- 5 Puurakentamisen yhteiskunnalliset vaikutukset, verkkodokumentti, Pellervon taloustutkimus [http://ptt.fi/wp-content/uploads/2013/04/rap239\\_2911120957.pdf](http://ptt.fi/wp-content/uploads/2013/04/rap239_2911120957.pdf) luettu 28.5.2013
- 6 Rakennusmateriaalien hiilijalanjälki, verkkodokumentti, Puuinfo, <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/rakennusmateriaalien-hiilijalanjalki/rakennusmateriaalien-hiilijalanjalki-web.pdf> luettu 5.3.2013
- 7 Building solutions, verkkodokumentti, Stora Enso, <http://www.storaenso.com/products/wood-products/products/buildingsystems/Documents/Building%20Solutions%20Folder%20-%20FI.pdf> luettu 17.10.2013
- 8 Green, Michael, The case for tall wood buildings, verkkodokumentti. <http://wecbc.smallboxcms.com/database/rte/files/Tall%20Wood.pdf>, luettu 15.10.2013
- 9 CLT –levyt (cross laminated timber), verkkodokumentti, Puuinfo Oy, <http://www.puuinfo.fi/tuotteet/stora-enson-clt-levyt-cross-laminated-timber-0> luettu 20.4.2013
- 10 Heinisuo Markku, 2007 TTY koulutusaineisto, Tuulikuormat 1994-1-4 Tuulikuorman laskenta <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=95839&lan=fi> luettu 20.4.2013
- 11 Eurokoodi SFS EN 1994-1-1
- 12 CLT-handbook, Verkkodokumentti, FPSolutions. <http://www.masstimber.com/products/cross-laminated-timber-clt/handbook>

- 13 Suomen rakennusinsinöörien liitto Ril ry. 205, 2007.
- 14 Korkean rakennuksen suunnitteluohje, verkkodokumentti, Helsingin kaupunki.  
[http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/9f2ca577-14fe-41d8-be87-75362086da6a/KORKEAN\\_RAKENTAMISEN\\_RAKENTAMISTAPAOHJE\\_OHJEKORTIT.pdf?MOD=A](http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/9f2ca577-14fe-41d8-be87-75362086da6a/KORKEAN_RAKENTAMISEN_RAKENTAMISTAPAOHJE_OHJEKORTIT.pdf?MOD=A)
- 15 Kuva 1, <http://www.barbourproductsearch.info/cs4a-file021692.jpg>
- 16 <http://www.puuinfo.fi/puutavaran-kosteus>
- 17 Structure magazine, kesäkuu 2012. Lisa Podesto
- 18 Puuinfo Oy, Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje, Toinen painos
- 19 Haastattelu: Konttila Mauri, Stora Enso, Tekninen johtaja.