



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

RAKENNUSTEKNIIKAN LAITOS
TUTKIMUSSELOSTUS NRO TRT/2361/2015

PUUKERROSTALON PAINUMAN ARVIOINTI

Luonnos 23.3.2015

**Tutkimusselostus Nro 2361**

33 sivua + 3 liitesivua

Tilaaaja FWR, Finnish Wood Research Oy
Topi Helle
Unioninkatu 14
00130 Helsinki
puh. 040 7381267

Tehtävä Kirjallisuusselvitys puukerrostalojen painumisesta ja sen ottamisesta huomioon suunnittelussa ja rakentamisessa.

Tutkimusaika 2.1.2015 – 31.3.2015

Tutkija Virpi Leivo, tutkija, dipl.ins.

Tampereen teknillinen yliopisto
Rakennustekniikan laitos
PL 600
33101 Tampere

Puhelinvaihte: (03) 311 511

Jakelu

Yritys	1 kpl
TTY / Rakennustekniikan arkisto	1 kpl
Tutkija	1 kpl

**OTSIKKO****SISÄLLYSLUETTELO**

1	JOHDANTO.....	3
2	Painumisilmiö ja laskentakaavat	3
2.1	Painuman laskentakaavoja	5
3	Painumisen suuruus eri rakennejärjestelmillä	7
3.1	Pilari-palkkirakenne.....	7
3.2	Platform	8
3.3	Kantava massiivipuurakenne, CLT.....	11
3.4	Ruotsalaiset tutkimukset	14
3.5	Laskelma Runko-PES ratkaisusta.....	18
4	Painumisen vähentäminen.....	26
5	Rakenneratkaisuja painumisen hallitsemiseen.....	27
6	YHTEENVETO	30
	LÄHTEET	33
	LIITTEET	36



1 JOHDANTO

FWR:llä (Finnish Wood Research) on meneillään TEPUTU-tutkimushanke (=Teollinen puuelementtirakentamisen tutkimusohjelma), jossa on mm. laadittu RunkoPES järjestelmä

(<http://www.puuinfo.fi/rakentaminen/suunnitteluohjeet/runkopes-20>). Tutkimushanke päättyy vuoden 2015 helmikuun lopussa. Hankkeessa on noussut esille kysymys puukerrostalojen painumisesta ja miten se tulisi ottaa huomioon suunnittelussa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on pääosin kirjallisuusselvityksen avulla selvittää puukerrostalojen painumisilmiötä, sen suuruutta ja aiheuttajia sekä miten se on huomioitu puukerrostalojen suunnittelussa ja rakentamisessa muissa maissa. Tutkimuksessa on perehdytty olemassa olevaan kirjallisuuteen ja tutkimusraportteihin puukerrostalojen painumisesta eri maista. Erityisesti on keskitetty kirjallisuuteen Suomesta, Ruotsista, Iso-Britanniasta ja Kanadasta. Lisäksi tutkimuksessa on laskettu 8-kerroksisen, RunkoPES järjestelmällä toteutetun puukerrostalon teoreettinen painuma.

2 PAINUMISILMIÖ JA LASKENTAKAAVAT

Puurakennuksille on ominaista puurungon painuminen. Puurakennusten painuminen johtuu seuraavista ilmiöistä:

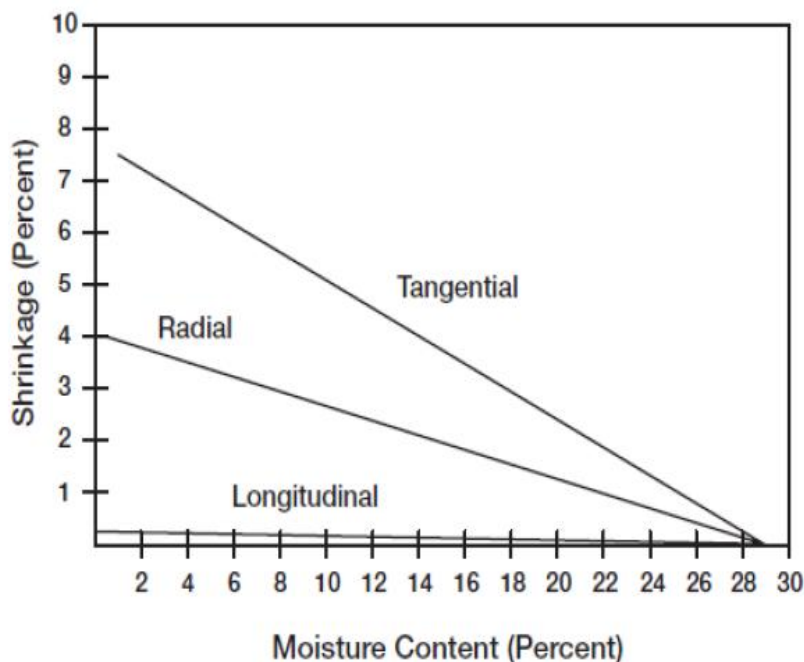
- puun kosteuspitoisuuden muutoksista johtuva kutistuma kosteuspitoisuuden pienenemyssä (tai laajeneminen kosteuspitoisuuden kasvaessa)
- kuormituksesta aiheutuva kokoonpuristuma
- puun viruma pitkäaikaisen kuormituksen johdosta
- liitoksissa olevien mahdollisten välien tiivistyminen (kokoonpuristuminen)

Lähteen (Skulsky, 2008) mukaan puun kosteuspitoisuuden muutoksista johtuva puun kutistuma tulee ottaa huomioon yli 3-kerroksissa rakennuksissa. Useiden lähteiden mukaan puun kosteuspitoisuuden muutoksista aiheutuva kosteuskutistuma muodostaa suurimman osan puurakennusten painumista (Milner, 2007; GIB, 2009; Canadian Wood Council). Lähteestä riippuen kosteuskutistuman oletetaan tapahtuvan suurimalta osin ensimmäisen lämmityskauden (GIB, 2009 tai kahden vuoden aikana (George Amundson)).

Puun kosteusliikkeet ovat suurimmat tangentin suunnassa. Puun syynvastaiset kosteusliikkeet ovat noin puolet tangentin suuntaisista ja syynsuuntaiset noin 20% syynvastaisista kosteusliikkeistä. Lähteen (Cheung, 2009) mukaan korkeissa puukerrostaloissa myös syynsuuntainen kosteudesta johtuva kutistuma on otettava huomioon.

Lähteen (Silva, 2013) mukaan kosteuskutistuma otettava huomioon jo suhteellisen pienillä kosteuspitoisuuden muutoksilla eli jos kosteusmuutokset ovat RH10% ... RH14% eli 4 RH-%.

Puu on elastinen materiaali, joka puristuu kokoon kun sitä kuormitetaan. Kokoonpuristuman suuruus riippuu puun kimmomoduulista. Puun kimmomoduuli syiden suunnassa voi olla jopa satakertainen verrattuna puun kimmomoduuliin syitä vastaan kohtisuorassa. Säteen suunnassa kimmomoduuli on noin kaksi kertaa niin suuri kuin kimmomoduuli tangentin suunnassa (kuva 1).



Kuva 1. Puun kosteuspitoisuudesta johtuvan kutistuman suuruus eri syyn suunnissa.

Virumalla tarkoitetaan puumateriaalin viskoelastista muodonmuutosta pitkän ajan kuluessa suuren kuormituksen (yli 30% puun murtolujuudesta) alaisena korkeassa lämpötilassa (yli +25 °C) ja kosteuspitoisuudessa (yli 6%). Puurakenteiden mitoituksessa Eurokoodi 5:n mukaan kosteuden ja kuormituksen keston vaikutus



(viruma) otetaan huomioon puun lujuudessa k_{mod} -kertoimella. Eurokoodissa on myös kaava, jolla voidaan kokonaismuodonmuutos, mukaan lukien viruma, laskea.

Lisäksi puun elastisuudesta johtuen puu pitenee syyn suunnassa kun sitä puristetaan säteen ja tangentin suunnissa. Vastaavasti vedettäessä syyn suunnassa kappale pienenee syyn ja tangentin suunnassa. Nämä muodonmuutokset ovat kuitenkin pieniä, eikä niitä yleensä oteta huomioon painumissa. Toisaalta seinärakenteessa yhden suunnan puristuminen ja muiden suuntien laajentuminen tiivistää rakennetta.

Myös muissa materiaaleissa ja rakenteissa tapahtuu muodonmuutoksia. Betonin kuivumiskutistuma on tyypillisesti 0,5 1,3 promillea (Rudus, 2010) ja betonirakenteiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon 0,6....0,7 % kuivumiskutistuma eli 0,6... 0,7 mm/m. Esimerkiksi betonisen julkisivuelementin kuivumiskutistuman arvoiksi on arvioitu taulukon 1 mukaiset arvot .

Taulukko 1. Julkisivuelementin kuivumiskutistuman loppuarvoja (Pentti, 2000).

Elementin ikä	Kuivumiskutistuma ‰
1 kk	0.17
6 kk	0.29
12 kk	0.35
5 v	0.41

Vastaavasti betonissa tapahtuu virumaa eli kokoonpuristuman ajasta riippuvaa kasvua puristusjännityksen pysyessä vakiona. Viruma riippuu betonin iästä kuormituksen alkaessa, sementtityypistä, rakenneosan mitoista ja ympäristöolosuhteista, erityisesti suhteellisesta kosteudesta.

2.1 Painuman laskentakaavoja

Kosteuskutistuma

Useissa amerikkalaisissa ja kanadalaisissa lähteissä (WWPA, 2002; Canadian Wood Council) esitetään kosteuskutistuman laskentakaava:

$$S = D \times M \times C,$$



missä S on kutistuma (mm), D tarkasteltavan suunnan pituus (mm), M kosteuden (%) alkutilanteen ja lopputilanteen erotus ja C puulajista riippuva muodonmuutoskerroin.

Muodonmuutuskertoimen arvoja on annettu lähteessä amerikkalaisille puulajeille. Kertoimen likiarvoksi esitetään (Canadian Wood Council) $C=0,002$ syynvastaiselle kutistumalle ja $C=0,00005$ syynsuuntaiselle kutistumalle. Erityistuotteille (kertopuulle, viilupuu, levytuotteet) on määritelty muodonmuutuskertoimien arvoja tuotesertifikaateissa.

Kuormituksen aiheuttama kokoonpuristuma

Normaalivoiman aiheuttama kokoonpuristuma voidaan laskea statiikan ja lujuusopin peruskaavalla:

$$\Delta l = \frac{F \times L}{E \times A}$$

missä Δl on kokoonpuristuma (mm), F on puristava voima (N), L on kappaleen pituus (mm), E on kimmomoduli (N/mm²) ja A kappaleen poikkileikkausala (mm²).

Viruma

Viruman aiheuttama muodonmuutos voidaan ottaa huomioon kertomalla kuormituksen aiheuttama kokoonpuristuma virumakertoimella ja lisäämällä painuma kokonaispainumaan. RIL 205-2009 mukaan sahatavaran, liimapuun ja LVL:n virumakerroin K_{mod} (käyttöluokassa 1 on 0,6). Tällöin edelle esitetty kuormituksen aiheuttaman kokoonpuristuman kaava voidaan esittää muodossa:

$$\Delta l = 1,6 \frac{F \times L}{E \times A}$$

Liitoksen painuman arviointi

Rakennusosien liitoksissa asennusvaiheessa voi jäädä ylimääräisiä rakoja liitettävien materiaalien mm. epäsuoruuden vuoksi, jotka painuvat kasaan asennustyön edistyessä ja rakenteita kuormitettaessa. Tällaisen painuman suuruutta on vaikea määritellä. Lähteen (Canadian Wood Council) mukaan tämän painuman suuruus voi olla jopa 2 mm kerrosta kohti.



3 PAINUMISEN SUURUUS ERI RAKENNEJÄRJESTELMILLÄ

Kaikilla rakennejärjestelmillä tapahtuu jonkin verran painumista. Painuman suuruuteen vaikuttaa erityisesti kuinka kosteaa käytettävä puutavara on rakennusvaiheessa eli kuinka paljon puutavaran tulee kuivua saavuttaakseen käyttötilan kosteuspitoisuuden. Toisaalta oleellista painuman kannalta on kuinka paljon rakenteessa ja erityisesti rakenneosien liitoksissa on sellaista puutavaraa, jossa kuormitus kohdistuu kohtisuoraan puun syitä vastaan.

3.1 Pilari-palkkirakenne

Pilari-palkkijärjestelmässä rakennuksen runko muodostuu liima- tai viilupuisista pilareista ja palkeista, joiden varaan väli- ja yläpohjatasot (yleensä ripalaatat) sekä ulkoseinät asennetaan. Rungon jäykistys tehdään tavallisesti vinositein jäykkien liitosten avulla. Salosen (Salonen, 2012) mukaan pilari-palkkijärjestelmässä painumat ovat pienet ja kuormat jakaantuvat pilareita pitkin perustuksiin, kun pilarit ovat yhdenpituisia katolle saakka. Rakennusten välipohjissa ei ole kuormaa välittäviä liitoksia tai poikittaista puuta, koska pystykuormat välittyvät yhtämittaisia pilareita pitkin suoraan perustuksille. Pilari-palkkirunkoisen puukerrostalon kokonaispainuma on samaa luokkaa kuin muilla tekniikoilla kerroksittainen painuma (Kryssi, 2013). MetsäWoodin ohjeiden mukaan laskennallisena painumana voidaan käyttää arvoa 1 mm/ kerros. Tämä arvo saadaan esimerkiksi seuraavasti:

Pilari 595x195, Kerto-S, L=2600 mm, kuormaa pilarille 12 m² alalta.

kosteuspitoisuususero 2% (9%-7%), kosteuden muutosmuutoskerroin c=0,0001 (Kerto-käsikirjasta)

$\Delta s = 2600 \times 2 \times 0,0001 = 0,52$ mm kosteuskutistuma kerrosta kohti

Kokoonpuristuma (+viruma): $A = 116\,025$ mm², L=2600 mm, E= 10 500 N/mm² ja $F = 12 \times (2 + 2/3) = 32\,000$ N/kerros eli 8.kerroksisen alimmassa kerroksessa $F = 256\,000$ kN (omapaino 2 kN/m², hyötykuorma/kerros 2 kN/m², josta painumalaskelmaan otetaan 1/3)

$\Delta l = 1,6 \times (256\,000 \times 2600) / (13800 \times 116\,025) = 0,67$ mm alimmassa kerroksessa (ja ylimmässä kerroksessa $0,67/8 = 0,08$ mm)

Kokonaispainuma= 1,19 mm alimmassa kerroksessa ja ylimmässä kerroksessa 0,6 mm.

3.2 Platform

Pohjois-Amerikassa ja Iso-Britanniassa yleisesti käytetty rakennejärjestelmä on platform (Suomessa kutsuttu avoimeksi rakennejärjestelmäksi). Pääperiaatteena on, että rakennus rakennetaan kerroksittain tason, edellisen kerroksen (platform) päälle. Järjestelmässä suurimmat muodonmuutokset tulevat välipohjien kohdalle, Suomessa rakennetuissa kohteissa on mitattu välipohjan kohdalla 5...10 mm painumia (Viljakainen, 2005).

Kanadalainen FPInnovations (Canadian Wood Council) on arvioinut ja mitannut 4- ja 5-kerroksisen platform-järjestelmällä toteutetun toimistorakennuksen painumia. 4-kerroksisen rakennuksen välipohjat koostuivat 38 mm × 240 mm sahatavarasta (S-Dry) ja seinän pystyrunko sekä ala- ja yläjuoksut (T&B plate) 38 mm × 140 mm sahatavarasta (S-Dry). 5-kerroksisen rakennuksen välipohjat koostuivat I-palkeista, joissa oli LVL-laipat. Seinät olivat samanlaiset kuin 4-kerroksisessa. Kuvissa 2 ja 3 on esitetty laskennalliset painumat. Laskelmissa on otettu huomioon kosteuskutistuma (Δ_m) ja kuormituksen aiheuttama painuma, sisältäen viruman (Δ_s). Kohteissa on tehty painumamittauksia. Mittausten mukaan 4-kerroksisen rakennuksen kokonaispainuma on ollut 34 mm 22 kuukauden mittausjakson jälkeen ja 5-kerroksisen rakennuksen 25 mm 17 kuukauden mittausjakson jälkeen.

Storey	member	Dimension [mm]	Area [mm ²]	MOE [MPa]	Shrinkage Coefficient	Initial MC	final MC	Δ_m [mm]	Force [N]	Δ_s [mm]	$\Delta_m + \Delta_s$ [mm]
4th	T&B plate	152	5320	300	0.002	19	8	3.34	750	0.11	3.46
	studs	2440	5320	9500	0.00005	19	8	1.34	750	0.06	1.40
3rd	Joist	240	5320	300	0.002	19	8	5.28	1950	0.47	5.75
	T&B plate	152	5320	300	0.002	19	8	3.34	2700	0.41	3.76
	studs	2440	5320	9500	0.00005	19	8	1.34	2700	0.21	1.55
2nd	Joist	240	5320	300	0.002	19	8	5.28	1950	0.47	5.75
	T&B plate	152	5320	300	0.002	19	8	3.34	4650	0.71	4.05
	studs	2440	5320	9500	0.00005	19	8	1.34	4650	0.36	1.70
1st	Joist	240	5320	300	0.002	19	8	5.28	1950	0.47	5.75
	T&B plate	152	5320	300	0.002	19	8	3.34	6600	1.01	4.35
	studs	2440	5320	9500	0.00005	19	8	1.34	6600	0.51	1.85
Total movement								34.58		4.78	39.37

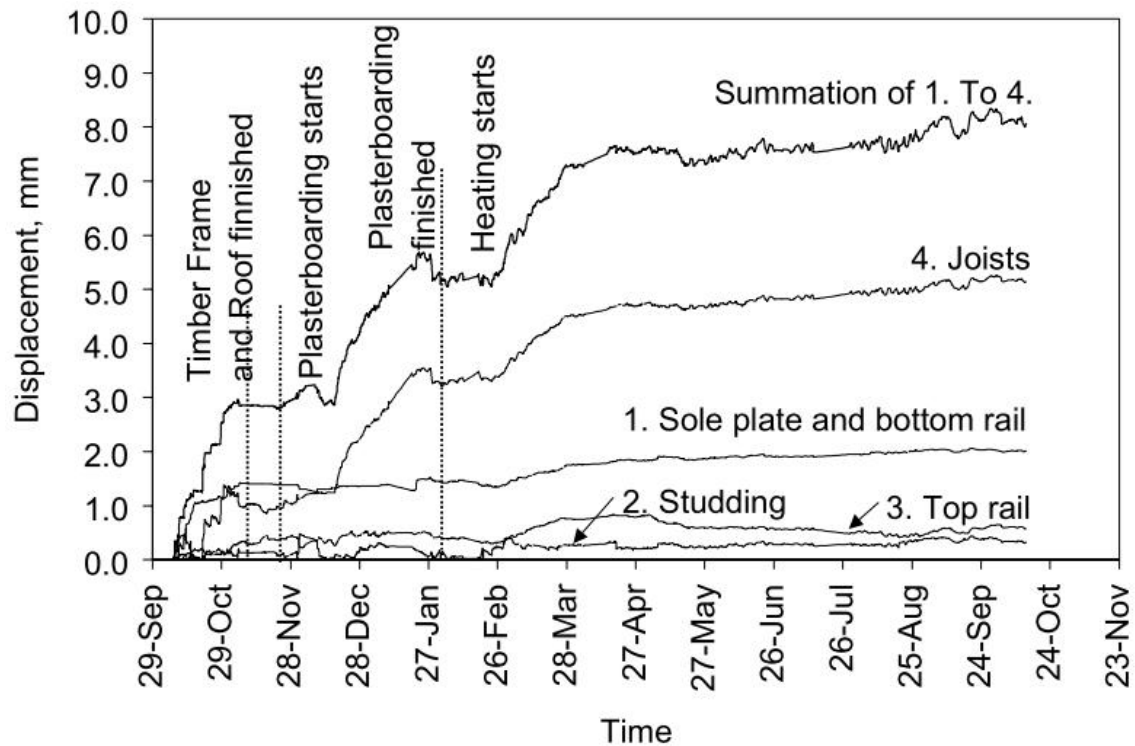
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Kuva 2. 4-kerroksisen toimistorakennuksen laskennallinen painuma, Δ_m on kosteuskutistuma ja Δ_s kuormituksen aiheuttama painuma (sisältää viruman).

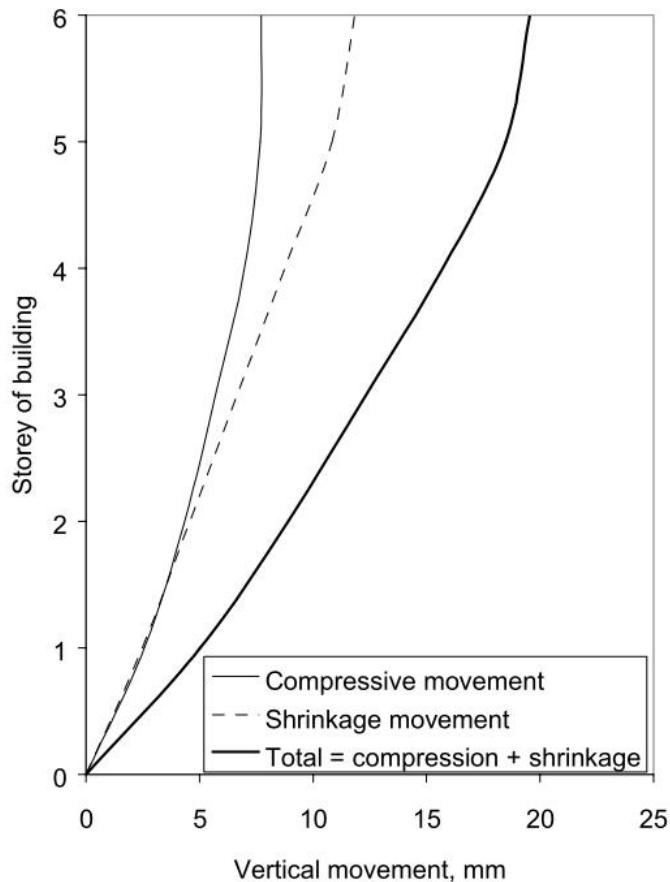
Storey	member	Dimension [mm]	Area [mm ²]	MOE [MPa]	Shrinkage Coefficient	Initial MC	final MC	Δ_m [mm]	Force [N]	Δ_s [mm]	$\Delta_m + \Delta_s$ [mm]
5th	T&B plate	152	5320	300	0.002	19	8	3.34	750	0.11	3.46
	studs	2440	5320	9500	0.00005	19	8	1.34	750	0.06	1.40
4th	I-Joist	70	8960	300	0.002	8	8	0.00	1950	0.08	0.08
	T&B plate	152	5320	300	0.002	19	8	3.34	2700	0.41	3.76
	studs	2440	5320	9500	0.00005	19	8	1.34	2700	0.21	1.55
3rd	I-Joist	70	8960	300	0.002	8	8	0.00	1950	0.08	0.08
	T&B plate	152	5320	300	0.002	19	8	3.34	4650	0.71	4.05
	studs	2440	5320	9500	0.00005	19	8	1.34	4650	0.36	1.70
2nd	I-Joist	70	8960	300	0.002	8	8	0.00	1950	0.08	0.08
	T&B plate	152	5320	300	0.002	19	8	3.34	6600	1.01	4.35
	studs	2440	5320	9500	0.00005	19	8	1.34	6600	0.51	1.85
1st	I-Joist	70	8960	300	0.002	8	8	0.00	1950	0.08	0.08
	T&B plate	152	5320	300	0.002	19	8	3.34	8550	1.30	4.65
	studs	2440	5320	9500	0.00005	19	8	1.34	8550	0.66	2.00
Total movement								23.43		5.66	29.09

Kuva 3. 5-kerroksisen toimistorakennuksen laskennallinen painuma.

Iso-Britanniassa on kehitetty Platform-tekniikkaan perustuva TF2000-puukerrostalon rakennejärjestelmä (Grantham & Enjily, 2000), jonka mukaisessa 6-kerroksinen testirakennuksessa on mitattu rakennuksen muodonmuutoksia reilun vuoden ajan (kuva 4). Mittauksilla on pyritty määrittämään eri painumien suuruudet. Kuvan 4 mukaan suurin osa painumista näyttäisi tulevan ensimmäisen lämmityskauden aikana ja noin vuoden jälkeen ei tapahdu enää merkittäviä painumia. Kuvassa 5 on esitetty kosteuskutistumasta ja puun kokoonpuristumasta aiheutuvien painumien suuruudet eri kerroksissa.



Kuva 4. Painumat 6-kerroksissa TF2000-kerrostalossa (Grantham & Enjily, 2000).



Kuva 5. Painuman suuruus 6-kerroksisen TF2000-kerrostalon eri kerroksissa (Grantham& Enjily, 2000).

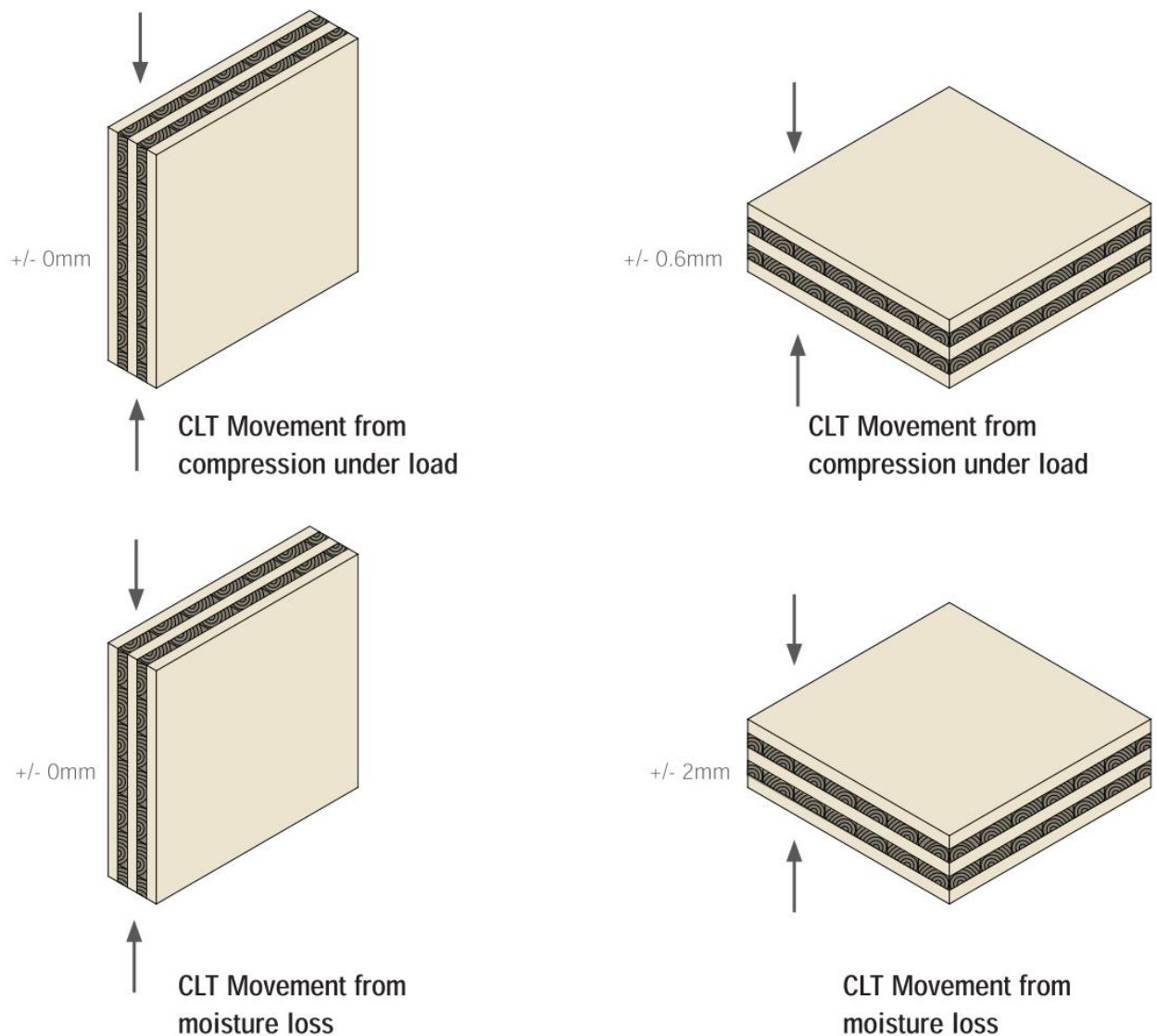
3.3 Kantava massiivipuurakenne, CLT

Kantavat seinät voidaan toteuttaa esimerkiksi CLT-massiivipuulevystä, jossa puukerrokset on liimattu ristiin (CLT; *cross laminated timber*). Levy toimii sekä kantavana että jäykistävänä rakenteena seinissä ja välipohjissa.

Muutaman lähteen mukaan CLT:ssä ei tapahdu merkittäviä painumia (Van de Kuilen, 2011; Binderholz). Lähteen (Handbook 1, 2008) mukaan erityisesti liitosten suunnittelussa tulee ottaa huomioon kutistumat, koska kutistumat (syynsuuntaiset) CLT-elementtiä kohtisuoraan suuntaan voivat muodostua suuriksi.

Lontoon Stadthausin esitteen (Tall timber buildings) mukaan CLT:n pitkäaikainen viruma levyn suuntaan on erittäin pieni ja levyä vastaan noin 1%. Vastaavasti kosteuden aiheuttamat kutistumat levyn suuntaan olet pieniä ja levyä vastaan kohtisuoraan alle 2%.

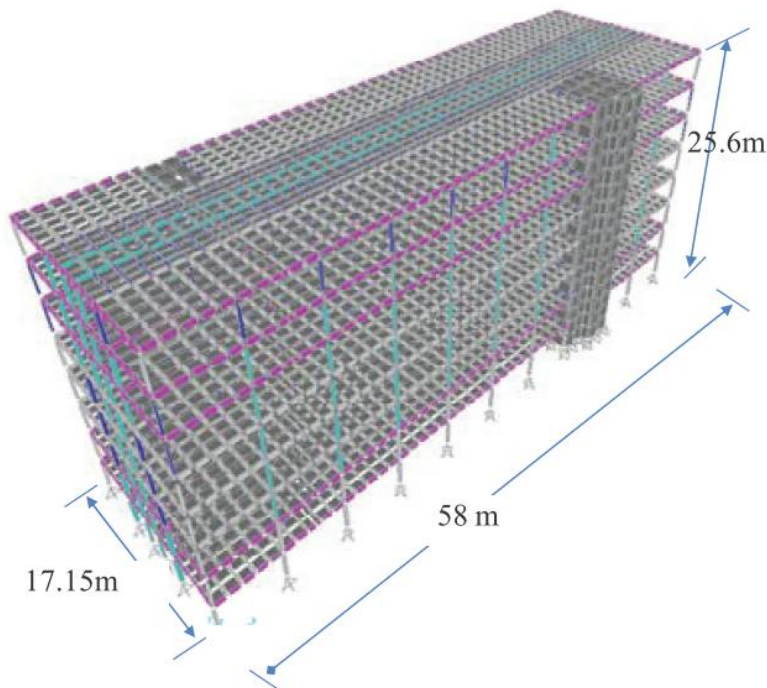
CLT-elementin painuman suuruuksia on esitetty kuvassa 6 (Green, 2012). Lähteen mukaan CLT-elementin kosteuskutistumat kohtisuoraan suuntaan voivat olla suuremmat kuin LVL:n ja LSL:n samansuuntaiset kutistumat, koska CLT muodostuu massiivipuukerroksista. Nämä kosteuskutistumat tulee ottaa huomioon, jos CLT-elementeistä tehdään korkea kerrostalo Platform-tekniikalla, kuten Lontoon Stadhaus. Perusteena CLT:n pienille kosteuskutistuman arvoille pidetään myös sitä, että asennettavan CLT-elementin kosteuspitoisuus on suhteellinen alhainen (8...10%).



Kuva 6. CLT-elementin muodonmuutokset (Green, 2012).

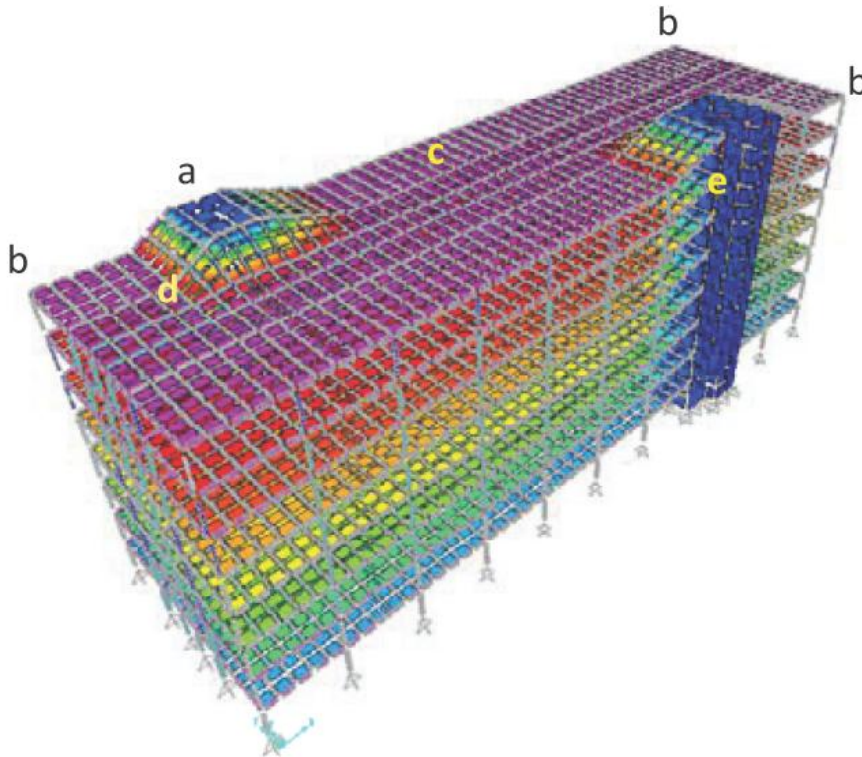
CLT-rakenteisten kantavien ulkoseinien ja välipohjien liittymissä käytetään usein tärinäeristeitä (sylomer) liittymän ääneneristävyyden parantamiseksi. Tärinäeristekumeja on saatavilla eri kuormitustasoille. Tärinäeristekumien paksuus on 12,5 – 25 mm ja staattinen kuormitettavuus vaihtelee kumityypistä riippuen välillä 0,005 – 3,0 k/mm². Käyttöäksi ilmoitetaan yleensä 100 vuotta. Tärinäeristeissä voi tapahtua painumaa, erityisesti jos valittu eriste ei ole todelliselle kuormitustasolle tarkoitettu.

Kanadalaisessa tutkimuksessa (Meleki, 2011) on mallinnettu toimistorakennuksen (korkeus vastaa noin 8 asuinkerrosta) muodonmuutoksia FEM-menetelmällä (Finite Element Method). Rakennuksen mitat ovat esitetty kuvassa 7. Rakennuksen rungon muodostavat liimapuiset palkit ja pilarit (glued-laminated-timber; glulam) ja rakennuksen jäykistävät teräsbetoniset porraskuilut.



Kuva 7. Mallinnetun toimistorakennuksen mitat.

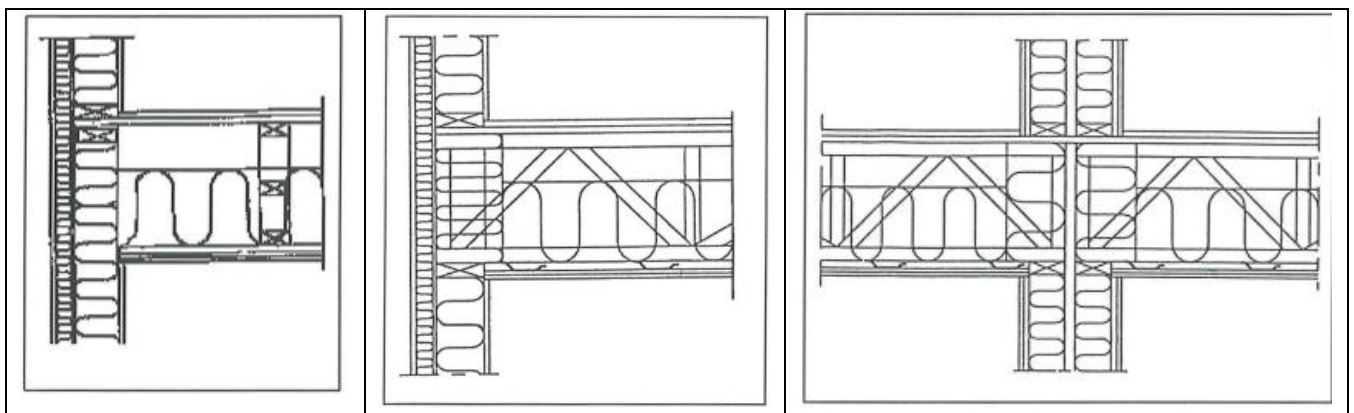
Mallinnuksen mukaan puurungon painuma oli tarkastelupisteissä (b ... e) 25,6 mm (kuva 8). Betonisen porraskuilun painuma oli 0 mm (tarkastelupiste a).



Kuva 8. Toimistorakennuksen painumat mallinnuksen mukaan.

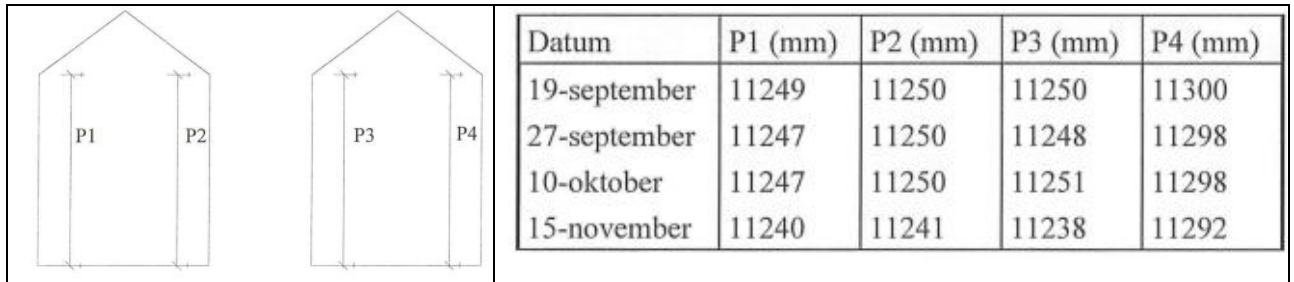
3.4 Ruotsalaiset tutkimukset

Lundin teknillisen yliopiston tutkimuksessa (Jordow, 1996) on tehty teoreettisia tarkasteluja sekä laboratorio- ja kenttämittauksia puurakennuksen painumista. Mittauskohteena on ollut kaksi 4-kerroksista Skanskan rakentamaa puukerrostaloa Linköpingissä. Rakennusten runko on toteutettu platform-tekniikalla, mutta välipohjat muodostuvat ristikoista, jolloin välipohjien painumat ovat pienemmät (kuva 9).



Kuva 9. Puukerrostalon rakenteet, Linköping.

Koko rakennuksen painumaa on mitattu 14 kuukauden ajan. Kuvasta 10 nähdään, että toisen rakennuksen kokonaispainuma on ollut 9 mm ja toisen 12 ja 8 mm (epätasainen painuma). Nämä painumat ovat merkittävästi pienempiä kuin perinteisellä platform-tekniikalla.

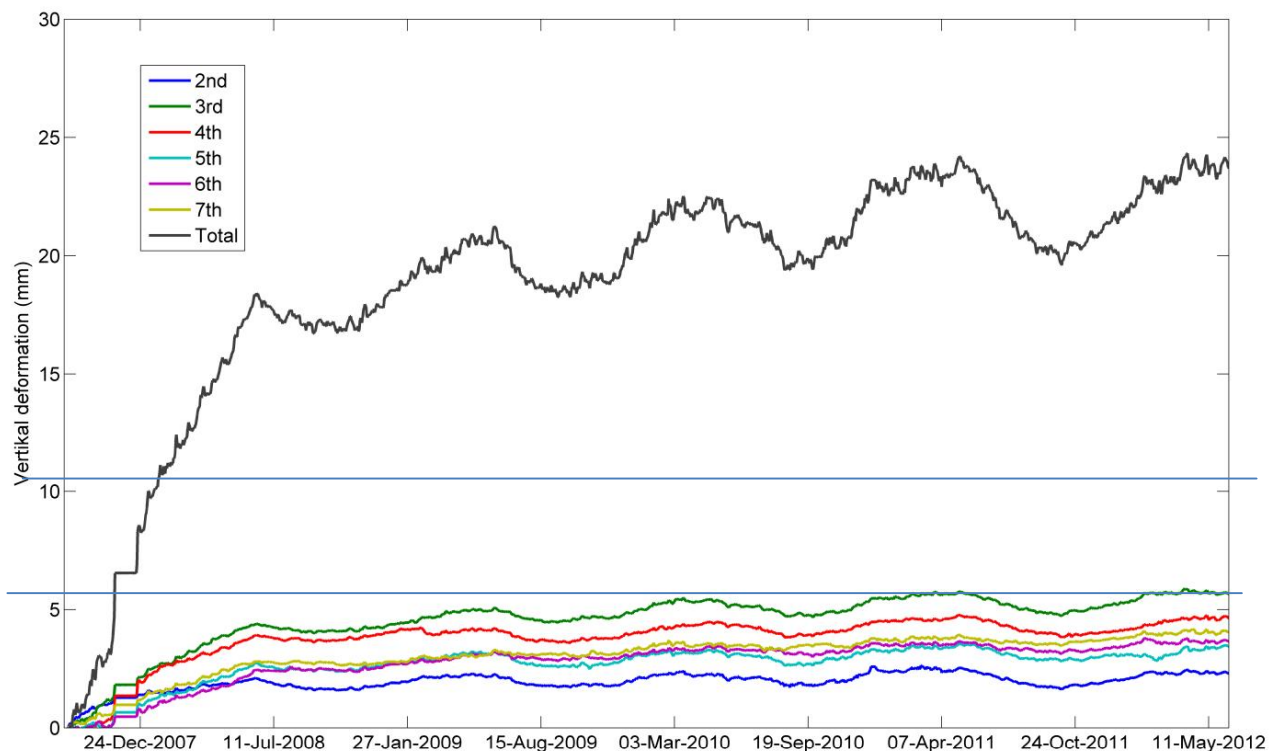


Kuva 10. Painuman mittauspisteet ja mittaustulokset, Linköping.

Växjön puukerrostaloissa on tehty painumamittauksia 57 kuukauden ajan (Serrano, 2009; Serrano, 2012) 6-kerroksisessa rakennuksessa. Välipohja ja ulkoseinän kantava osa ovat massiivipuurakenteisia. Kuvassa 11 esitetään ulkoseinän ja välipohjan leikkaus ja painumamittareiden sijainti. Painumamittarit on asetettu ulkopuoliseen kanavaan. Kuvassa 12 on esitetty mitatut painumat eri kerroksissa ja rakennuksen kokonaispainuma 57 kuukauden mittausjakson aikana. Yksittäisen kerroksen painuma on ollut enintään noin 6 mm ja rakennuksen kokonaispainuma noin 24 mm. Suurin osa painumasta on tapahtunut ensimmäisen lämmityskauden aikana. Kesällä 2008 kokonaispainuma on ollut 18 mm ja vuoden päästä 22 mm. Painumissa havaitaan vuodenajan kosteuspiitoisuudesta riippuvaa vaihtelua, joka on noin ± 2 mm.



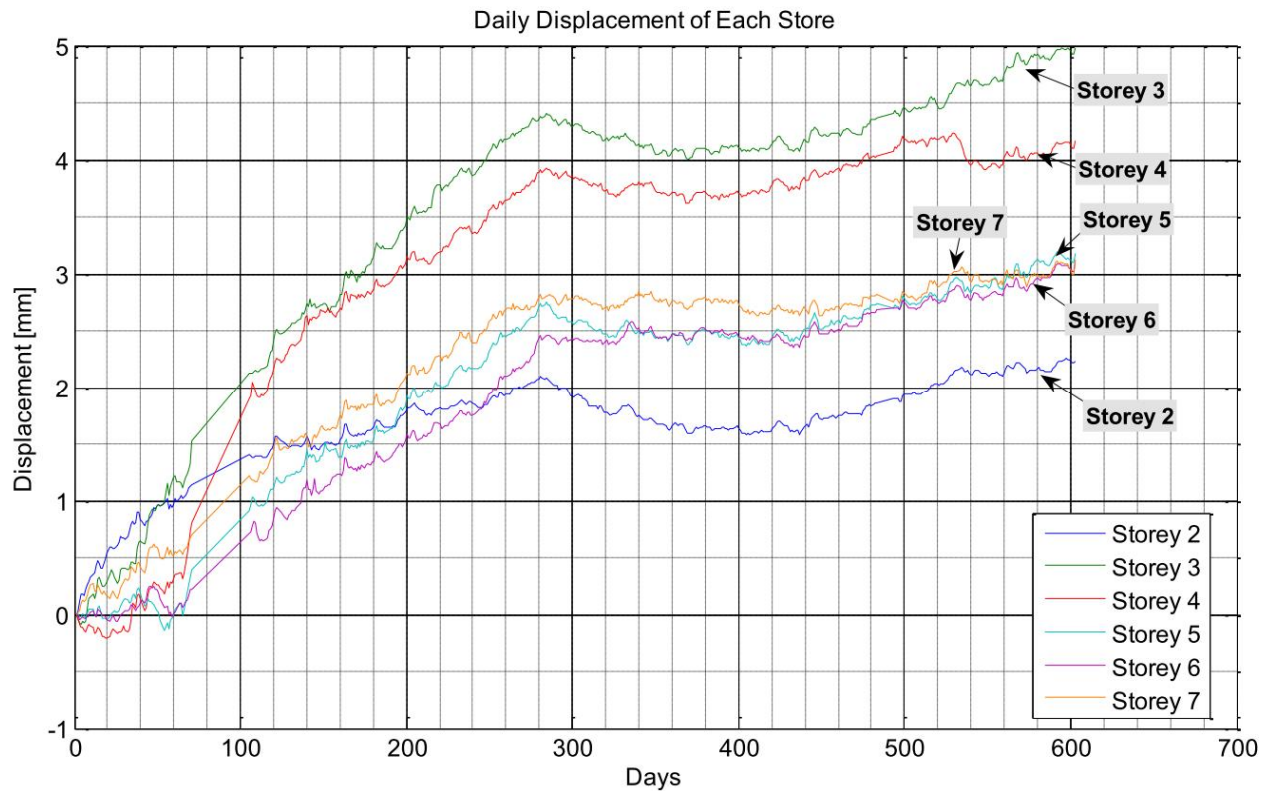
Kuva 11. Växjön puukerrostalon välipohjaliitos ja painuman mittauskanava.



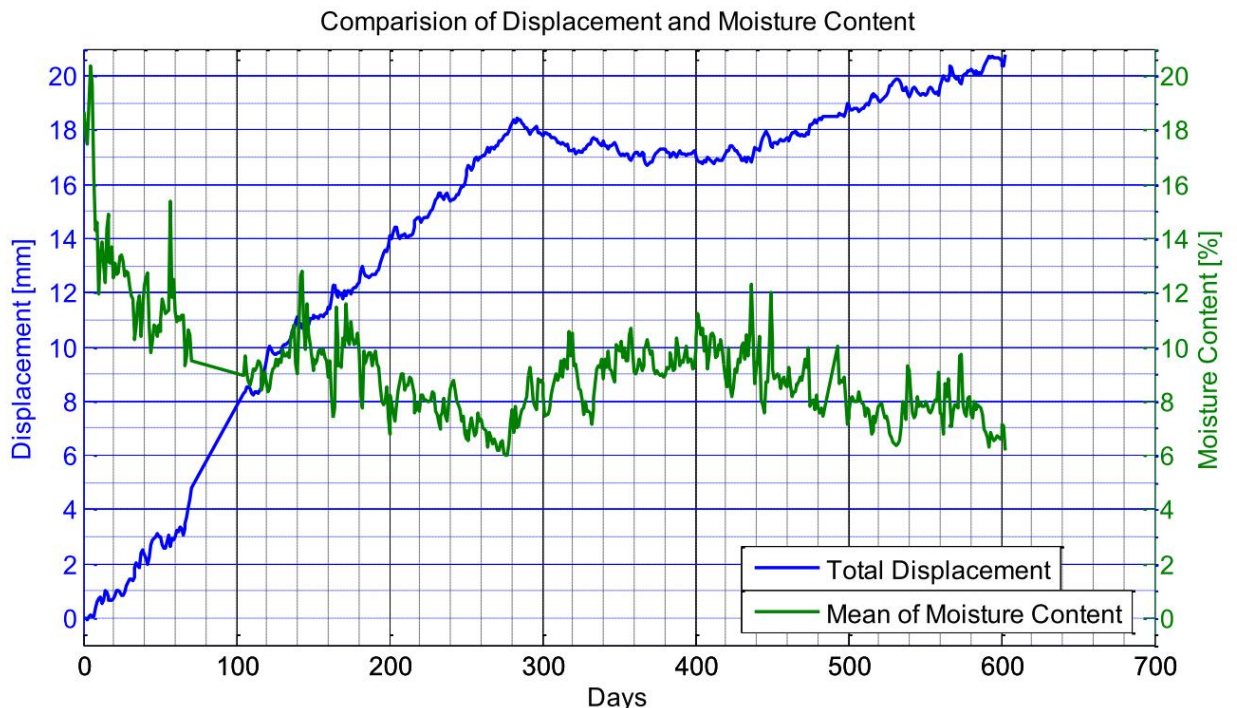
Kuva 12. Växjön puukerrostalon painuma 57 kuukauden mittausjakson aikana.

Växjön yliopiston tutkimuksessa (Zeng, 2009) on pyritty mallintamaan edelle esitetyn puukerrostalon painumia. Tutkimuksessa esitetään painumat eri kerrosten kohdalla (kuva 13) vajaan kahden vuoden ajalta tarkemmin kuin edellä Serranon raporteissa. Mallinnuksen lähtökohtana on ollut mittaustulokset, erityisesti kuva 14 kokonaispainuman ja kosteuspitoisuuden käyrät. Kuvasta nähdään, että painuma riippuu suuresti kosteuspitoisuudesta. Tämä vahvistaa käsitystä, että suurin osa rakennuksen painumista johtuu puun kosteuspitoisuuden vähenemisestä aiheutuvasta kutistumisesta. Tutkimuksessa on eritelty kolme vaihetta painuman muodostumisessa. Painuman ensimmäinen vaihe, suurimman painuman vaihe, kestää noin vuoden. Suurin osa painumista johtuu puurakenteen kuivumisesta ja kutistumisesta. Ensimmäisessä vaiheessa myös liitoksissa olevat mahdolliset ylimääräiset välit tiivistyvät kuormituksen vaikutuksesta. Tämä painuma on suurelta osin tapahtunut jo ennen kuin mittaukset on aloitettu. Seuraavassa vaiheessa puun kosteuspitoisuus nousee ulkoilman kosteuspitoisuuden noustessa kesällä ja painumat pienenevät hieman. Kolmannessa vaiheessa puun kosteuspitoisuus nousee ja painumat suurenevät. Painumat suurenevät kolmannessa vaiheessa enemmän kuin ne pienenevät toisessa vaiheessa, vaikka kosteuspitoisuuden muutos on samansuuruinen molemmissa vaiheessa, noin 5 RH%. Tämä johtuu siitä, että puussa tapahtuu myös viruman aiheuttamaa painumaa. Mallinnuksilla rakennuksen

painumaksi saatiin 17, 33 tai 35 mm, riippuen miten kosteuden oletettiin jakaantuvan CLT-levyssä (tasainen, epätasainen). Mitattu vastaava painuma oli 21 mm.



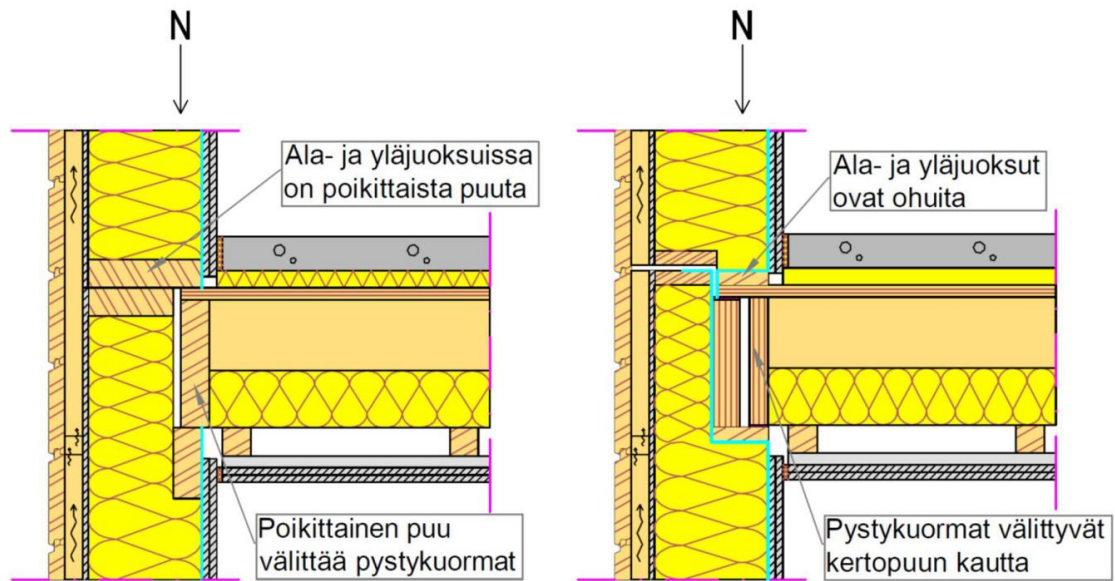
Kuva 13. Växjön puukerrostalon painumat eri kerrosten kohdalla (Zeng, 2009).



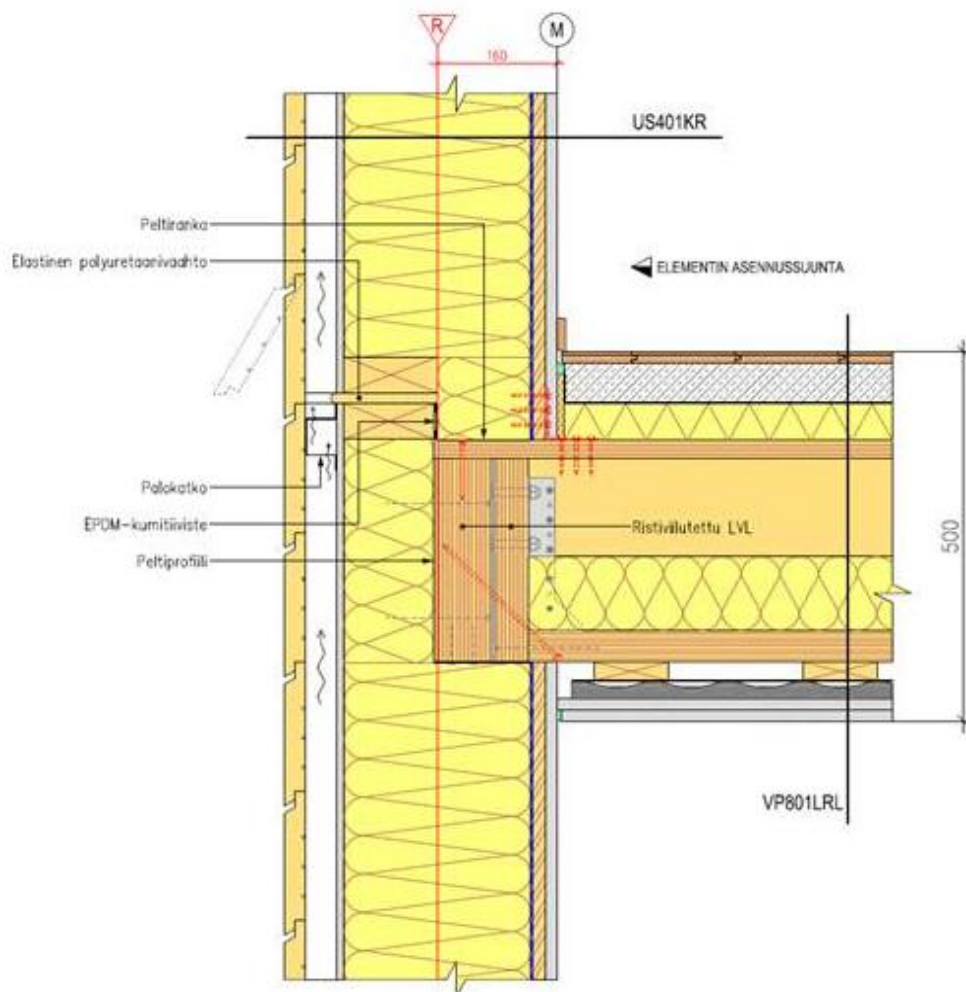
Kuva 14. Växjön puukerrostalon kokonaispainuma ja puun kosteuspitoisuus (Zeng, 2009).

3.5 Laskelma Runko-PES ratkaisusta

Runko-PES-rakennejärjestelmällä vakioidaan puuelementtirakentamista. Kehitettyjen periaatteellisten liittymädetaljiien avulla yritykset voivat kehittää omia ratkaisuja. RunkoPES-järjestelmän liitosten painumaominaisuuksia on tarkasteltu TTY:n diplomityössä (Kryssi, 2013). Diplomityössä on verrattu perinteistä välipohjaliitosta ja RunkoPES-liitosta (Kuva 15). Vasemmanpuoleisessa liitoksessa on paljon puutavaraa, jossa puun syyt ovat kohtisuorassa kuormitusta vastaan. Liitokseen voi aiheutua puun kosteuspitoisuudesta ja pystykuorman suuruudesta riippuen jopa 10 mm:n suuruinen painuma. Oikeanpuoleisessa, RunkoPES-liitoksessa on huomattavasti vähemmän puuta, jonka syyt ovat kohtisuorassa kuormitusta vastaan. Kaikki poikittaiset syrjällään olevat kuormia välittävät puuosat ovat kertopuuta. Kyseisen liitoksen painuma on kuormista riippuen noin kahden millimetrin luokkaa (Kryssi, 2013). Liitosta on edelleen kehitetty ja nykyinen RunkoPES-järjestelmän mukainen liitos on kuvassa 16.



Kuva 15. Perinteisen ja RunkoPES-liitoksen painuman vertailua (Kryssi, 2013).

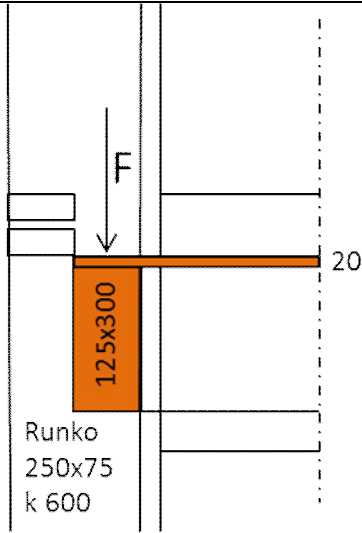


Kuva 16. Runko-PES välipohjaliittymä.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

RunkoPES välipohjaliittymän painumalaskelmat

Painumalaskentaa varten liittymästä tehdään yksinkertaistettu malli (kuva 17). Ulkoseinän pystyrunko (125 x 75 k 600) ja vaakarungot (125 x 50) ovat puutavaraa. Välipohjan palkit ja levyt ovat LVL-levyä. Materiaalien laskennassa tarvittavat materiaaliarvot on esitetty kuvassa 17. LVL-levyn materiaaliarvot on saatu MetsäWoodin kerto-käsikirjasta (Metsäwood, 2012). Laskennassa oletettu, että LVL-palkeille kohdistuva voima (F) muodostuu katon omasta painosta ($1,0 \text{ kN/m}^2$), välipohjan painosta, välipohjan hyötykuormasta sekä ulkoseinän painosta. Taulukkoon 2 on laskettu ulkoseinän (Runko-PES-tyyppi US401KR) ja välipohjan (VP801LRL) painot.

			Sahatavara	LVL (Kerto-Q)
	Kimmomoduli, E	(N/mm^2)	14 000	10 500
	Tiheys, ρ_k	(kg/m^3)	420	480
	Muodonmuutoskerroin, c	(-)	0,002	0,0003 (leveys)
				0,0024 (paksuus)
				0,0001 (pituus)
	Virumakerroin, K_{mod}	(-)	0,6	0,6

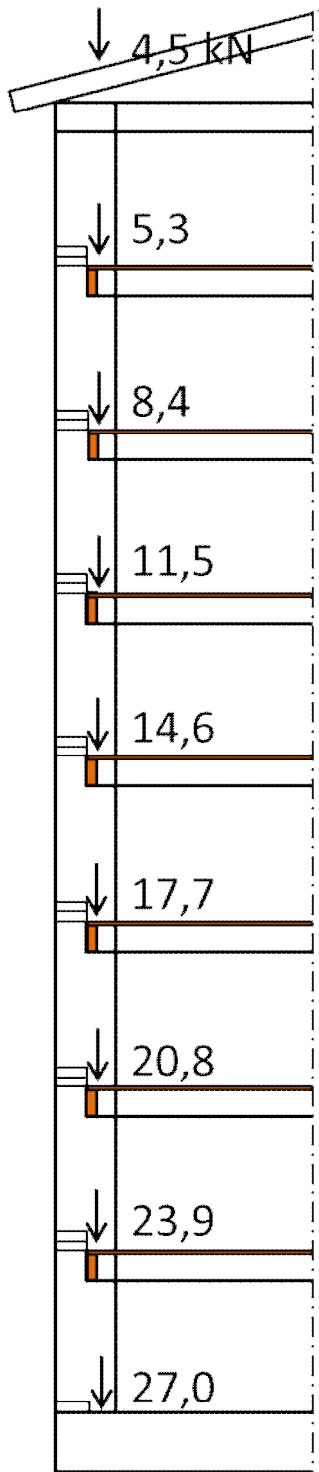
Kuva 17. Yksinkertaistettu malli liitoksesta painumalaskentaa varten.



Taulukko 2. Ulkoseinän (kerrosta, 2,6 m, kohti) ja välipohjan paino yhtä runkotolppaa kohti (k600).

Materiaali	Koko	Tiheys, kg/m ³	Paino, kg
<i>Ulkoseinä</i>			
Ulkoverhous	28 mm	420	18,4
Puurangat (ulkoverh. kiinnitys)	42 x 42 k 600	420	1,9
Tuulensuojakipsilevy	10 mm	880	13,7
Runko, puutavara	250 x 75 k 600	420	20,5
Palosuoj-/jäykistävä levy, vaneri	20	480	5,8
Kipsilevy	15	880	15,8
Yhteensä			76,1 (0,8 kN)
<i>Välipohja</i>			
Lattiapinnoite, parketti	15	480	4,3
Kipsivalu	55	880	29,0
Askeläänieristevilla	50	85	2,6
Kantava runko, ripalaatta	50 x 300 k 600, yp 20 mm levy ap 50 mm levy	480	7,2 + 20,2 = 27,4
Kipsilevyt x 2	15+15 mm	880	15,8
Yhteensä			79,1 (0,8 kN)

Välipohjan hyötykuorma on Eurokoodi 5:n mukaan 2,0 kN/m². Ruotsalaisessa tutkimuksen (Zeng, 2009) painuman mallinnuksessa on oletettu 1/3 teoreettisesta hyötykuormasta olevan pitkäaikaista, painumaa aiheuttavaa. Jos välipohjan jänneväliksi oletetaan 7,5 m, jokaiselta välipohjalta kohdistuu liitokseen tukireaktio $2,0/3 \times 7,5/2 \times 0,6 = 1,5$ kN (yhtä runkotolppaa, k600, kohti). Jokaiselta kerrokselta tulee siten lisäkuormaa $1,5+0,8+0,8= 3,1$ kN. Jos yläpohjan jänneväliksi oletetaan 15 m, ulkoseinälle kohdistuu tukireaktion $1,0 \times 15/2 \times 0,6 = 4,5$ kN (yhtä runkotolppaa, k600, kohti) suuruinen voima. Kuvaan 18 on laskettu 8-kerroksisen talon painumalaskennassa käytetyt kuorman suuruudet.



Kuva 18. Kuorman suuruudet eri kerroksissa.



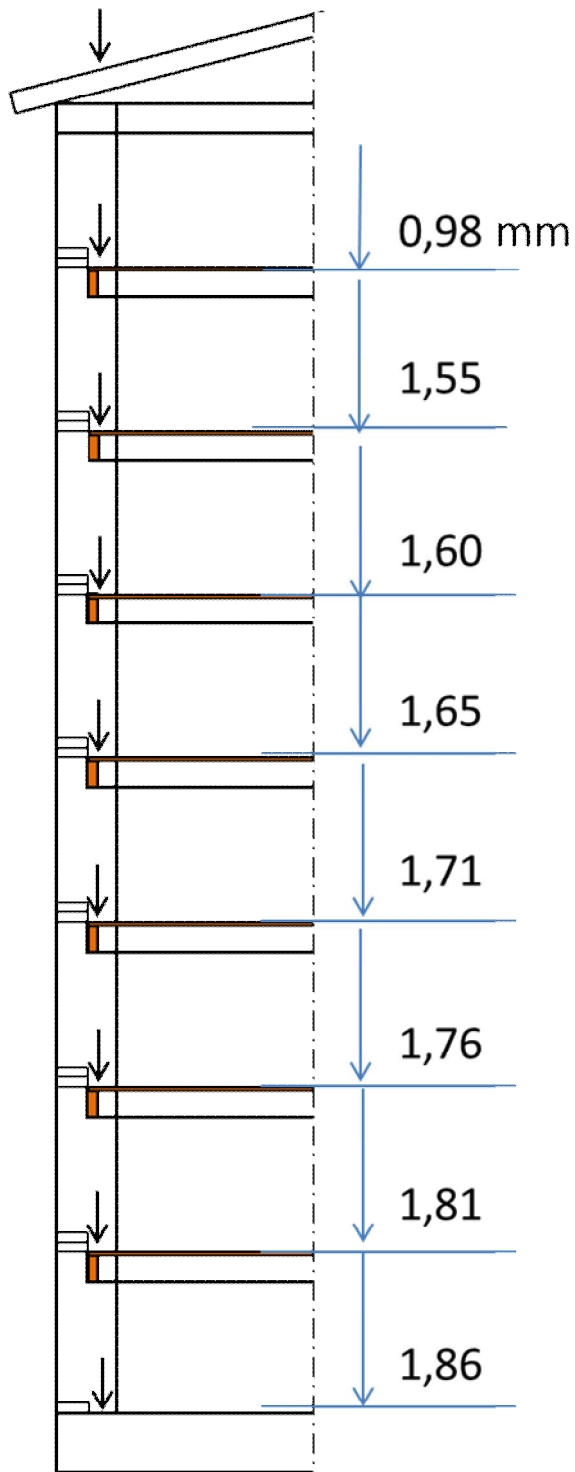
Kosteusluokassa 1 kosteuspitoisuudet ovat yleensä 6...10% ja kosteusluokassa 2 10...16%. Kertopuun kosteuspitoisuus tehtaalta lähtiessä on 8...10% (MetsäWood, 2012). Puutavaran kosteuspitoisuudeksi alkutilanteessa on oletettu 13%. Painumalaskelmassa kosteudenmuutoksen suuruudeksi puutavaralla on oletettu $13-6=7\%$ ja kertopuulla $10-6=4\%$.

Painumalaskelma on esitetty taulukossa 3. Kuvassa 19 on havainnollistettu painumaa eri kerroksissa. Laskelma on myös liitteessä 1.

Taulukko 3. Painumalaskenta.

Välipohja												
Kerros	Rak.osa	D, mm	c	Δs , mm	F, N	E, N/mm ²	l, mm	A, mm ²	Δf , mm	$\Sigma (\Delta s + \Delta f)$	Summa/kerros	
	8 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	4500	14000	2600	18750	0,071	0,98		
												0,98
	7 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	5300	14000	2600	18750	0,084	0,99		
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	5300	10500	20	12000	0,001	0,19		
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	5300	10500	300	75000	0,003	0,36		1,55
	6 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	8400	14000	2600	18750	0,133	1,04		
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	8400	10500	20	12000	0,002	0,19		
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	8400	10500	320	75000	0,005	0,37		1,60
	5 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	11500	14000	2600	18750	0,182	1,09		
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	11500	10500	20	12000	0,003	0,19		
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	11500	10500	320	75000	0,007	0,37		1,65
	4 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	14600	14000	2600	18750	0,231	1,14		
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	14600	10500	20	12000	0,004	0,20		
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	14600	10500	320	75000	0,009	0,37		1,71
	3 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	17700	14000	2600	18750	0,281	1,19		
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	17700	10500	20	12000	0,004	0,20		
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	17700	10500	320	75000	0,012	0,37		1,76
	2 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	20800	14000	2600	18750	0,330	1,24		
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	20800	10500	20	12000	0,005	0,20		
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	20800	10500	320	75000	0,014	0,37		1,81
	1 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	23900	14000	2600	18750	0,379	1,29		
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	23900	10500	20	12000	0,006	0,20		
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	23900	10500	320	75000	0,016	0,38		1,86
			Sum	11,144				Sum	1,78	12,93		

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



Kuva 19. Laskennallinen painuma 8-kerroksissa RuunkoPES-järjestelmällä toteutetussa puukerrostalossa.

RunkoPES-järjestelmän mukaisella välipohjaliittymällä toteutetun 8-kerroksisen puukerrostalon laskennallinen painuma on enintään 1,9 mm/kerros eli vähintään eli



kolmasosa Platform-tekniikalla toteutetun puukerrostalon painumasta. Painumaa voidaan edelleen pienentää käyttämällä kuivempaa puutavaraa (laskennassa sahatavaran alkukosteus 13% ja kertopuun 10%) sekä pienentämällä ulkoseinän vaakarungon paksuutta. Kertopuun käyttö vaakarungossa ei pienennä painumaa, koska kertopuun kosteuden muodonmuutoskerroin levyn paksuuden suunnassa on suurin piirtein sama (0,0024) kuin sahatavaran puun syitä vastaan kohtisuorassa (0,002).

Taulukosta 2 nähdään, että suurin osan rakennuksen painumista aiheutuu puun kosteuspitoisuuden muutoksista (11,1 / 12,9 mm). Laskennassa on oletettu, että puun alkukosteus on suhteellisen kuiva (sahatavara 13%, kertopuu 10%). Jos puun alkukosteus olisi jostakin syystä korkeampi (sahatavara 16%, kertopuu 13%), rakennuksen painuma kosteuspitoisuuden muutoksesta johtuen olisi 17,2 mm (kokonaispainuma 18,8 mm) ja suurin yhden kerroksen matkalla tapahtuva painuma 2,6 mm. Laskelma on liitteessä 1.

Edellä esitetyssä laskelmassa on Runko-PES-liittymä, jossa on erityisesti otettu huomioon painuman minimointi. Aiemmassa Runko-PES-liittymässä oli välipohjan liittyvän palkin ala- ja yläpuolella peltirangan tilalla ala- ja yläjuoksut sahatavaraa (125x50), kuvan 15 oikeanpuoleinen rakennekuvan mukaisesti. Tällöin painumalaskelma olisi taulukon 3 mukainen. Kokonaispainuma olisi kyseisellä rakenteella 20,2 mm ja suurin yhden kerroksen matkalla tapahtuva painuma 2,9 mm. Laskelma on liitteessä 1.



Taulukko 3. Painumalaskelma aiemmalla Runko-PES-liittymällä.

Välipohja, vanha Runko-PES ratkaisu, ala- ja yläjuoksut 125x50											
Kerros	Rak.osa	D, mm	c	Δs, mm	F, N	E, N/mm ²	l, mm	A, mm ²	Δf, mm	Σ (Δs + Δf)	Summa/kerros
	8 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	4500	14000	2600	18750	0,071	0,98	
											0,98
	7 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	5300	14000	2600	18750	0,084	0,99	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	5300	14000	50	75000	0,0004	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	5300	10500	20	12000	0,001	0,19	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	5300	10500	300	75000	0,003	0,36	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	5300	14000	50	75000	0,0004	0,40	2,65
	6 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	8400	14000	2600	18750	0,133	1,04	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	8400	14000	50	75000	0,0006	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	8400	10500	20	12000	0,002	0,19	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	8400	10500	320	75000	0,005	0,37	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	8400	14000	50	75000	0,0006	0,40	2,70
	5 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	11500	14000	2600	18750	0,182	1,09	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	11500	14000	50	75000	0,0009	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	11500	10500	20	12000	0,003	0,19	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	11500	10500	320	75000	0,007	0,37	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	11500	14000	50	75000	0,0009	0,40	2,76
	4 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	14600	14000	2600	18750	0,231	1,14	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	14600	14000	50	75000	0,0011	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	14600	10500	20	12000	0,004	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	14600	10500	320	75000	0,009	0,37	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	14600	14000	50	75000	0,0011	0,40	2,81
	3 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	17700	14000	2600	18750	0,281	1,19	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	17700	14000	50	75000	0,0013	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	17700	10500	20	12000	0,004	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	17700	10500	320	75000	0,012	0,37	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	17700	14000	50	75000	0,0013	0,40	2,86
	2 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	20800	14000	2600	18750	0,330	1,24	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	20800	14000	50	75000	0,0016	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	20800	10500	20	12000	0,005	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	20800	10500	320	75000	0,014	0,37	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	20800	14000	50	75000	0,0016	0,40	2,91
	1 Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	23900	14000	2600	18750	0,379	1,29	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	23900	14000	50	75000	0,0018	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	23900	10500	20	12000	0,006	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	23900	10500	320	75000	0,016	0,38	2,56
			Sum	18,444				Sum	1,80	20,24	

4 PAINUMISEN VÄHENTÄMINEN

Suurin osa painumista johtuu puutavaran kosteuspitäisyyden muutoksista, kuivumisesta. Erityisesti rakennejärjestelmissä, kuten RunkoPES, joissa liitosten suunnittelussa kiinnitetty huomiota painumien minimoimiseen, puutavaran kosteudenhallinnan osuus painumien vähentämisessä korostuu entisestään. Käytettävän puutavaran tulee olla mahdollisimman lähellä sitä kosteuspitäisyyttä, jossa puutavara tulee olemaan rakennuksen käytön aikana. Toisaalta työmaan kosteudenhallinta tulee järjestää sääsuojauksineen siten, ettei puutavara pääse kastumaan rakentamisen aikana. Suunnittelemalla rakenneosien liitokset siten, että niissä on mahdollisimman vähän puutavaraa, johon kuormitus kohdistuu puun syitä

Tutkimuslaskelma saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



vastaan kohtisuorassa, voidaan vähentää merkittävästi kosteuskutistumia. Lisäksi käyttämällä puutavaraa, jonka kosteuden muodonmuutoskerroin on pienempi kuin sahatavaralla, voidaan pienentää kosteuskutistumia.

Toinen painumaa aiheuttava tekijä on puun kokoonpuristuminen ja viruma (pitkäaikainen kokoonpuristuminen) kuormituksen johdosta. Puun kokoonpuristumaa voidaan pienentää käyttämällä puutavaraa, jonka kimmomoduuli (E) on suurempi tai suurentamalla kuormituksen alaisen puutavaran poikkileikkausala.

Liitettävien rakenneosien mittatarkkuudelle voidaan pienentää liitosten ylimää räisiä rakoja, jotka tiivistyvät asennuksen aikana ja kuormituksen alkaessa.

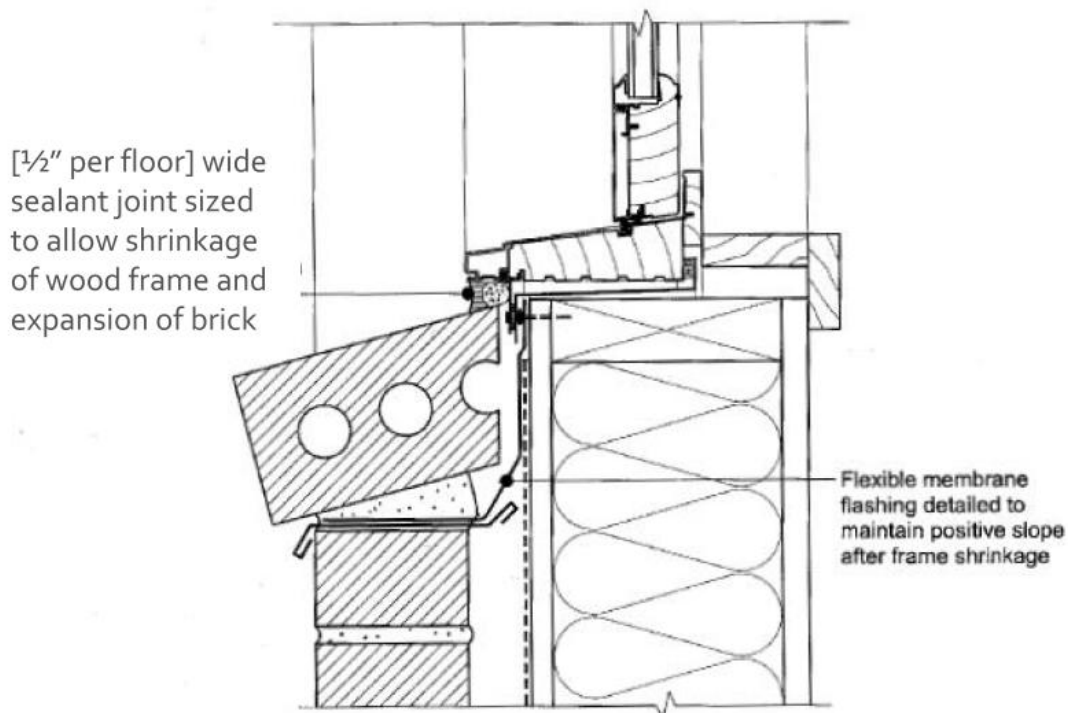
5 RAKENNERATKAISUJA PAINUMISEN HALLITSEMISEEN

Pohjois-Amerikkalaisen rakennusmääräyksen (IPC, 2009) mukaan yli kaksikerroksissa puutaloissa tulee osoittaa, että puurungon painumasta ei aiheudu haittaa rakenteille, LVIS-järjestelmille tai muille liittyvillä rakenneosille.

Rakennuksen painuma voi aiheuttaa haittaa seuraaville kohteille:

- Ulkoverhous (tiiliverhous, rappaus) ikkuna- yms. liittymiseen
- Parvekeliittymät, erilliskannatetut parvekkeet
- Hissi-, porras- ja väestönsuojaliittymät, betoni- tai teräsrakenteiset
- LVIS-järjestelmät, pystysuuntaiset LVIS-asennukset
- Palokatkot

Ulkoverhoukseen tulee jättää painumavarat. Ikkunaliitoksissa tulee varmistua, että pellitysten kaadot ovat seinästä ulospäin myös puurungon painumisen jälkeen. Kuvassa 20 on yksi ikkunaliitosratkaisu (WoodWorks, 2013). Erityistä huomiota tulee kiinnittää tiiliverhotun puukerrostalon painumaan, koska tiilimuuraus laajenee ja puurunko kutistuu ja suhteellinen painumaero voi olla huomattavan suuri. Lisää periaatteellisia ratkaisuja painuman ottamisesta huomioon detaljien suunnittelussa on esitetty Iso-Britannialaisessa raportissa (UKTFA, 2008).



Kuva 20. Tiiliverhotun ulkoseinän ikkunaliittymä, joka sallii puurungon painuman.

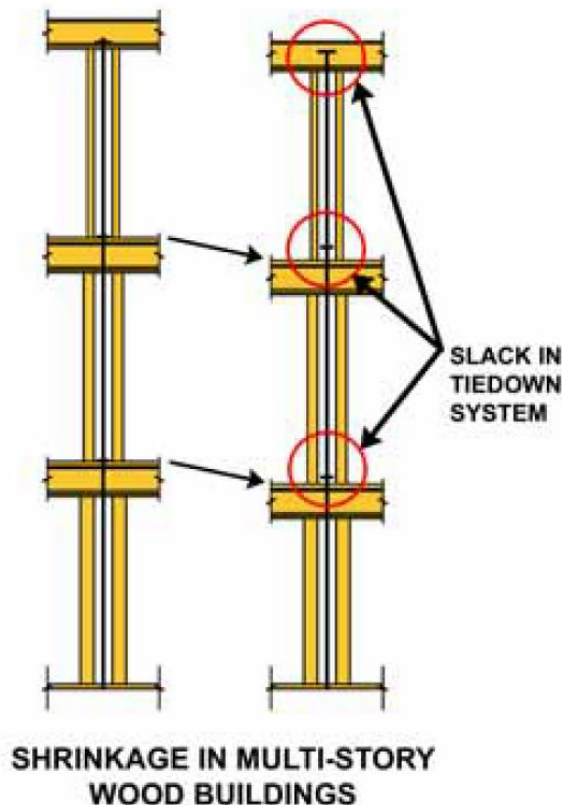
Jos poistumistien muodostava hissi tai porras on painumaton betoni- tai teräsrakenteinen, puurungon ja painumattoman osan liittymä tulee suunnitella siten, että painuminen on mahdollista. Kynnyksen yhteyteen tarvitaan jossakin tapauksessa tasoeron hoitamiseksi luiska.

Pystysuuntaisissa LVIS-asennuksissa putkien kiinnitys tulee tehdä siten, että kiinnitys sallii puurungon painuman ilman, että putket rikkoontuvat. Kuvassa 21 on kaksia viemäriiliitosratkaisua, jotka sallivat puurungon painuman (WoodWorks, 2013).



Kuva 21. Viemäriliitoksia, jotka sallivat puunگون painuman.

Painumaa voidaan hallita myös mekaanisilla rakennuksen ankkurointijärjestelmillä (rod tie-down), joissa on erityinen painumaa kompensoiva osa. Esimerkki rakennuksen ankkurointijärjestelmästä, jossa on kutistuman kompensointiosa, on esitetty kuvassa 22 (Ghosh, 2006).



SHRINKAGE COMPENSATING
DEVICE

Kuva 22. Esimerkki rakennuksen ankkurointijärjestelmästä, jossa on kutistuman kompensointiosa.

6 YHTEENVETO

Kaikissa puurakenteissa tapahtuu jonkin verran painumaa, samoin tapahtuu myös esimerkiksi betonirakenteissa kosteuskutistumaa. Painumaa puurakenteissa aiheuttavat muutoksista johtuva kutistuma kosteuspitoisuuden pienentyessä (tai laajeneminen kosteuspitoisuuden kasvaessa), kuormituksesta aiheutuva puun kokoonpuristuminen, puun virumasta pitkäaikaisen kuormituksen johdosta aiheutuva kokoonpuristuminen sekä liitoksissa olevien mahdollisten välien tiivistyminen. Näistä eniten painumaa aiheuttaa yleensä puun kosteuspitoisuuden muutoksista johtuva kutistuma.

Puun kosteuspitoisuuden muutoksista aiheutuva puun kutistuminen (tai laajeneminen) on suurinta puun syitä kohtisuoraan suuntaan. Kosteuskutistumaan voidaan vähentää käyttämällä puutavaraa, jonka kosteuspitoisuus on mahdollisimman lähellä käyttötilan kosteuspitoisuutta. Lisäksi työmaan kosteudenhallintaan tulee kiinnittää huomiota, etteivät puurakenteet pääse



kastumaan rakentamisen aikana. Toisaalta kutistumaa voidaan vähentää minimoimalla rakenteessa ja liitoksessa puutavara, johon kuormitus kohdistuu puun syitä vastaan kohtisuoraan. Liitoksen kohtiin, joissa kuormitus kohdistuu puun syitä vastaan kohtisuoraan, voidaan käyttää myös puutavaraa, jolla on pienempi kosteudenmuutoskerroin, kuten LVL (kertopuu).

Yli 3-kerroksisen puukerrostalon painumat tulee ottaa huomioon suunnittelussa, kun kosteuden muutos on vähintään 4%. Lisäksi puukerrostalojen painumalaskelmissa tulee ottaa huomioon myös puun syiden suuntainen kosteuspitoisuuden muutoksista johtuva kutistuma, esimerkiksi runkotolpissa.

Suurin osa rakenteiden painumista, sekä kosteuskutistumisesta että kuormituksesta aiheutuvasta kokoonpuristumisesta tapahtuu ensimmäisen vuoden aikana rakentamisesta, kosteuskutistuminen jo ensimmäisen lämmityskauden aikana. Puun kosteuspitoisuus muuttuu vuodenajan mukaan merkittävästi, joka vaikuttaa myös rakenteiden painumaan. Ruotsalaisissa tutkimuksissa on mitattu painuman vuodenaikaisvaihtelua $\pm 2\text{mm}$ eli melkein 10% maksimipainumasta.

Perinteisellä Platform-tekniikalla toteutetussa rakennuksessa painumat ovat suhteellisen suuret, rakenteissa ja liitoksissa tulee varautua 5...10 mm painumiin kerrosta kohti.

Pilari-palkkijärjestelmässä painumat ovat yleensä pieniä, koska pystykuormat välittyvät yhtämittaisia pilareita pitkin suoraan perustuksille ja rakennusten välipohjissa ei ole kuormaa välittäviä liitoksia tai poikittaista puuta. Pilari-palkkirunkoisen puukerrostalon laskennallisena painumana voidaan käyttää arvoa 1 mm/ kerros.

Massiivirakenteisilla kantavilla seinillä (CLT) toteutetussa rakennuksen painumat ovat pienemmät, koska CLT-levyissä on ristikkäisiä levyjä ja yleensä levyt liitetään toisiinsa. Toisaalta asennettavien CLT-elementtien kosteuspitoisuus on suhteellisen alhainen (8...10%). Kirjallisuuden mukaan sekä kosteuden aiheuttamat kutistumat että pitkäaikainen viruma ovat levyn suunnassa erittäin pienet. Kosteuden aiheuttama kutistuma levyä vastaan kohtisuoraan on noin 2% ja viruma noin 1%.

RunkoPES järjestelmässä rakenneosien liitoksia on pyritty kehittämään siten, että rakennuksen painumat olisivat pienemmät. Keskeisintä välipohjaliitoksessa on, että välipohjapalkit, jotka siirtävät kuormia välipohjilta kantaville ulkoseinille ovat LVL-puuta (Kerto-Q), jonka kosteuden muutoskerroin (0,0003) on huomattavasti pienempi kuin sahatavaran (0,002). Laskelmien mukaan 8-kerroksisen RunkoPES-järjestelmällä toteutetun puukerrostalon painumat ovat noin 2 mm kerrosta kohti.

Taulukossa 4 on esitetty painuman suuruusluokka eri rakennejärjestelmillä, kerrosta kohti.



Taulukko 4. Puukerrostalon painuman suuruusluokka eri rakennejärjestelmillä, kerrosta kohti.

Rakennejärjestelmä	Painuman suuruusluokka, enintään kerrosta kohti, mm
Platform	5...10 mm
Pilari-palkki-järjestelmä	1...1,5 mm
Kantava massiivipuurakenne, CLT	1,5... 2 mm
Runko-PES	1,5...2 mm

Rakennuksen painuma tulee ottaa huomioon suunniteltaessa seuraavia kohteita:

- Ulkoverhous (erityisesti jos tiiliverhous tai rappaus) ikkuna- yms. liittymiseen
- Parvekeliittymät, erilliskannatetut parvekkeet
- Hissi-, porras- ja väestönsuojaliittymät, betoni- tai teräsrakenteiset
- LVIS-järjestelmät, pystysuuntaiset LVIS-asennukset
- Palokatkot



LÄHTEET

Milner, Martin. Structural engineering issues with multi storey timber frame. 13th international Holzbau-forum. 2007.

GIB. Design essentials for controlling movement induced stresses in building materials. Windstone Wallboards, continuing education series, December 2009.

Canadian wood council, FPInnovations. Vertical movement in wood platform frame structures: basics.

George Amundson. Shrinkage in wood-framed construction. www.a-p.com

Kevin Cheung. 2009. Multistory Wood-Frame Construction. Technical Abstract. Wood design & building – Fall 2009. Western Wood Products Association.

Skulsky. A. 2008. Multi-level wood-framed structures. Requirements for buildings beyond four stories. Scoping review 2008. Ministry of forest and range, British Columbia.

Silva, C. V. et al. 2013. A project contribution to the development of sustainable multi-storey timber buildings. Chapter 5: Innovation construction systems, in SB 13 Portugal.

Rudus, 2010. INFO 1/2010, Rudus Oy:n asiakastiedote, toukokuu 2010

Pentti, M., & Haukijärvi, M. 2000. Betonijulkisivujen saumausten suunnittelu ja laadunvarmistus. TTKK, Rakennustekniikka Julkaisu 100. 2. täydennetty painos.

WWPA. 2002. Shrinkage calculations for multistory wood frame construction. Tech notes, report no. 10, November 2002. Western wood products association (WWPA).

Canadian wood council. FPInnovations. Vertical movement in wood platform frame structures: movement prediction.

Engelmark. H. 2005. Stabilisering av höga trähus – konsept och försjukningskontroll. Luleå tekniska universitet.



Salonen, H. 2012. Puukerrostalon suunnittelu eurokoodeilla. Eurokoodiseminaari 2012, Hanasaaren Kulttuurikeskus 31.10.2012.

Kryssi, E. 2013. Puukerrostalo. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikka. Diplomityö.

Viljakainen, M. 2005. Avoin puurakennusjärjestelmä – suunnitteluperusteet. Woodfocus.

Grantham, R. , Enjily V. Differential movement between the brick cladding and timber frame of the TF2000 building. Center for Timber Technology and Construction (CTTC), Building Research Establishment (BRE).

Van De Kuilen J.W.G., et al. 2011. Very tall wooden buildings with CLT. Procedia Engineering 14 (2011), 1621-1628. Elsevier.

Binderholz. 8-storey timber building, Bad Aibling I D.

Handbook 1. 2008. Timber structures. Educational material for designing and testing of timber structures. Leonardo da Vinci pilot project.

Tall timber buildings. Applications of solid timber construction in multistorey buildings. The Stadthaus, Hoxton, London, Techniker, bulletin.

Green, M. 2012. The Case for Tall Wood Buildings - How Mass Timber Offers a Safe, Economical, and Environmentally Friendly Alternative for Tall Building Structures. MGB Architecture + Design Equilibrium Consultin.

Meleki, et al. 2011. Differential movements in a timber multi-storey hybrid buildings. Procedia Engineering 14 (2011). Elsevier.

Jordow N.& P. Enockson. 1996. Fuktrörelser och deformationer i stamsystem av trä. Lund tekniska universitet.

Serrano. E. 2009. Uppföljnings- och dokumentationsprojektet Limnologen - Översikt och delprojektrapporter i sammanfattning. Växjö universitet.

Serrano, E. et al. 2012. Mätningar av deformationer i massivträstomme. Kvarteret Limnologen i Växjö. Linneuniversitet.



Zeng, X. et al. 2009. Vertical Displacements in a Medium-rise Timber Building — Limnologen in Växjö. Växjö University, Department of Technology and Design. Thesis no: TD 061/2009.

MetsäWood. 2012. Kerto-käsikirja, luku kosteuseläminen.
(<http://www.metsawood.com/fi/tuotteet/kerto/Pages/Kerto-kasikirja.aspx>)

International Building Code IPC. 2009. International Code Council.

WoodWorks. 2013. Multi-storey wood frame structures- how to build bigger and taller. Woodworks / wood product council, CA. www.woodworks.org

UKTFA. 2008. Differential Movement in Platform Timber Frame. UKTFA (UK timber Frame Association) Special Project, May 2008.

Ghosh, M. 2006. Multi-Story Light-Frame Construction – Understanding Continuous Tiedown Systems. Printed in Structure magazine, June 2006.



LIITTEET

Liite 1 Runko-PES-liittymän painumalaskelmia



Tampereella 31.3.2015

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan laitos

Rakennetekniikka

Virpi Leivo

Tutkija

dipl.ins.

Matti Pentti

Professori

tekn. toht.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



LIITE 1: Runko-PES-liittymän painumalaskelmia



Välipohja, normaali kosteusmuodonmuutos (sahatavara -7%, kertopuu -4%)											
Kerros	Rak.osa	D, mm	c	Δs, mm	F, N	E, N/mm ²	l, mm	A, mm ²	Δf, mm	Σ (Δs + Δf)	Summa/kerros
8	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	4500	14000	2600	18750	0,071	0,98	
											0,98
7	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	5300	14000	2600	18750	0,084	0,99	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	5300	10500	20	12000	0,001	0,19	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	5300	10500	300	75000	0,003	0,36	1,55
6	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	8400	14000	2600	18750	0,133	1,04	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	8400	10500	20	12000	0,002	0,19	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	8400	10500	320	75000	0,005	0,37	1,60
5	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	11500	14000	2600	18750	0,182	1,09	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	11500	10500	20	12000	0,003	0,19	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	11500	10500	320	75000	0,007	0,37	1,65
4	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	14600	14000	2600	18750	0,231	1,14	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	14600	10500	20	12000	0,004	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	14600	10500	320	75000	0,009	0,37	1,71
3	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	17700	14000	2600	18750	0,281	1,19	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	17700	10500	20	12000	0,004	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	17700	10500	320	75000	0,012	0,37	1,76
2	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	20800	14000	2600	18750	0,330	1,24	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	20800	10500	20	12000	0,005	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	20800	10500	320	75000	0,014	0,37	1,81
1	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	23900	14000	2600	18750	0,379	1,29	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	23900	10500	20	12000	0,006	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	23900	10500	320	75000	0,016	0,38	1,86
			Sum	11,144				Sum	1,78	12,93	

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

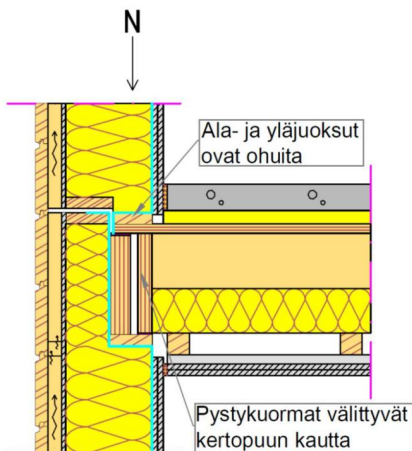


Väliä, suuri kosteusmuodonmuutos (sahatavara -10%, kertopuu -7%)											
Kerros	Rak.osa	D, mm	c	Δs , mm	F, N	E, N/mm ²	l, mm	A, mm ²	Δf , mm	$\Sigma (\Delta s + \Delta f)$	Summa/kerros
8	Runkotolppa	2600	0,00005	1,3	4500	14000	2600	18750	0,071	1,37	
											1,37
7	Runkotolppa	2600	0,00005	1,3	5300	14000	2600	18750	0,084	1,38	
	LVL-levy	20	0,0024	0,336	5300	10500	20	12000	0,001	0,34	
	VP-palkki	300	0,0003	0,63	5300	10500	300	75000	0,003	0,63	2,35
6	Runkotolppa	2600	0,00005	1,3	8100	14000	2600	18750	0,128	1,43	
	LVL-levy	20	0,0024	0,336	8100	10500	20	12000	0,002	0,34	
	VP-palkki	300	0,0003	0,63	8100	10500	320	75000	0,005	0,64	2,40
5	Runkotolppa	2600	0,00005	1,3	10900	14000	2600	18750	0,173	1,47	
	LVL-levy	20	0,0024	0,336	10900	10500	20	12000	0,003	0,34	
	VP-palkki	300	0,0003	0,63	10900	10500	320	75000	0,007	0,64	2,45
4	Runkotolppa	2600	0,00005	1,3	13700	14000	2600	18750	0,217	1,52	
	LVL-levy	20	0,0024	0,336	13700	10500	20	12000	0,003	0,34	
	VP-palkki	300	0,0003	0,63	13700	10500	320	75000	0,009	0,64	2,50
3	Runkotolppa	2600	0,00005	1,3	16500	14000	2600	18750	0,261	1,56	
	LVL-levy	20	0,0024	0,336	16500	10500	20	12000	0,004	0,34	
	VP-palkki	300	0,0003	0,63	16500	10500	320	75000	0,011	0,64	2,54
2	Runkotolppa	2600	0,00005	1,3	19300	14000	2600	18750	0,306	1,61	
	LVL-levy	20	0,0024	0,336	19300	10500	20	12000	0,005	0,34	
	VP-palkki	300	0,0003	0,63	19300	10500	320	75000	0,013	0,64	2,59
1	Runkotolppa	2600	0,00005	1,3	22100	14000	2600	18750	0,350	1,65	
	LVL-levy	20	0,0024	0,336	22100	10500	20	12000	0,006	0,34	
	VP-palkki	300	0,0003	0,63	22100	10500	320	75000	0,014	0,64	2,64
			Sum	17,162				Sum	1,68	18,84	

Tutkimuslaskelma saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



Välipohja, vanha Runko-PES ratkaisu, ala- ja yläjuoksut 125x50											
Kerros	Rak.osa	D, mm	c	Δs , mm	F, N	E, N/mm ²	l, mm	A, mm ²	Δf , mm	$\Sigma (\Delta s + \Delta f)$	Summa/kerros
8	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	4500	14000	2600	18750	0,071	0,98	0,98
7	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	5300	14000	2600	18750	0,084	0,99	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	5300	14000	50	75000	0,0004	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	5300	10500	20	12000	0,001	0,19	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	5300	10500	300	75000	0,003	0,36	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	5300	14000	50	75000	0,0004	0,40	2,65
6	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	8400	14000	2600	18750	0,133	1,04	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	8400	14000	50	75000	0,0006	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	8400	10500	20	12000	0,002	0,19	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	8400	10500	320	75000	0,005	0,37	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	8400	14000	50	75000	0,0006	0,40	2,70
5	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	11500	14000	2600	18750	0,182	1,09	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	11500	14000	50	75000	0,0009	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	11500	10500	20	12000	0,003	0,19	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	11500	10500	320	75000	0,007	0,37	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	11500	14000	50	75000	0,0009	0,40	2,76
4	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	14600	14000	2600	18750	0,231	1,14	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	14600	14000	50	75000	0,0011	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	14600	10500	20	12000	0,004	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	14600	10500	320	75000	0,009	0,37	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	14600	14000	50	75000	0,0011	0,40	2,81
3	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	17700	14000	2600	18750	0,281	1,19	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	17700	14000	50	75000	0,0013	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	17700	10500	20	12000	0,004	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	17700	10500	320	75000	0,012	0,37	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	17700	14000	50	75000	0,0013	0,40	2,86
2	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	20800	14000	2600	18750	0,330	1,24	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	20800	14000	50	75000	0,0016	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	20800	10500	20	12000	0,005	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	20800	10500	320	75000	0,014	0,37	
	yläjuoksu	50	0,002	0,4	20800	14000	50	75000	0,0016	0,40	2,91
1	Runkotolppa	2600	0,00005	0,91	23900	14000	2600	18750	0,379	1,29	
	alajuoksu	50	0,002	0,7	23900	14000	50	75000	0,0018	0,70	
	LVL-levy	20	0,0024	0,192	23900	10500	20	12000	0,006	0,20	
	VP-palkki	300	0,0003	0,36	23900	10500	320	75000	0,016	0,38	2,56
			Sum	18,444				Sum	1,80	20,24	



Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.