

Saimaan ammattikorkeakoulu  
Tekniikka Lappeenranta  
Rakennustekniikka  
Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Petri Tojkander

# **PUUKERROSTALON MUODONMUUTOKSET**

Opinnäytetyö 2011

## TIIVISTELMÄ

Petri Tojkander

Puukerrostalon muodonmuutokset, 53 sivua, 2 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu, Lappeenranta

Tekniikka, Rakennustekniikka

Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö, 2011

Ohjaajat: Lehtori Timo Lehtoviita Saimaan ammattikorkeakoulu, Ins. Harri Moilanen Insinööri-toimisto Puolanne Finnmap Consulting Oy

Työn tavoitteena on tutkia PuuERA-rakennejärjestelmän ja platform-rakennejärjestelmän painumia. Esimerkkikohteena on Heinolassa vuonna 2011 valmistuva puukerrostalo, jossa käytetään PuuERA-rakennejärjestelmää. Työn teoriaosassa käydään läpi kosteuden, lämmön ja kuormitusten aiheuttamia muodonmuutoksia rakenteissa. Pääpaino on kokonaispainuman tarkastelussa. Kerrostalon painumia lasketaan kahdesta eri kohdasta rakennusta erillisen laskentapohjan avulla, joka on tehty työn apuvälineeksi. PuuERA-rakennejärjestelmää on ollut kehittämässä Finnmap Consulting Oy:n Lahden yksikkö Insinööri-toimisto Puolanne, Versowood, Rakennusliike Reponen Oy ja Koskisen taloteollisuus.

Puu on anisotrooppinen materiaali eli sillä on erilaiset ominaisuudet syyn, tangentin ja säteen suunnassa. Kosteuden aiheuttamat suurimmat muutokset tapahtuvat tangentin suunnassa ja pienimmät syyn suunnassa. Tangentin suunnassa tapahtuva liike on 20-kertainen syyn suuntaan nähden ja kaksinkertainen säteen suuntaan nähden. Lämpölaajeneminen on suurin piirtein sama tangentin ja säteen suunnassa, tangentin suunnan ollessa hieman suurempi. Tangentin ja säteen suunnan muodonmuutos on noin 10-kertainen syyn suuntaan nähden. Puristuman kimmokertoimien arvot ovat syyn suuntaan noin 30 kertaa suuremmat kuin kohtisuoraan syitä vastaan.

Platform-rakennejärjestelmässä painumat ovat noin neljä kertaa suuremmat kuin PuuERA-tekniikalla rakennetun rakennuksen. Platform-rakennuksen painumat olivat suuria, mutta ne olivat tasaisia ja niihin pystytään helposti suunnittelussa varautumaan. Vaikka PuuERA-rakennejärjestelmässä kokonaispainuma on pieni, voi kerrostasoissa ilmetä epätasaista painumaa, joka voi haitata rakennuksen tiiveyttä. Todellisen painuman aiheuttamat ongelmat tulevat julki vasta noin kolmen vuoden jälkeen rakennuksen valmistumisesta, kun puu on kuivunut ja viruma alkanut. PuuERA-rakennejärjestelmän jatkokehityksessä voisi ottaa huomioon mahdolliset muodostuvat painumat.

Asiasanat: kosteusliike, lämpölaajeneminen, viruma, puukerrostalo

## ABSTRACT

Petri Tojkander

Transformations of multi-storey wood-frame building, 53 pages, 2 appendices

Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta

Technology, Civil and Construction Engineering

Specialisation of Structural Engineering

Bachelor's Thesis, 2011

Instructors: Lecturer Timo Lehtoviita Saimaa University of , Engineer Harri Moilanen Insinööritoimisto Puolanne Finnmap Consulting Oy

The purpose of this thesis was to estimate the shrinkage that will occur in a multi-storey wood-frame wall. More specifically it compares shrinkage in the platform-building system and PuuERA-building system. The multi-storey building in Heinola will work as an example in this thesis.

Wood is an anisotropic material, so it has different properties in grain direction, radius direction and tangential direction. Moisture causes the biggest dimensional change in tangential direction and the smallest in grain direction. Tangential direction changes in dimensions are 20 times bigger than in grain direction and two times bigger than in radial direction. Thermal expansion is about the same in tangential and radial direction. In tangential and radial direction, thermal expansion is ten times bigger than in grain direction. Shrinkage at pressure is about 30 times bigger in tangential and radial direction than in grain direction. These are the main causes for changes in dimension in wood structures.

In the platform-building system shrinkage is four times bigger than in PuuERA-building system. Shrinkage in platform-building system is bigger, but it is more even in one level than in PuuERA-building system. Even though shrinkage in PuuERA-building system is small, uneven shrinkage might appear in levels. Real shrinkage will occur in three to four years after the building has been completed. PuuERA-building system could be developed and researched more, before using it more widely.

Keyword: moisture movement, thermal expansion, creep, multi-storey wood-frame

## SISÄLLYS

KÄSITTEET .....	5
MERKIT .....	6
1 JOHDANTO.....	7
2 PUU MATERIAALINA.....	8
2.1 Kosteusliikkeet.....	13
2.1.1 Tangentin suuntainen liike.....	14
2.1.2 Säteen suuntainen liike .....	17
2.1.3 Syyn suuntainen liike.....	18
2.1.4 Viilupuun kosteusmuodonmuutokset.....	18
2.2 Kosteuden muutos tehtaalta rakennukselle .....	19
2.3 Kausittainen kosteudenvaihtelu .....	19
2.4 Lämpölaajeneminen .....	20
2.5 Ajan myötä tapahtuva muodonmuutos.....	22
2.6 Kosteuskäyristyminen.....	24
2.7 Voiman aiheuttama muodonmuutos .....	25
2.8 Kosteuspitoisuuden muutoksen aiheuttamat jännitykset.....	25
3 EUROKOODI.....	28
3.1 Kosteuden ja kuormituksen keston vaikutus lujuuteen .....	28
3.2 Viruman huomioon ottaminen .....	29
3.3 Muodonmuutokset .....	30
3.4 Halkeamat.....	31
4 RAKENNEJÄRJESTELMIEN VERTAILU.....	32
4.1 Platform-rakenne .....	32
4.1.1 Rakentamisen periaate.....	32
4.1.2 Detaljit ja ongelmakohdat .....	34
4.1.3 Rakennuksen kokonaistarkastelu .....	35
4.2 PuuERA-rakennearjestelmä.....	37
4.2.1 Rakentamistapa .....	37
4.2.2 Detaljit ja ongelmakohdat .....	38
4.2.3 Rakennuksen kokonaistarkastelu.....	40
5 MUODONMUUTOSTEN LASKENTA.....	41
5.1 Tulokset .....	44
5.2 Tulosten vaikutukset rakennukseen.....	47
6 PÄÄTELMÄT .....	47
KUVAT .....	50
TAULUKOT.....	51
KAAVAT.....	51
LÄHTEET .....	52

### LIITTEET

Liite 1 Dof-lämpö-laskelma (tammi-joulukuu)

Liite 2 Painumaesimerkki-laskelma (1. krs)

## KÄSITTEET

<i>adsorptio</i>	tarkoittaa, että puun kosteuspitoisuus nousee, eli puuhun imeytyy kosteutta ilmasta
<i>anisotropia</i>	tarkoittaa tarkastelusuunnan vaikutusta mitattavan suureen arvoon
<i>desorptio</i>	tarkoittaa, että puun kosteuspitoisuus laskee, eli puusta haihtuu kosteutta ilmaan
<i>hystereesi</i>	kuvaa suureen muuttumisen viivästymistä niin, että hetkellinen suureen arvo ei riipu vain tällöin vaikuttavista tekijöistä, vaan myös suureen aikaisemmasta kehityksestä
<i>kosteusliike</i>	on kosteuspitoisuuden vaihtelun aiheuttama muodonmuutos
<i>kosteuspitoisuus</i>	ilmoittaa vedenmassan osuutena uunikuivasta materiaalin massasta
<i>kosteusvaihtelu</i>	on kosteuspitoisuuden vaihtelu kuivan ja kostean välillä
<i>kyllästymispiste</i>	tarkoittaa maksimaalista kosteuspitoisuutta, jonka puu voi saavuttaa vesihöyrystä
<i>käyttöluokka</i>	on Eurokoodin määrittelemä luokitus, joka ottaa huomioon kosteuden vaikutuksen materiaalin lujuuteen
<i>rakennekosteus</i>	ilmoittaa rakenteessa olevan kosteuden
<i>säteen suunta</i>	tarkoittaa puun poikkileikkauksen vuosirenkaiden säteen osoittamaa suuntaa
<i>tangentin suunta</i>	tarkoittaa puun poikkileikkauksen vuosirenkaiden tangentin osoittamaa suuntaa
<i>tasapainokosteus</i>	tarkoittaa, että puun kosteuspitoisuus on tasapainossa ympäröivän ilman kosteuteen, eli ympäröivän ilman kosteutta ei tule lisää eikä poistu puusta
<i>viskoelastisuus</i>	tarkoittaa, että materiaali toimii Hooken aineen ja Newtoniin nesteeseen kombinaationa, jolloin muodonmuutos tapahtuu aikaviiveellä

## MERKIT

$A$  = pinta-ala

$C_R$  = kosteuden aiheuttaman muodonmuutoksen kerroin säteen suunnassa

$C_T$  = kosteuden aiheuttaman muodonmuutoksen kerroin tangentin suunnassa

$D_R$  = säteen suuntainen mitta

$D_T$  = tangentin suuntainen mitta

$E_d$  = kimmomoduulin suunnitteluarvo (Eurokoodi)

$E_k$  = kimmomoduulin ominaisarvo (Eurokoodi)

$EMC(\%)$  = tasapainokosteus

$F$  = normaalivoima

$K$  = lämpötilasta riippuva puuntasapainokosteuteen liittyvä kerroin

$K_1$  = lämpötilasta riippuva puuntasapainokosteuteen liittyvä kerroin

$K_2$  = lämpötilasta riippuva puuntasapainokosteuteen liittyvä kerroin

$M_F$  = lopputilanteen kosteuspitoisuus

$M_I$  = alkutilanteen kosteuspitoisuus

$S_I$  = kokonaismuodonmuutosprosentti kyseisessä suunnassa

$W$  = lämpötilasta riippuva puuntasapainokosteuteen liittyvä kerroin

$h$  = poikkileikkauksen korkeus

$k$  = hiipumaluku (Eurokoodi)

$k_{mod}$  = huomioi rakenteen käyttöluokan ja kuormitusajan (Eurokoodi)

$k_{def}$  = virumakerroin (Eurokoodi)

$l$  = kappaleen alkuperäinen pituus

$m_g$  = vettä sisältävän puun massa

$m_o$  = täysin kuivan puun massa

$m_v$  = puussa olevan veden massa

$u$  = taipuma/pituuden muutos

$\alpha$  = pituuden lämpölaajenemiskerroin

$\varepsilon$  = suhteellinen muodonmuutos

$\sigma$  = jännitys

$\omega$  = kosteuspitoisuus

$\Delta l$  = pituuden muutos

$\Delta T$  = lämpötilan muutos

$\Psi_{2.1}$  = kuormien yhdistelykerroin (Eurokoodi)

# 1 JOHDANTO

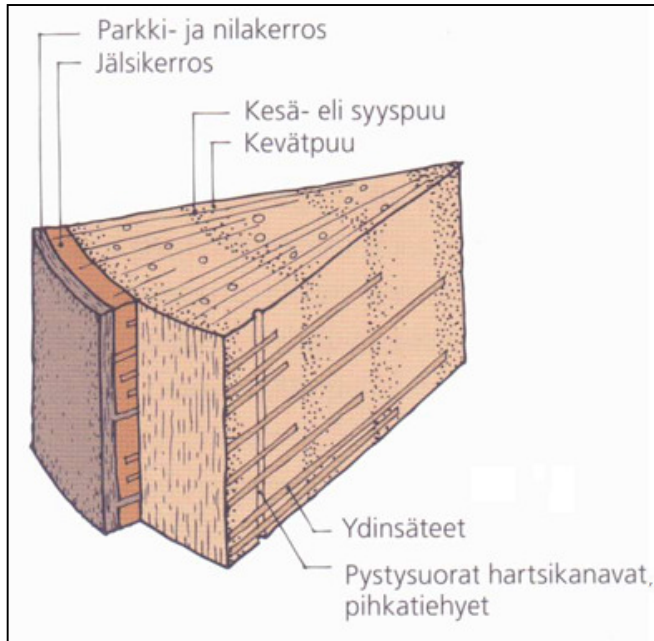
Suomessa puukerrostalorakentamisen tarjonta on yleistymässä muun muassa viranomaismääräysten muututtua ja ympäristöarvojen nousun takia. Puurakentamisen kiinnostuksen lisääntyessä myös uusien rakennejärjestelmien kehitys on voimistunut. Opinnäytetyö keskittyy puussa tapahtuviin muodonmuutoksiin, tarkemmin sanottuna puukerrostalon kosteusliikkeisiin. Työssä käydään läpi myös yhtenä osa-alueena Heinolaan tulevan puukerrostalon muodonmuutoksia kosteuden kannalta. Työn tilaaja on Finnmap Consulting Oy:n Lahden yksikkö Insinööritoimisto Puolanne. Insinööritoimisto Puolanteella on pitkät perinteet puurakentamisesta ja Finnmap Consulting Oy on Suomen suurin rakennesuunnitteluun keskittynyt suunnittelutoimisto. Yhteistyökumppanina rakennejärjestelmän kehityksessä ja rakentamisessa on ollut Versowood, rakennusliike Reponen, Koskisen taloteollisuus, Heinolan kaupunki, Lahden tiede ja yrityspuisto. Heinolan kaupunki toimii rakennuttajana puukerrostalohankkeessa. Tulevan asunto-osakeyhtiön nimi on As Oy Heinolan PuumERA.

Opinnäytetyön tavoitteena on vertailla uutta rakennejärjestelmää platform-rakennejärjestelmään. Vertailukohteina käytetään painumista. Tarkastelukohteina ovat kosteuden aiheuttama kuivumiskutistuminen ja kuormituksen aiheuttaman kokoonpuristuvuus. Laskettujen painumien jälkeen on tarkoitus myös vertailla painumien aiheuttamia mahdollisia ongelmia ja ongelmakohtia. Suurimman hyödyn saamiseksi detaljeja ja ongelmakohtia katsotaan kriittisesti. Näin rakennejärjestelmä voisi kehittyä.

Työ on rajattu käsittelemään ainoastaan Heinolaan rakenteilla olevaa puukerrostaloa ja siinä ilmeneviä muodonmuutoksia. Kuivumisen aiheuttamat jännitykset rajataan myös pois tämän työn tuloksista, vaikka teoriaosiossa kyseistä asiaa käydään läpi.

## 2 PUU MATERIAALINA

Puun runko muodostuu kuoresta (parkki- ja nilakerros), kasvukerroksesta (jälsikerros) ja rungon sisällä olevasta solukosta. Kuvassa 2.1 on nähtävillä leikkaus puusta. Kesäpuu on loppukesällä kasvanut tiheämpi solukko ja kevätpuu keväällä kasvanut harvempi solukko. (Siikanen 2008, 23.)

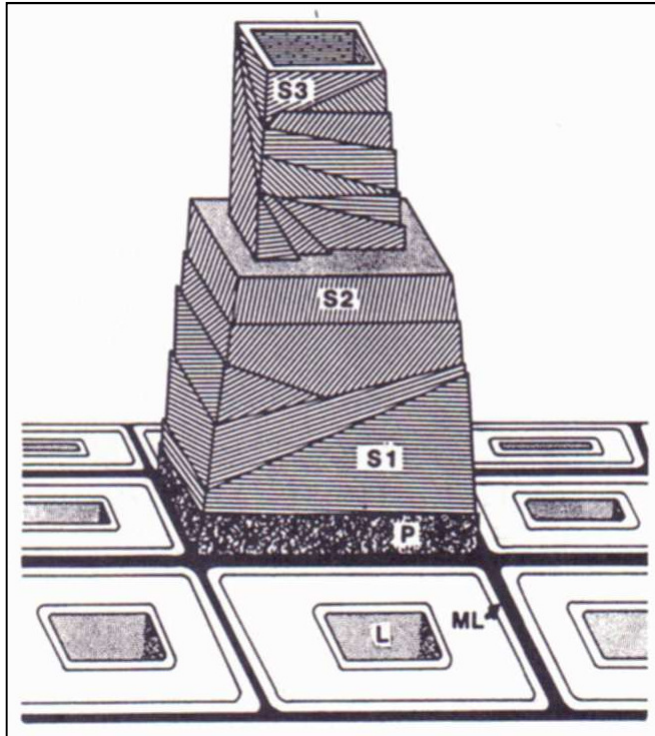


Kuva 2.1 Puun rungon poikkileikkaus (Siikanen 2008, 24).

Havupuiden rakenne koostuu 90–95 -prosenttisesti trakeideista (putkisoluiista), jotka ovat järjestäytyneet säteittäisiin jonoihin. Putkisolut ovat suuntautuneet rungon pituussuunnan mukaan. Ydinsäteet ovat soluja, jotka ovat suuntautuneet säteen suuntaan, eli ne ovat kohtisuorassa suunnassa putkisoluihin nähden. Havupuilla ydinsäteiden osuus puun tilavuudesta on noin 6 prosenttia. Kyseisen solurakenteen johdosta puu on anisotrooppinen, eli sillä on erilaiset ominaisuudet syyn, säteen ja tangentin suunnissa. Putkisolujen päätehtävät ovat puun pitäminen pystyssä ja ravintoaineiden kuljetus rungon suunnassa. Ydinsäteiden tehtävä on kuljettaa ravintoaineita puun sisäosista kasvukerrokseen. (Siikanen 2008, 24-26.)



Solun sisällä olevaa tilaa kutsutaan soluonteloksi. Solujen välillä ei ole tyhjää tilaa, vaan ligniinipitoista (puun luonnollinen liima-aine) massaa oleva välilamelli, joka liittää soluja toisiinsa. Kuvassa 2.2 on esitetty soluseinämän yleiskuvaus.



Kuva 2.2 Puun soluseinämän rakenteen yleiskuvaus: L = soluontelo, ML = keskiseinä, P = primääriseinä ja S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> ovat sekundääriseinämän kerrokset (VTT 1996, A4/4).

Puu on myös hygroskooppinen eli vettä imevä materiaali, joka pystyy sitomaan ympäröivän ilman vesihöyryä. Vesi voi esiintyä puussa soluonteloissa vapaana vetenä nestemäisessä muodossa, soluseinämissä sidottuna vetenä nestemäisessä muodossa tai soluonteloissa ja -seinämissä vesihöyrynä. Alhaisissa lämpötiloissa vesi voi jäättyä soluonteloissa tai soluväleissä, mutta ei soluseinämissä. Soluseinämissä olevaa vettä kutsutaan sidotuksi vedeksi, koska se on kiinnittynyt soluseinämien ainekseen vetysidoksin ja van der Waals'in voimin. Soluonteloissa olevaa vettä kutsutaan vapaaksi vedeksi. (Kärkkäinen 2007, 177.)

Puun syiden kyllästymispiste tarkoittaa sitä maksimaalista kosteuspitoisuutta, jonka puu voi saavuttaa vesihöyrystä jossakin lämpötilassa. Puun soluseinä on tällöin kokonaan kyllästynyt, mutta soluontelot ovat tyhjät vapaasta vedestä. Suuruusluokaltaan syiden kyllästymispiste vastaa 30 prosentin kosteuspitoi-

suutta. Kyllästymispiste vaihtelee puulajeittain 15–40 % välillä. Myös saman puulajin sisäisessä vertailussa ja puun eri osien välillä vaihtelu on suurta. Kosteuspitoisuus ilmoittaa puussa olevan veden massan ja täysin kuivan puun massan suhdetta. Asia on esitetty kaavassa 2.1. (Kärkkäinen 2007, 178.)

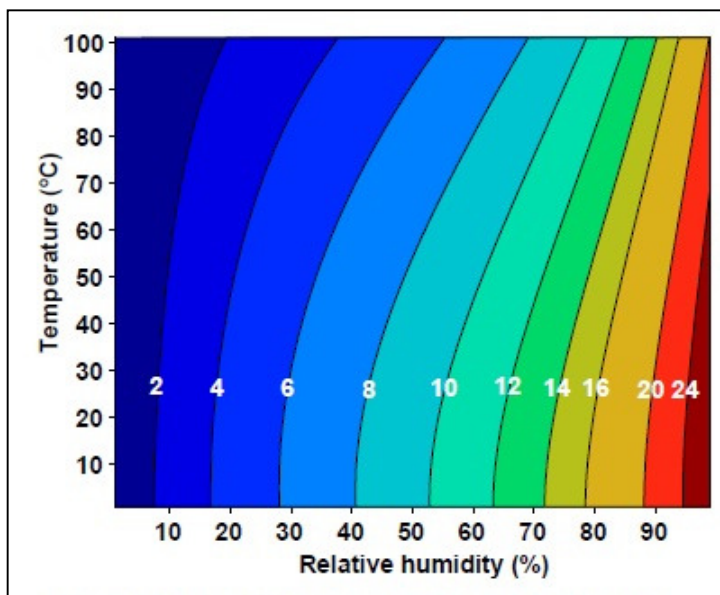
$$\omega = \frac{m_v}{m_o} = \frac{m_g - m_o}{m_o} \quad (2.1)$$

jossa

- $\omega$  = kosteuspitoisuus
- $m_v$  = puussa olevan veden massa
- $m_o$  = täysin kuivan puun massa
- $m_g$  = vettä sisältävän puun massa

*Esimerkki 1: Kosteuspitoisuus, kaava 2.1  
märkäpuu painaa 450 kg/m<sup>3</sup>, puuta kuivataan, jonka jälkeen se painaa enää 400 kg/m<sup>3</sup>. Puun kosteuspitoisuus on tällöin 12,5 %.*

Puun tasapainokosteus tarkoittaa pistettä, jossa puun kosteus ei lisääny eikä vähene. Puun tasapainokosteuden, ilman lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden välillä vallitsee yhteys, joka näkyy kuvassa 2.3 (FPL 2010, 4-3).



Kuva 2.3 Tasapainokosteus prosentteina, ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan (FPL 2010, 4-3).

Yhdysvalloissa tehdyissä tutkimuksissa on selvinnyt, että taulukossa 2.1 näkyviä puun tasapainokosteuden arvoja voidaan käyttää puunlajista välittämättä useimmissa käytännön tapauksissa. Arvot on saatu käyttäen seuraavaa kaavaa 2.2. (FPL 2010, 4-3.)

$$EMC(\%) = \frac{1800}{W} \left[ \frac{Kh}{1-Kh} + \frac{K_1Kh+2K_1K_2K^2h^2}{1+K_1Kh+K_1K_2K^2h^2} \right] \quad (2.2)$$

jossa h on suhteellinen kosteus desimaaleina ja muut muuttujat ovat lämpötilasta riippuvia kertoimia, lämpötilan arvoina käytetään Celsius-asteita:

$$W = 349 + 1,29T + 0,0135T^2$$

$$K = 0,805 + 0,000736T - 0,00000273T^2$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938T - 0,000303T^2$$

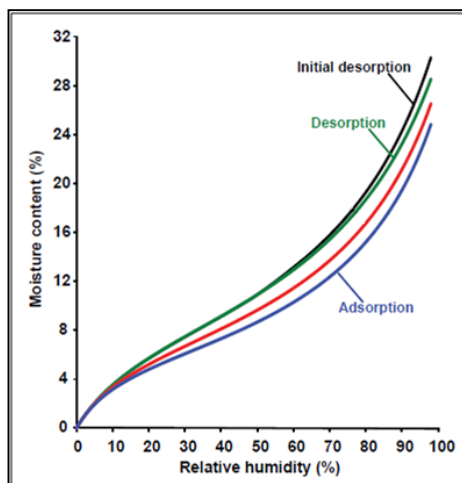
$$K_2 = 1,91 + 0,0407T - 0,000293T^2$$

*Esimerkki 2: Tasapainokosteus, kaava 2.2*  
*Ilman suhteellinen kosteus 80 % ja lämpötila 20 astetta*  
*Vastaukseksi saadaan EMC (%) = 16,04, eli tasapainokosteuspitoisuus on 16 %*

Taulukko 2.1 Puun tasapainokosteudet prosentteina, ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan (FPL 2010, 4-4).

Temperature		Moisture content (%) at various relative humidity values																		
(°C)	(°F)	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
-1.1	(30)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
4.4	(40)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.3	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
10.0	(50)	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3
15.6	(60)	1.3	2.5	3.6	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.6	9.4	10.2	11.1	12.1	13.3	14.6	16.2	18.2	20.7	24.1
21.1	(70)	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11.0	12.0	13.1	14.4	16.0	17.9	20.5	23.9
26.7	(80)	1.3	2.4	3.5	4.4	5.3	6.1	6.8	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.9	14.2	15.7	17.7	20.2	23.6
32.2	(90)	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3
37.8	(100)	1.2	2.3	3.3	4.2	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.6	15.1	17.0	19.5	22.9
43.3	(110)	1.1	2.2	3.2	4.0	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.2	10.0	11.0	12.0	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4
48.9	(120)	1.1	2.1	3.0	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.5	8.2	8.9	9.7	10.6	11.7	12.9	14.4	16.2	18.6	22.0
54.4	(130)	1.0	2.0	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14.0	15.8	18.2	21.5
60.0	(140)	0.9	1.9	2.8	3.6	4.3	5.0	5.7	6.3	7.0	7.7	8.4	9.1	10.0	11.0	12.1	13.6	15.3	17.7	21.0
65.6	(150)	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4
71.1	(160)	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.5	9.3	10.3	11.4	12.7	14.4	16.7	19.9
76.7	(170)	0.7	1.5	2.3	3.0	3.7	4.3	4.9	5.6	6.2	6.8	7.4	8.2	9.0	9.9	11.0	12.3	14.0	16.2	19.3
82.2	(180)	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.6	9.5	10.5	11.8	13.5	15.7	18.7
87.8	(190)	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.1	11.4	13.0	15.1	18.1
93.3	(200)	0.5	1.1	1.7	2.4	3.0	3.5	4.1	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.7	9.7	10.9	12.5	14.6	17.5
98.9	(210)	0.5	1.0	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.3	9.2	10.4	12.0	14.0	16.9
104.4	(220)	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.5	5.0	5.6	6.3	7.0	7.8	8.8	9.9			
110.0	(230)	0.3	0.8	1.2	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	4.2	4.7	5.3	6.0	6.7						
115.6	(240)	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6	3.1	3.5	4.1	4.6								
121.1	(250)	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9										
126.7	(260)	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4												
132.2	(270)	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4													

Puun tasapainokosteuden arvot riippuvat siitä, onko tapahtumassa desorptio vai adsorptio. Kuvassa 2.4 desorption tapahtuessa (puun kuivuessa) kosteuspitoisuus kulkee vihreää käyrää ja adsorption tapahtuessa (puun kostuessa) sinistä käyrää. Toisin sanoen puulla on eri kosteuspitoisuudet samoissa olosuhteissa, riippuen siitä onko puu kuivamassa vai kostumassa. Tätä eroa, jossa aineen ominaisuus riippuu aikaisemmasta tilasta, kutsutaan hystereesiksi. Desorptiossa on aina suurempi puun tasapainokosteus verrattuna adsorptioon, kuten nähdään kuvasta 2.4. (FPL 2010, 4-3.)



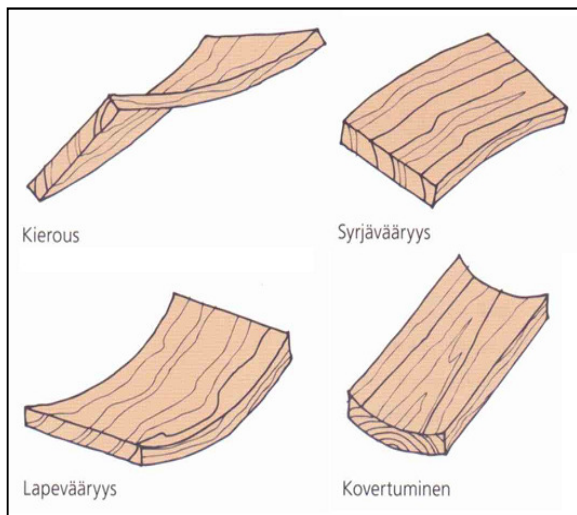
Kuva 2.4 Periaatepiirros adsorption ja desorption kuvaajista (FPL 2010, 4-5). Initial desorption –käyrä ilmoittaa 1. kuivumiskerran tuoreesta kuivaksi.

Adsorption ja desorption erotuksen määrä riippuvat puulajista, ilman suhteellisesta kosteudesta ja ilman lämpötilasta. Hysteeristä johtuen puulla on kaksi erilaista tasapainokosteuden arvoa samoissa olosuhteissa. Tämän takia laskennan helpottamiseksi on yritetty saada vain yksi tasapainokosteuden arvo. Taulukon 2.1 tasapainokosteuden arvot on saatu Pohjois-Amerikassa kasvavalle sitkankuuselle olosuhteissa, joissa ilman kosteuspitoisuutta on sahattu edes takaisin pienillä muutoksilla. Näin saatiin aikaiseksi olosuhteet, jotka ovat adsorption ja desorption puolivälillä, kuvassa 2.4 punainen käyrä. (FPL 2010, 4-4.)

## 2.1 Kosteusliikkeet

Käytännössä useissa tapauksissa puun muodonmuutoksen voidaan ajatella tapahtuvan kyllästymispisteen alapuolella. Kyllästymispisteen yläpuolella ei muodonmuutosta enää aiheudu kosteuden muutoksesta. Puun kostuessa (adsorptio) tapahtuu turpoamista ja kuivussa (desorptio) tapahtuu kutistumista. Todellisuudessa tutkimuksissa on havaittu, että kutistuminen alkaa jo ennen kyllästymispisteen alittamista ja vastaavasti turpoaminen jatkuu kyllästymispisteen yläpuolelle. Kyllästymispisteen yläpuolella tapahtuvat muodonmuutokset ovat hyvin pieniä verrattuna kokonaiskosteusliikkeeseen. (Kärkkäinen 2007, 190.)

Muodonmuutokset aiheutuvat, koska soluseinämän tilavuus laajenee sitoutuneen veden määrän kasvaessa ja vastaavasti pienenee, kun sitoutuneen veden määrä pienenee. Muodonmuutokset, kutistuminen ja turpoaminen tulevat useimmiten näkyviin käyristymisenä ja halkeiluna, joista käyristymisen esimerkkejä on kuvassa 2.5. Kuvassa 2.6 nähdään kuivumisen aiheuttama sisäinen halkeama, joka on aiheutunut keskustan korkeasta kosteudesta ja liian korkeasta kuivauslämpötilasta.



Kuva 2.5 Kuivumisen aiheuttamia muodonmuutoksia (Siikanen 2008, 32).



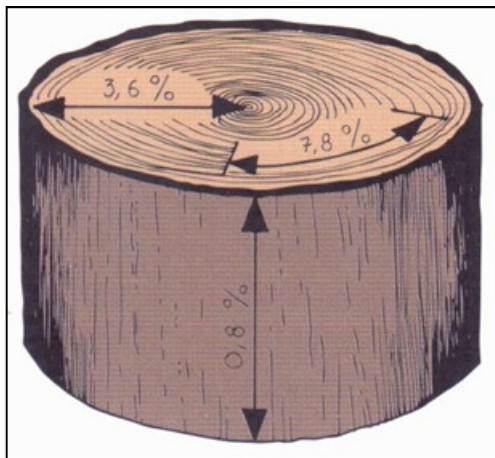
Kuva 2.6 Kuivumisen aiheuttama sisäinen halkeilu (FPL 2010, 13-12).

Kuvan 2.6 halkeilu on vaarallinen ja sitä on vältettävä, koska siinä näkyvä pintakerros on täysin ehjän näköinen, mutta sisältä puu saattaa olla käytännössä koko pituudeltaan halki. Kyseinen halkeamatyyppi pystytään huomaamaan ulträänitekniikkaa apuna käyttäen. (FPL 2010, 13-10.)

Kohdissa 2.1.1–2.1.3 käydään läpi kosteuden aiheuttamien liikkeiden tarkastelua sahatavaralle ja liimapuulle. Kohdassa 2.1.4 käydään läpi viilupuun kosteusliikkeitä.

### 2.1.1 Tangentin suuntainen liike

Puun kosteusliikkeet ovat kaikkein suurimpia tangentin suunnassa. Suomalaisissa lähteissä on esitetty, että kuivattaessa puu kutistuu tangentin suunnassa tuoreesta absoluuttisen kuivaksi puunlajista riippuen keskimäärin 8 % (Liimapuukäsikirja 2007, 195). Kuvassa 2.7 on esitetty puun muodonmuutosprosentit eri suunnissa. Kuvan arvot ovat keskiarvoja, kun puuta kuivataan tuoreesta absoluuttisen kuivaksi.



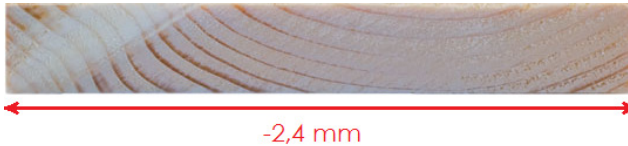
Kuva 2.7 Puun muodonmuutokset kutistumisesta (Siikanen 2008, 44).

Yhdysvaltalaisessa Wood Handbook –oppaassa (FPL) on todettu, että puun kosteuden ollessa 6 %:n ja 14 %:n välillä voidaan tarkasteltavan suunnan muodonmuutos laskea kaavalla 2.3, kun tiedetään tangentin ja säteen suuntaiset kertoimet. Taulukossa 2.2 on osoitettu kertoimia amerikkalaisille puulajeille. (FPL 2010, 13-15.)

$$\Delta D = D_I [C_I (M_F - M_I)] \quad (2.3)$$

Kaavassa  $\Delta D$  muodonmuutoksen suuruus on tarkasteltavan suunnan pituus  $D_I$  kerrottuna muodonmuutuskertoimella  $C_I$  (alaviitteessä R säteelle ja T tangentialle) ja kerrottuna lopputilanteen kosteuden  $M_F$  ja alkutilanteen kosteuden  $M_I$  erotuksella. Taulukossa 2.2 olevat kertoimien  $C_T$  ja  $C_R$  arvot on saatu kokonaistuumisesta. (FPL 2010, 13-15.)

*Esimerkki 3: Puun kutistuminen tangentin suunnassa, kaava 2.3  
Puun kosteusprosentti alussa 14 %, lopussa 9 %,  $C_T = 0,00274$ ,  $D_T = 175$  mm  
Vastaukseksi saadaan  $\Delta D = -2,4$  mm, eli puu kutistuu tangentin suunnassa 2,4 mm*



Taulukko 2.2 Muodonmuutuskertoimia amerikkalaisille puulajeille (FPL 2010, 13-17).

**Table 13-5. Dimensional change coefficients ( $C_R$ , radial;  $C_T$ , tangential) for shrinking or swelling within moisture content limits of 6% to 14%—con.**

Species	Dimensional change coefficient <sup>a</sup>			Dimensional change coefficient <sup>a</sup>	
	$C_R$	$C_T$		$C_R$	$C_T$
Hemlock, eastern	0.00102	0.00237	<b>Spruce, red</b>	<b>0.00130</b>	<b>0.00274</b>
Hemlock, western	0.00144	0.00274	Spruce, white	0.00130	0.00274
Larch, western	0.00155	0.00323	Spruce, Sitka	0.00148	0.00263
			Tamarack	0.00126	0.00259
<b>Imported Woods</b>					
Andiroba, crabwood	0.00137	0.00274	Light red "Philippine mahogany"	0.00126	0.00241
Angelique	0.00180	0.00312	Limba	0.00151	0.00187
Apitong, keruing <sup>b</sup>	0.00243	0.00527	Mahogany <sup>b</sup>	0.00172	0.00238
(all <i>Dipterocarpus</i> spp.)			Meranti	0.00126	0.00289
Avodire	0.00126	0.00226	Obeche	0.00106	0.00183
Balsa	0.00102	0.00267	Okoume	0.00194	0.00212
Banak	0.00158	0.00312	Parana, pine	0.00137	0.00278
Cativo	0.00078	0.00183	Paumarfim	0.00158	0.00312
Cuangare	0.00183	0.00342	Primavera	0.00106	0.00180
Greenheart <sup>b</sup>	0.00390	0.00430	Ramin	0.00133	0.00308
Iroko <sup>b</sup>	0.00153	0.00205	Santa Maria	0.00187	0.00278
Khaya	0.00141	0.00201	Spanish-cedar	0.00141	0.00219
Kokrodua <sup>b</sup>	0.00148	0.00297	Teak <sup>b</sup>	0.00101	0.00186
Lauans: dark red	0.00133	0.00267			
"Philippine mahogany"					

<sup>a</sup>Per 1% change in moisture content, based on dimension at 10% moisture content and a straight-line relationship between moisture content at which shrinkage starts and total shrinkage. (Shrinkage assumed to start at 30% for all species except those indicated by footnote b.)

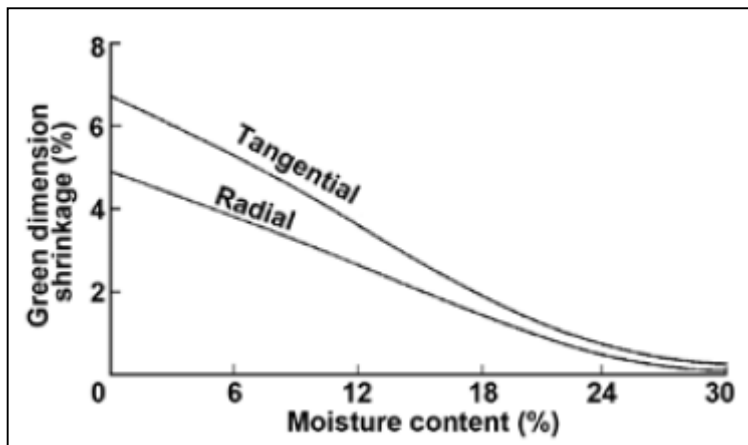
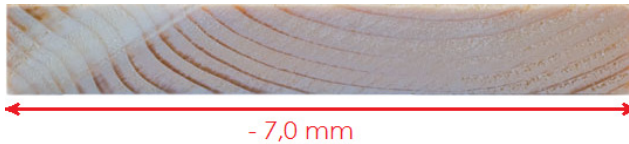
<sup>b</sup>Shrinkage assumed to start at 22% moisture content.

Opinnäytetyön laskelmissa käytetään suomalaiselle kuuselle (siperiankuusi ja euroopankuusi) taulukon 2.2 punakuusen arvoja, koska kyseiset puut kuulut samaan luokkaan V. Kosteuspitoisuuden ollessa 6 %:n ja 14 %:n ulkopuolella, mutta kuitenkin alle soluseinämän kyllästymispisteen, noin 30 %:n, voidaan muodonmuutos laskea kaavalla 2.3 (FPL 2010, 13-17).

$$\Delta D = \frac{D_I(M_F - M_I)}{30(100)^{C_T} / S_I^{-30 + M_I}} \quad (2.4)$$

Kaavan 2.4 muuttujat ovat samoja kuin kaavassa 2.3 lisättyinä valitun suunnan kokonaismuodonmuutosprosentilla  $S_I$ , joka on saatu puun kuivuessa tuoreesta absoluuttisen kuivaksi. Kyseinen kerroin voidaan ottaa kuvasta 2.8 katsottuna kosteuspitoisuuden arvoksi 0 %.

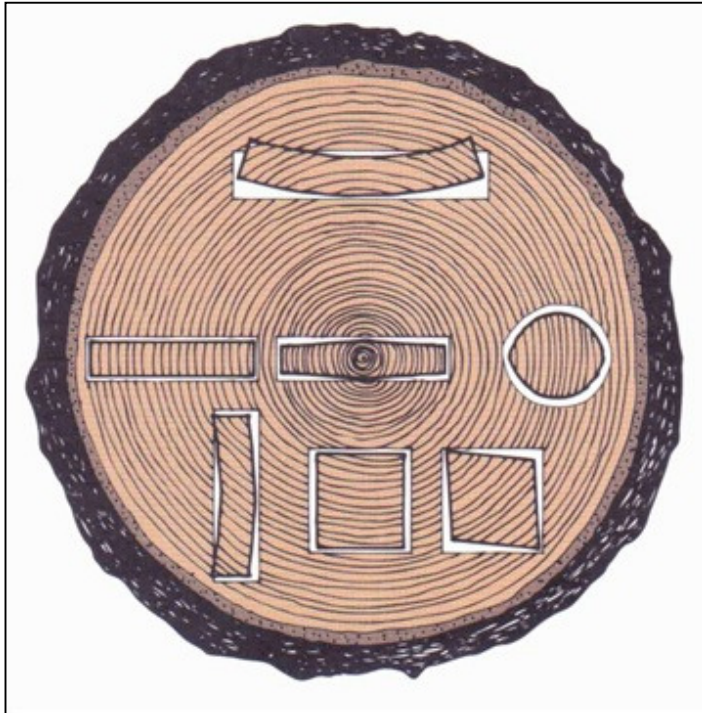
*Esimerkki 4: Puun kutistuminen tangentin suunnassa, kaava 2.4  
Puun kosteuspitoisuus alussa 28 %, lopussa 11 %,  $C_T = 0,00274$ ,  
 $D_T = 175$  mm,  $S_T = 7$ . Vastaukseksi tulee  $\Delta D = -7,0$  mm, eli puu kutistuu tangentin suunnassa 7 mm.*



Kuva 2.8  $S_I$  kokonaismuutosprosentti (FPL 2010, 4-7).



Sahatavara ei useimmiten ole sahattuna täydellisesti jakautunut tangentin suunnassa vaakasuuntaan ja säteen suunnassa pystysuuntaan (kuva 2.9). Tämän takia esiintyy tangentin arvoilla tangentin suunnan muodonmuutoksen yliarviointia ja säteen suunnassa aliarviointia. Koska kaavat 2.3 ja 2.4 olettavat kosteuspitoisuuden ja kutistumisen suhteen olevan lineaarinen, syntyy noin 5 %:n suuruinen muodonmuutoksien aliarvioiminen. (FPL 2010, 13-17.)



Kuva 2.9 Sahattujen kappaleiden kutistumismuodonmuutoksia (Siikanen 2008, 44).

### 2.1.2 Säteen suuntainen liike

Säteen suunnassa muodonmuutos on tuoreesta absoluuttisen kuivaksi, keskimäärin 4 % eli noin puolet tangentin suuntaisesta liikkeestä (Kärkkäinen 2007, 195). Kokonaiskutistumaan vaikuttavat asiat on käyty jo läpi kohdassa 2.1.1. Käytettäessä säteen suuntaisia kertoimia puun muodonmuutoksen laskennassa, useimmissa tapauksissa aliarvioidaan tapahtuva muodonmuutos. Laskenta-kaavat käytiin myös läpi luvussa 2.1.1.

### 2.1.3 Syyn suuntainen liike

Syyn suunnassa muodonmuutos tuoreesta absoluuttisen kuivaksi on noin kymmenesosa säteen suuntaisesta liikkeestä ja kahdeskymmenesosa tangentin suuntaisesta liikkeestä, vaihdellen keskimäärin 0,1–0,3 % (Kärkkäinen 2007, 195). Syyn suuntainen liike on puulajista riippuva, esimerkiksi kutistuma joillakin puulajeilla ja nuorella puulla voi olla jopa 2 % tuoreesta absoluuttisen kuivaksi (FPL 2010, 4-5). Joissakin lähteissä syynsuuntaisen liikkeen sanotaan olevan niin pieni, ettei sitä oteta huomioon muodonmuutoksia laskettaessa. PuuERA-rakennejärjestelmän painumia laskettaessa myös kyseisen suunnan liikkeet täytyy huomioida. Laskennassa käytetään arvoa 0,0001, mikä on hieman alle kymmenesosan säteensuuntaisesta liikkeestä ja kyseinen arvo on annettu Kerto-tuotteille pituussuunnassa (kohta 2.1.4).

### 2.1.4 Viilupuun kosteusmuodonmuutokset

Sahatavaran lisäksi Suomesta löytyy myös erikoistuotteita, joissa puun luonnollinen rakenne on rikottu rakennetuotteen valmistamiseksi (esimerkiksi erilaiset levytuotteet ja viilupuu). Tällaisissa tapauksissa ei voida käyttää edellä olevien kohtien muutoskertoimia, vaan kertoimet on saatava muualta, kuten kyseisen tuotteen sertifikaatista. Näistä tuotteista Kerto-tuotteet ovat yleisimpiä kantavissa rakenteissa käytettyinä. Kerto-tuotteille on määritetty omat kosteuden aiheuttamat muodonmuutoskertoimet taulukossa 2.3 (VTT sertifikaatti no: 184/03, 2009, 10). Taulukon 2.3 kertoimia käytetään samalla tavalla, kuin taulukon 2.2 kertoimia kaavoissa 2.3 ja 2.4.

Taulukko 2.3 Kertopuun muodonmuutoskertoimet (VTT sertifikaatti no: 184/03 2009, 10).

	Kerto-S	Kerto-Q
Thickness	0.0024	0.0024
Width	0.0032	0.0003
Length	0.0001	0.0001

## **2.2 Kosteuden muutos tehtaalta rakennukselle**

Puun ollessa tehtaalla sen kosteuspitoisuus tiedetään tarkasti. Puutavaran lähtiessä tehtaalta optimiolosuhteista kosteuspitoisuus muuttuu. Kosteuspitoisuuden muutosta voidaan hidastaa pakkaamalla puutavara muoviin. Pakkaus ei kuitenkaan ole kosteussuoja. Tietyissä olosuhteissa muovin sisäpintaan voi jopa tiivistyä kosteutta. Tällöin vesi täytyy valuttaa pois leikkaamalla kääre auki alareunasta. Toimitettavien liimapuutuotteiden kosteuspitoisuus vaihtelee 10–14 %:n välillä. (Liimapuukäsikirja 2002, 21.)

Kuljetuksen ja varastoinnin aikana puun kosteus muuttuu. Kun puutavara kuljetetaan tiiviisti pakattuna ja kosteudelta suojattuna, kosteuspitoisuus muuttuu 0,2 prosenttiyksikköä varastointikuukautta kohden. Normaalin kuljetusaikana kuiva materiaali adsorboi noin 1,5 prosenttiyksikköä vettä. Jos kuljetuksessa on mukana tuoretta materiaalia, kosteuspitoisuuden muutos voi olla kaksinkertainen. Suojaamattomana kosteus voi lisääntyä jopa 7 prosenttiyksikköä. (FPL 2010, 13-13.)

Katoksen alle lämpimään kosteaan ilmaan varastoidun 8 %:n kosteuspitoisuuden kuivatun sahatavaran kosteuspitoisuus nousee jopa kaksi prosenttiyksikköä kuukaudessa ensimmäiseltä 45 päivältä. Tämän jälkeen, jos kosteutta riittää, kosteuspitoisuus nousee yhden prosenttiyksikön verran kuukautta kohden aina tasapainokosteuteen saakka. Vertailun vuoksi kestävät kosteuspitoisuuden nousuprosentit ovat noin yksi prosenttiyksikköä kuukaudessa avoimessa katoksessa ja 0,3 prosenttiyksikköä kuukaudessa suljetussa katoksessa olevalle puutavaralle. Vuodeksi varastoidun pinon kosteuspitoisuus nousee 2,7 prosenttiyksikköä pinon sisäosassa ja 3,5 prosenttiyksikköä pinon ulko-osassa. (FPL 2010, 13-13.)

## **2.3 Kausittainen kosteudenvaihtelu**

Puurakenteiden kosteuspitoisuus vaihtelee vuodenaikojen mukaan jatkuvasti. Talvella on pääasiassa korkea ilman suhteellinen kosteus ja alhainen lämpötila. Ilman suhteellinen kosteus pienenee lämpötilan noustessa, kun absoluuttinen

kosteus pysyy samana. Tämä saa aikaan sisätiloissa alhaisen ilman suhteellisen kosteuspitoisuuden, minkä takia taas puolestaan puurakenteet ovat yleensä kuivimmillaan talvella sisätiloissa. Ulkotiloissa puurakenteet ovat kuivimmillaan kesällä, kun ilman suhteellinen kosteus on matala ja ilma vielä lämmintä.

Sisätiloissa puun kosteuden vaihtelu on yleensä 3–5 prosenttiyksikköä (Liima-  
puukäsikirja 2002, 66), riippuen tietenkin rakenteesta ja sisäolosuhteista. Ulkotiloissa puurakenteen kosteuden vaihtelu voi olla jopa 10 prosenttiyksikköä. Tähän vaikuttaa monet asiat kuten kosteiden ja kuivien ajanjaksojen pituus, toisin sanoen, kuinka paljon puu ehtii kostua tai kuivua kyseisen olosuhteen vaikuttaessa (kohdassa 2.2 käytiin läpi sorptionopeuksia).

## 2.4 Lämpölaajeneminen

Rakenteen muodonmuutoksia tutkittaessa puun lämpölaajeneminen ei ole yhtä suuri ongelma kuin teräksen. Lämpölaajenemista tutkittaessa on otettava huomioon myös kosteus. Lämpötilan noustessa puu aluksi laajenee, mutta alkaa sitten kutistua kosteuden poistuessa puusta. Käytännössä puun lämpölaajeneminen huomataan vain puun ollessa erittäin kuivaa, kun kosteuspitoisuus on alle 4 % (FPL 2010, 4-15). Puun pituuden suhteellinen muodonmuutos on suoraan verrannollinen lämpötilan muutokseen, kaava 2.5.

$$\Delta l = \alpha \Delta T l \quad (2.5)$$

jossa

$\Delta l$  = pituuden muutos

$l$  = kappaleen alkuperäinen pituus

$\alpha$  = pituuden lämpölaajenemiskerroin

$\Delta T$  = lämpötilan muutos

Puulle anisotrooppisena materiaalina lämpölaajenemiskertoimet ovat riippuvaisia tarkastelusuunnasta. Kuten kosteusliikkeissä, myös lämpölaajenemisessa suurin muutos tapahtuu tangentin ja säteen suunnassa. Toisin kuin kosteusliikkeissä, tangentin ja säteen suuntien lämpötilakertoimet ovat siinä määrin sa-

massa suuruusluokassa, että niitä voitaisiin tarkastella yhdessä, ilmoittaen lämpötilakertoimen kohtisuoraan syitä vastaan. Syiden suuntaan lämpötilakerroin on noin kymmenesosa tangentin ja säteen suuntaisista arvoista. Puulajien välinen vaihtelu on tässä asiassa pieni. Tangentin ja säteen suuntaiset lämpötilakertoimet eräille puulajeille on esitetty taulukossa 2.4. Syyn suuntainen lämpötilakerroin on keskimäärin  $3,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . (Kärkkäinen 2007, 242.)

*Esimerkki 5: Seinätolpan lämpölaajeneminen, kaava 2.5  
pituus 3,0 m,  $\alpha = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , lämpötila nousee  $-10 \rightarrow +35 \text{ }^\circ\text{C}$   
Vastaukseksi saadaan  $\Delta l = 0,459 \text{ mm}$ , eli tolppa pitenee 0,459 mm*

Taulukko 2.4 Eräiden puulajien lämpötilakertoimia (Kärkkäinen 2007, 242).

Puulaji	Kuivatiheys $\text{kg/m}^3$	Tangentin suuntainen	Säteen suuntainen
		Lämpötilakerroin $\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	
Kuusi	377	47,0	35,0
Mänty	429	35,0	26,1
Tammi	622	47,7	36,4
Saarni	656	41,7	38,6
Pyökki	749	49,7	44,7

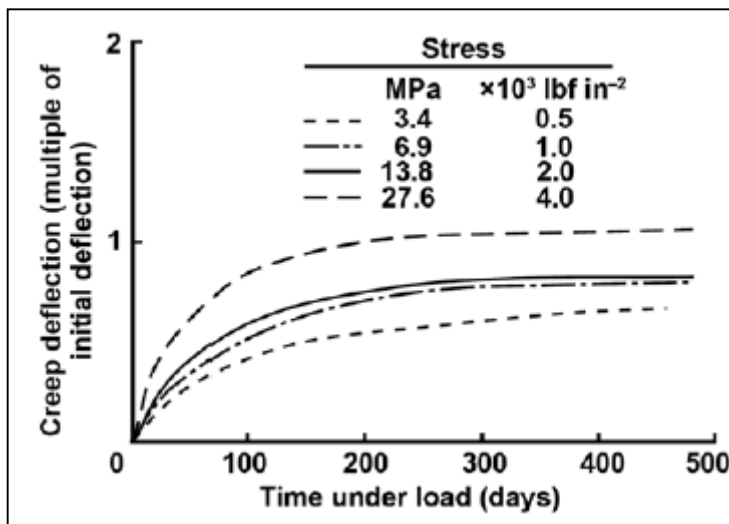
Vertailtaessa puun lämpötilakertoimia teräksen noin  $12 \cdot 10^{-6}$  kertoimeen huomataan teräksen lämpötilakertoimen olevan neljä kertaa suurempi kuin puun syyn suuntainen kerroin. Vastaavasti tangentin ja säteen suuntaiset kertoimet ovat noin neljä kertaa suuremmat kuin teräksen kerroin. Lämpötilakertoimia voidaan käyttää normaalilla lämpötila-alueella  $-50 - +50 \text{ }^\circ\text{C}$ . (Kärkkäinen 2007, 242.)

Lämpötilakerroin on lineaarinen vain täysin kuivalle tai ilmakeivälle puulle. Puun kosteussuhteen ollessa yli 15 % mutta alle kyllästymispisteen ja lämpötilan laskeessa alle  $-5 \dots -7 \text{ }^\circ\text{C}$  tapahtuu voimakas lämpötilakertoimen suureneminen, ts. puu kutistuu hyvin nopeasti. Ilmiöstä käytetään nimeä pakkaskutistuminen. Ilmiö on tulkittu sisäiseksi kuivumiseksi, jossa vesi siirtyy soluseinämästä soluonteloihin ja soluväleihin, jolloin seinämä kutistuu. Mikäli puussa on paljon vettä, jäätyminen vaikuttaa vastakkaiseen suuntaan, koska jään tiheys on pienempi kuin

veden. Vesi tarvitsee jäätyneenä suuremman tilan, näin ollen jään muodostuminen saattaa kompensoida kutistumisen. (Kärkkäinen 2007, 243.)

## 2.5 Ajan myötä tapahtuva muodonmuutos

Puun viskoelastisiin ominaisuuksiin vaikuttavat useat eri tekijät, kuten kosteuspitoisuus. Viskoelastisuus tarkoittaa, että materiaali toimii Hooken aineen ja Newtoniin nesteen kombinaationa, jolloin muodonmuutos tapahtuu aikaviiveellä. Kun puuta kuormitetaan vakiona pysyvänä kuormituksella, alhaisilla kuormitusasteilla (alle 30 % puun murtolujuudesta) ja lämpötila sekä kosteuspitoisuus ovat alhaisia (lämpötila alle 25 °C, kosteus alle 6 %), puu käyttäytyy pitkänkin ajanjaksona Hooken lain mukaan elastisesti, eikä voida havaita viskoelastisuutta. Sen sijaan suuri kuormitus, korkea lämpötila ja kosteuspitoisuus aiheuttavat viskoelastisen muodonmuutoksen kasvun eksponentiaalisesti ajan funktiona. Tätä viskoelastista toimintaa kutsutaan virumaksi. Olosuhteet, joissa puun ominaisuudet muuttuvat epälineaariseksi, riippuvat puulajista sekä kuormitussuunnasta. Kuvassa 2.10 on näytetty viruman suuruutta kuormituksen vaikutuksesta ajan kuluessa. (Kärkkäinen 2007, 236.)

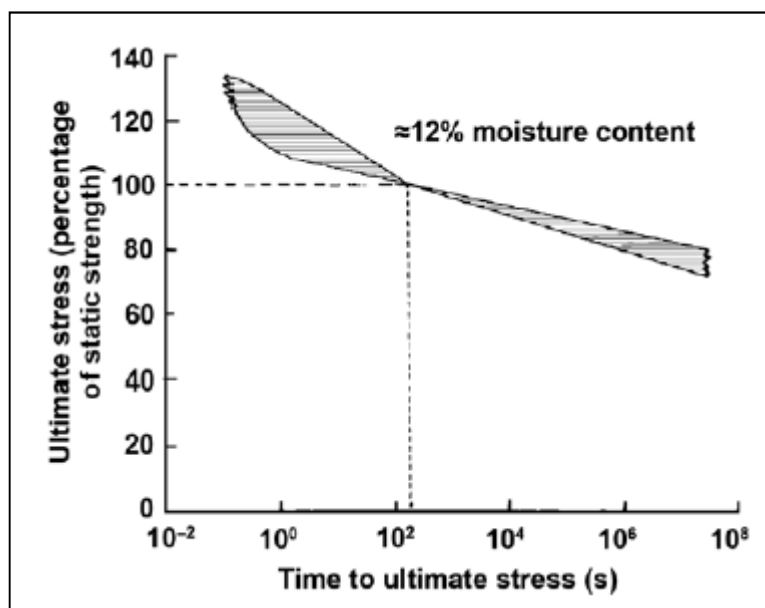


Kuva 2.10 Kuormituksen vaikutus viruman suuruuteen (FPL 2010, 5-39).

Kosteuspitoisuus vaikuttaa erityisen paljon puun viskoelastisiin ominaisuuksiin. Muodonmuutos on pienimmillään 6–7:n % kosteuspitoisuudessa. Kosteuden noustessa puun viskoelastinen luonne kasvaa. Kuormituksen aikana tapahtuvat

kosteuden muutokset vaikuttavat enemmän, kuin tasaisena pysyvä kosteus. Puun kuivuminen tuoreesta kuivaksi kuormituksen aikana aiheuttaa suuremman muodonmuutoksen, kuin että puun kosteuspitoisuus pysyisi samana kuormituksen aikana. Samoin viruminen on suurempi, jos puun kosteus lisääntyy ilman suhteellisen kosteuden ollessa korkea, kuin jos puu olisi koko ajan ilman suhteellista kosteutta vastaavassa tasapainokosteudessa. (Kärkkäinen 2007, 236.)

Ilman suhteellisen kosteuden vaihtelusta aiheutuva adsorption ja desorption vuorottelu kappaletta kuormittaessa vaikuttaa paljon viskoelastisiin ominaisuuksiin. Käytännön tutkimuksissa on selvinnyt, että suhteellisen pieni kuormitus voi rikkoa puukappaleen ajan kuluessa. Tutkimuksessa tasainen pysyvä kuormitus (40 % murtolujuudesta) aiheutti 2 %:n virumisen ilman suhteellisen kosteuden ollessa 93 %. Ilman kosteus vaihteli kuivan ja 93 % välillä, jolloin kappale virui samalla kuormituksella jatkuvasti, kunnes murtui vajaan kuukauden kuluttua kuormituksen aloittamisesta. Kuvassa 2.11 on näytetty 12 %:n kosteuspitoisuudessa mitatut murtolujuudet ajan kuluessa. Kosteuden vaihtelunopeus vaikuttaa muodonmuutoksen syntymisnopeuteen, mutta ei ajanjakson kokonaismuodonmuutokseen, jonka määrää kosteuden kokonaismuutos. (Kärkkäinen 2007, 237.)



Kuva 2.11 Murtolujuuden suhde aikaan 12 %:n kosteuspitoisuudessa (FPL 2010, 5-39).

Lämpötilan vaikutusta viskoelastisiin ominaisuuksiin on vaikea arvioida. Lämpötila vaikuttaa kuitenkin samansuuntaisesti kuin kosteus eli lämpötilan noustessa viruma kasvaa. Kuormituksen aikana vaihtelevan lämpötilan vaikutus on monimutkaista. Tutkimuksissa on havaittu muun muassa lämmitysjakson aikana lievää muodonmuutoksen palautumista. Lämpötilan ja kosteuspitoisuuden vaihtelun vaikuttaessa samaan aikaan syntyy monimutkaisia yhdysvaikutuksia, jotka eivät ole ennustettavissa kummankin tekijän erikseen tapahtuvista muutoksista. Tämä johtuu kosteuden ja lämpötilan vuorovaikutuksesta. (Kärkkäinen 2007, 237.)

## 2.6 Kosteuskäyristyminen

Rakenteissa, joissa kappaleen eri sivuilla on erilaiset olosuhteet (esim. eristyskerroksessa olevat pilarit ja palkit), voi esiintyä kosteuden aiheuttamaa käyristymistä. Poikkileikkauksessa kosteus on jakaantunut epätasaisesti, esimerkiksi talvella, kun sisällä on kuiva ja lämmin ja ulkona kylmä sekä kostea. Olosuhteet aiheuttavat sisällä rakenteeseen kutistumista ja ulkopuolella turpoamista. Tällöin ulkosivu tulee pidemmäksi kuin sisäpää, joten rakenne pyrkii taipumaan ulospäin. Vapaasti tuetussa ja kosteusliikkeitä rajoittamattomassa tilassa voidaan epätasaisen kosteusvaikutuksen taipuma laskea kaavalla 2.6. (Liimapuu-käsikirja 2002, 66.)

$$u = \frac{l \cdot \Delta l}{8h} \quad (2.6)$$

jossa

- $l$  = jänneväli
- $\Delta l$  = ulkopuolen ja sisäpuolen pituserotus  
turpoamisesta ja kutistumisesta
- $h$  = poikkileikkauksen korkeus
- $u$  = taipuma

*Esimerkki 6: Runkotolpan käyristyminen, kaava 2.6*  
*Ulkopuolen turpoaminen 0,6 mm, sisäpuolen kutistuminen -1,9 mm, tolpan pituus 3,0 m, tolpan leveys 270 mm. Vastaukseksi saadaan  $u = 3,5$  mm, eli runkotolppa on käyristynyt keskilinjalta 3,5 mm.*



## 2.7 Voiman aiheuttama muodonmuutos

Puun elastisuuden vuoksi puu pitenee syyn suunnassa puristettaessa säteen ja tangentin suunnissa. Vastaavasti vedettäessä syyn suunnassa kappale pienee syyn ja tangentin suunnassa. Jos leikkausjännitykset jätetään huomioimatta, voidaan kaavat esittää Hooken lain sovelluksina. (Kärkkäinen 2007, 216.)

$$\varepsilon_I = \frac{\sigma_T}{E_{I,T}} + \frac{\sigma_R}{E_{I,R}} + \frac{\sigma_L}{E_{I,L}} \quad (2.7)$$

Laskennassa ei tulla huomioimaan kyseistä ilmiötä, koska ilmiön aiheuttamat muodonmuutokset ovat niin pieniä. Lisäksi seinärakenteessa yhden suunnan puristuminen ja muiden laajentuminen ei aiheuta haittaa rakenteelle, pikemminkin ilmiöstä on hyötyä, kun rakenne tiivistyy.

## 2.8 Kosteuspitoisuuden muutoksen aiheuttamat jännitykset

Rakenteessa olevia jännityksiä pystytään laskemaan, kun tiedetään vaikuttavat voimat sekä poikkileikkaus- ja materiaalitiedot. Puun kosteuspitoisuuden muutoksen aiheuttamia jännityksiä pystytään arvioimaan Hooken lain avulla (kaava 2.8), kun tiedetään tapahtuva muodonmuutos ja materiaalitiedot. Jännitykset ovat seurausta erilaisesta kutistumisesta ulko-osan ja sisäosan välillä.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.8)$$

jossa,

$\sigma$  = jännitys

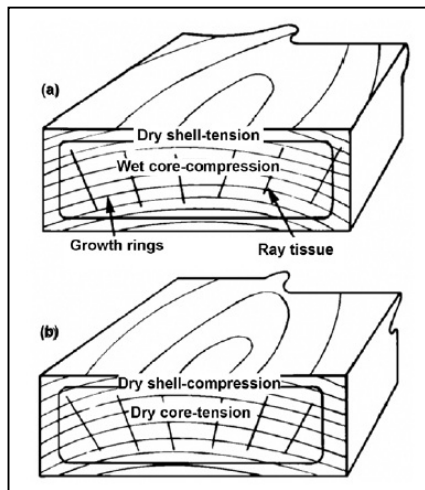
$E$  = kimmokerroin

$\varepsilon$  = suhteellinen muodonmuutos

Suhteellinen muodonmuutos on pituuden muutos jaettuna alkuperäisellä pituudella. Näin kaava 2.3 saadaan muutettua suhteelliseksi muodonmuutokseksi. Saatu kaava yhdistetään kaavaan 2.8, josta saadaan johdettua kaava 2.9.

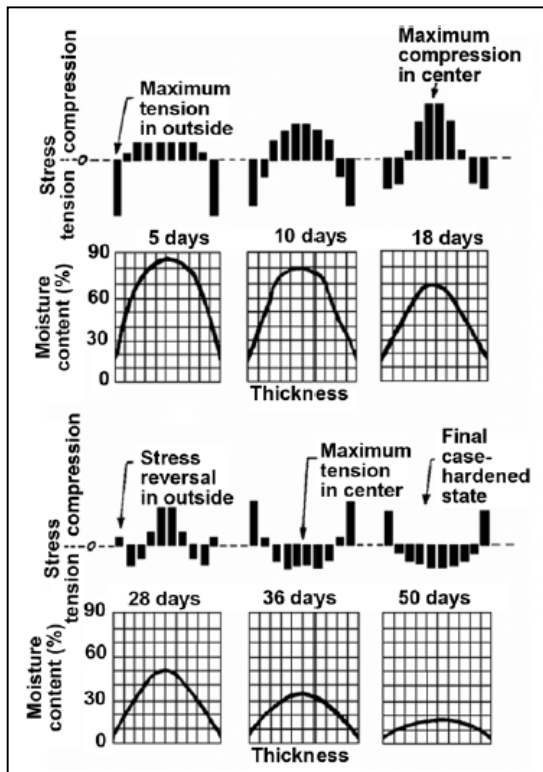
$$\sigma = E[C_I(M_E - M_I)] \quad (2.9)$$

Kaavassa kosteuspiitoisuudet ovat puun ytimen  $M_I$  ja ulkopinnan  $M_E$  kosteuspiitoisuudet. Kimmokertoimen arvoina käytetään Eurokoodin mukaisia arvoja. Kuavassa 2.12 on esitetty kuivauksen eri vaiheiden vaikutukset puun sisällä.



Kuva 2.12 Puun sisäiset jännitykset kuivauksesta a) alussa b) lopussa (FPL 2010, 13-7).

Alussa puu kuivuu pinnasta nopeammin kuin sisältä, mikä aiheuttaa ulkopintaan vetojännitystä ja sisäosaan puristusta kuvassa 2.13 (FPL 2010, 13-7). Jos ulkopinnan vetojännitys on liian suuri, syntyy pintaan halkeama. Halkeama ei ole vaarallinen, jos se ei ulotu ydinosaan saakka. Halkeaman muodostuminen riippuu puun poikkileikkauksen kasvukäyrien suunnista.



Kuva 2.13 Pintakerroksen ja sisäosan jännityksen ajan kuluessa (FPL 2010, 13-8).

Kuivumisen jatkuessa jännityssuhteet kääntyvät päinvastoin, sisäosa on vedetty ja ulko-osa puristettu. Vetojännityksen kasvaessa kapasiteettia suuremmaksi syntyy sisäinen halkeama. Tässä vaiheessa muodostunut halkeama on vaarallisempi, koska pintakerros saattaa olla täysin ehjä, vaikka sisäosa on halkeillut, kuten kuvassa 2.4. (FPL 2010, 13-7.)

Jännityseroja voi aiheutua myös suhteellisen pienistä kosteuspitoisuuden muutoksista, esimerkiksi tangentin ja säteen suuntaisen muodonmuutuskertoimen suhde on noin 2. Toisin sanoen, kappaleeseen syntyy tangentin suunnassa kaksinkertainen muodonmuutos säteen suuntaan verrattuna. Nämä jännitykset aiheuttavat yleensä käyristymiä, kuten kuvassa 2.3. (FPL 2010, 13-7.)

Tämän takia puuta kuivattaessa puun pintaa kostutetaan, jotta pinta ei kuivuisi liian nopeasti. Puu kuivuu pinnasta, joten puun kuivumisnopeus on riippuvainen kuivumispinta-alan suhteesta puun tilavuuteen.

### 3 EUROKOODI

Puurakenteita saa suunnitella vielä nykyisellä voimassa olevalla B10-normilla. Tässä työssä käytetään Eurokoodi 5:ttä, joka tulee korvaamaan B10-normin.

#### 3.1 Kosteuden ja kuormituksen keston vaikutus lujuuteen

Puun lujuuteen vaikuttavia asioita on paljon, kuten puun kosteuspitoisuus ja kuorman kesto aika. Kuiva puu on vahvempaa ja jäykempää kuin kostea puu. Normaalien materiaalien osavarmuusluvun lisäksi käytetään  $k_{mod}$ -kerrointa. Eurokoodissa SFS-EN 1995-1-1 määritetään  $k_{mod}$ -kerroin (taulukko 3.1). Määrittämiseen tarvitaan rakenteen käyttöluokka ja kuormitusaika. Käyttöluokka ottaa huomioon kosteuden vaikutuksen lujuuteen. Kaavassa 3.1 näkyy kuinka  $k_{mod}$ -kerroin otetaan huomioon suunnittelulujuuksia laskettaessa.

$$X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (3.1)$$

jossa

$X_d$  = lujuuden suunnitteluarvo

$k_{mod}$  = muunnoskerroin

$X_k$  = lujuuden ominaisarvo

$\gamma_M$  = materiaalin osavarmuusluku

*Esimerkki 7:  $k_{mod}$ -kerroimen huomioon ottaminen, kaava 3.1  
Sahatavara,  $f_{m,k} = 30 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_M = 1,4$ , käyttöluokka 1 ja kuorman aikaluokka pysyvä  $\rightarrow k_{mod} = 0,6$ . Suunnittelulujuudeksi saadaan  $12,9 \text{ N/mm}^2$ .*

Taulukko 3.1  $k_{mod}$ -kerroin (RIL 205-1-2009, 45).

Materiaali	Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka				
		Pysyvä	Pitkäaikainen	Keskipitkä	Lyhytaikainen	Hetkelinen
Sahatavara, Pyöreä puutavara, Liimapuu, LVL, Vaneri	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Lastulevy P4 <sup>1)</sup> ja P5, OSB/2 <sup>1)</sup> , Kova kuitulevy	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Lastulevy P6 <sup>1)</sup> ja P7, OSB/3 ja OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Puolikovat kuitulevyt: MBH.LA <sup>1)</sup> , MBH.HLS, MDF.LA <sup>1)</sup> ja MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	2	-	-	-	0,45	0,80

<sup>1)</sup> Saadaan käyttää vain käyttöluokassa 1.

### 3.2 Viruman huomioon ottaminen

Kohdassa 2.5 todettu viruma otetaan huomioon yksinkertaisella hiipumaluvulla  $k$ , joka pienentää puun kimmokerrointa. Kaavoissa 3.2 ja 3.3 on esitetty kimmo-  
kertoimen muutos. Virumakertoimen  $k_{def}$ -arvoja löytyy taulukosta 3.2.

$$k = \frac{1}{1+k_{def}} \quad (3.2)$$

$$E_d = k \cdot E_k \quad (3.3)$$

*Esimerkki 8: Viruman huomioiminen kimmokertoimessa, kaava 3.3*  
 $E_{mean} = 12\,000 \text{ N/mm}^2$ , sahatavara ja käyttöluokka 1  $\rightarrow k_{def} = 0,6$ .  
 Vastaukseksi saadaan  $E_d = 7\,500 \text{ N/mm}^2$ , eli kun viruma huomioidaan, kim-  
 mokertoimen arvo on  $7\,500 \text{ N/mm}^2$ .

Taulukko 3.2 Virumakertoimen  $k_{def}$ -arvoja (RIL 205-1-2009, 46).

Materiaali	Standardit	Käyttöluokka		
		1	2	3
Sahatavara, Pyöreä puu	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Liimapuu	EN 14080			
LVL	EN 14374, EN 14279			
Vaneri, Kerto-Q lappeella	EN 636, VTT 184/03	0,80	1,00	2,50
OSB-levy	EN 300: OSB/2	2,25	-	-
	EN 300: OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	-
Lastulevy	EN 312: P4 ja P5	2,25	3,00	-
	EN 312: P6 ja P7	1,50	2,25	-
Kova kuitulevy	EN 622-2: HB.LA, HB.HLA	2,25	3,00	-
Puolikova kuitulevy	EN 622-3: MBH.LA, MBH.HLS	3,00	4,00	-
MDF-levy	EN 622-5: MDF.LA, MDF.HLS	2,25	3,00	-

Kimkokertoimen arvot ja muut materiaaliarvot saadaan RIL 205-1-2009 Puura-  
kenteiden suunnitteluohjeesta. Viruma voidaan myös huomioida jälkikäteen las-  
kemalla aluksi muodonmuutokset ominaisarvoilla ja jälkikäteen kertomalla muo-  
donmuutokset virumaluvulla, kuten kaavassa 3.4. Tarkemmin kaava on selos-  
tettu Eurokoodistandardissa SFS-EN 1995-1-1 sivulla 19.

$$u_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot u_{inst.G} + (1 + \Psi_{2.1} \cdot k_{def}) \cdot u_{inst.Q.1} \quad (3.4)$$

jossa

$u_{fin}$	= kokonaismuodonmuutos, viruma huomioituna
$u_{inst.G}$	= pysyvien kuormien aiheuttama muodonmuutos
$u_{inst.Q.1}$	= hyötykuormien aiheuttama muodonmuutos
$\Psi_{2.1}$	= kuormien yhdistelykerroin

Kaavan 3.4 käyttämisestä saatava hyöty on muodonmuutoksen parempi ennustaminen ja viruman suuruuden ymmärtäminen, kun muodonmuutokset on laskettu erikseen.

### 3.3 Muodonmuutokset

Eurokoodissa ei ole määrätty käytettäviä tai tarkasteltavia kaavoja, vaan siellä ainoastaan sanotaan, että kosteuden ja lämpötilan vaihteluiden aiheuttamat liikkeet tulee tarkastaa. Muodonmuutoksien tarkastelussa käytetään statiikan ja lujuusopin kaavoja ja Eurokoodin materiaalitietoja ja varmuuksia.

Normaalivoiman aiheuttaman puristuman laskentaan käytetään kaavaa 3.5. Mikä tarkoittaa, että voiman oletetaan jakaantuvan koko poikkileikkauksen alueelle tasan. Materiaalitietoina käytetään Eurokoodin antamia varmuuskertoimia.

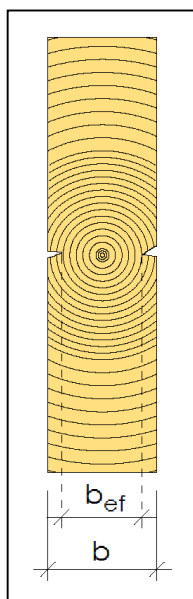
$$\Delta l = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} \quad (3.5)$$

*Esimerkki 9: Painuman laskenta, runkotolppa, kaava 3.5  
Puristava voima 10 kN, tolpan pituus 3,0 m,  $E = 12000 \text{ N/mm}^2$ , poikkileikkauksen ala  $10\,560 \text{ mm}^2$ . Vastaukseksi saadaan 0,24 mm.*

Muiden muodonmuutoksien laskennassa (kuten kosteus- ja lämpöliikkeet) käytetään luvussa 2 läpikäytyjä kaavoja ja Eurokoodin määrittelemiä materiaalitietoja.

### 3.4 Halkeamat

Eurokoodissa halkeamat otetaan huomioon leikkauskestävyydessä pienentämällä poikkileikkauksen leveyttä  $k_{cr}$ -kertoimella. Käyttöluokassa 1 pienennyskerroin on sahatavaralle ja liimapuulle arvo 0,67. Puulevyille ja viilupuulle tai jos puu on käsitelty kosteuden siirtymistä estävällä pintakäsittelyllä, pienennyskerroin on 1. Kun rakenne on pysyvästi käyttöluokissa 2 ja 3 pienennyskerroin on myös 1. Kuvassa 3.1 on havainnollistettu pienennyskerroimien vaikutus. (RIL 205-1-2009, 68.)



Kuva 3.1 Puun tehollinen leveys halkeamissa

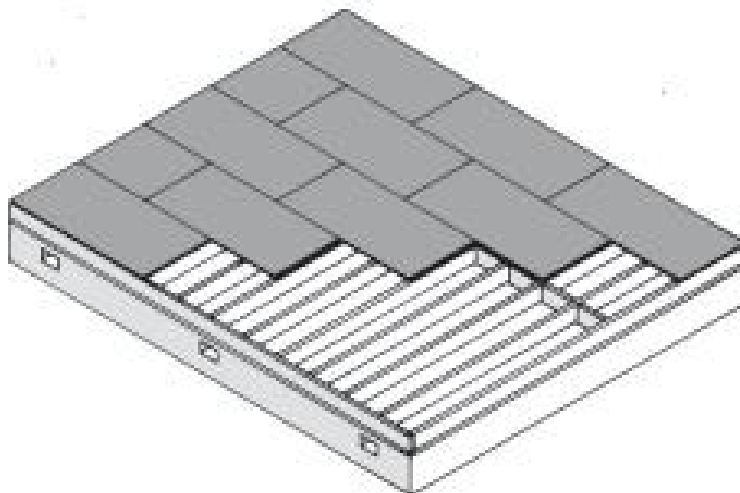
## 4 RAKENNEJÄRJESTELMIEN VERTAILU

### 4.1 Platform-rakenne

Platform-rakennejärjestelmä on Pohjois-Amerikassa olevan rakennusjärjestelmän suomalainen sovellus, jolla pystytään nopeassa tahdissa rakentamaan rakennuksen runko pystyyn. Yhdysvalloissa rakennetaan yli miljoona asuntoa vuosittain kyseisellä rakennusjärjestelmällä.

#### 4.1.1 Rakentamisen periaate

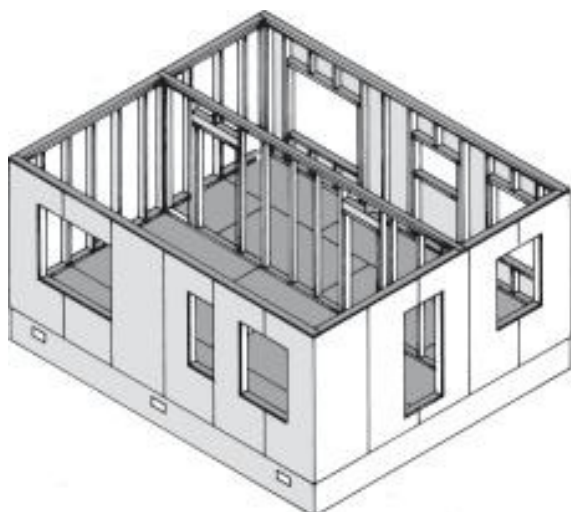
Viljakaisen Avoin puurakennejärjestelmä suunnitteluperusteet -oppaassa on kerrottu platform-rakenteesta. Platform-rakennetta on Suomessa kutsuttu myös nimellä avoin puurakennejärjestelmä. Järjestelmän peruseriaatteena on, että rakennus rakennetaan tason (platform) päällä, eli ensin rakennetaan perustukset ja alapohja (kuva 4.1).



Kuva 4.1 Alapohja (Viljakainen 2005, 6).

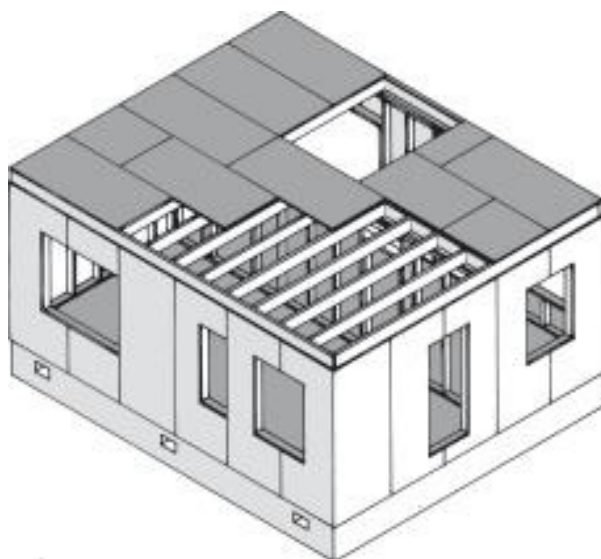
Alapohjan jälkeen rakennetaan seinät. Seinät rakennetaan alapohjan päällä hyödyntäen tehtyä tasoa (alapohja) työalustana. Seinät nostetaan pystyyn niiden valmistuttua (kuva 4.2).





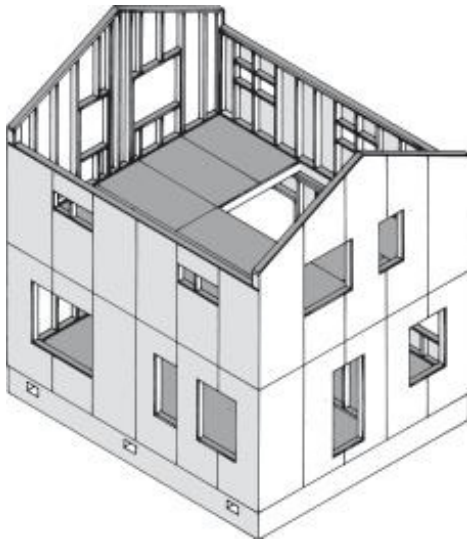
Kuva 4.2 Seinien pystytys (Viljakainen 2005, 6).

Kun seinät on saatu pystyyn, rakennetaan uusi taso (välipohja). Uutta tasoa käytetään taas seuraavan kerroksen seinien työalustana (kuva 4.3). Tason rakenteena on useimmiten pienillä jänneväleillä (alle 4 m) sahatavara ja pidemmillä jänneväleillä liima- tai viilupuupalkkeja. Välipohjat ovat rakenteen suurin riski painumien kannalta, mutta näitä asioita käsitellään kohdassa 4.1.2.

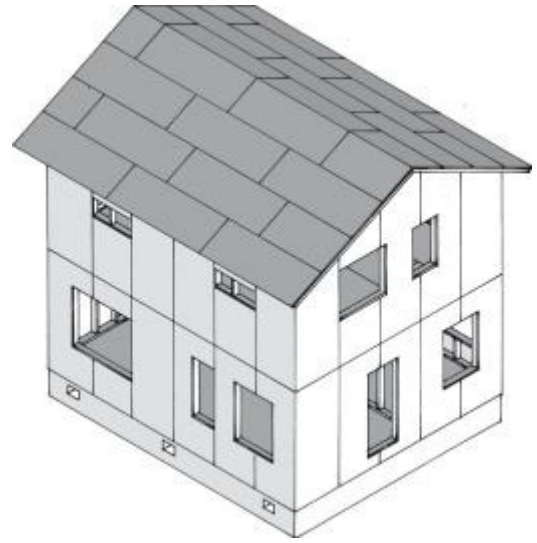


Kuva 4.3 Välipohja (Viljakainen 2005, 6).

Näin edetään aina katolle saakka, kuten kuvista 4.4 ja 4.5 nähdään. Seinien runkotavara on yleensä sahatavaraa. Rakennejärjestelmä on nopea ja helppo rakentaa. Rakentaminen onnistuu pienellä rakennusryhmällä eikä rakentamisessa tarvita erillistä nostokalustoa.



Kuva 4.4 Toisen kerroksen seinät (Viljakainen 2005, 6).

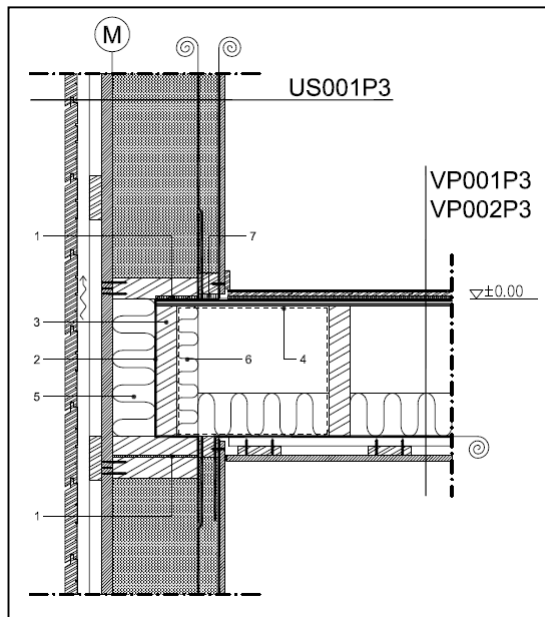


Kuva 4.5 Katto (Viljakainen 2005, 6).

#### 4.1.2 Detaljit ja ongelmakohdat

Kuten jo kohdassa 4.1.1 todettiin suurimmat muodonmuutokset aiheutuvat väli-tasojen kohdalla. Kuvasta 4.6 ongelma huomataan hyvin nopeasti, kun muiste-taan mitä luvussa 2 käytiin läpi puun kosteusliikkeistä tangentin ja säteen suun-taan. Puun kimmokertoimen arvo on myös paljon heikompi kohtisuoraan syitä vastaan kuin syiden suuntaan, joten kokoonpuristuvuus on myös suurta liitok-sen kohdalla. Rakennetuista kohteista on mitattu 5–10 mm painumia välipohjan osalta, suurimmat painumat ovat olleet alakerroksissa ja pienimmät yläkerrok-sissa (Viljakainen 2005, 42).

Platform-rakennejärjestelmä on kehitetty Pohjois-Amerikan keskiosissa, missä on vakaat sääolot (pitkä kuiva kausi). Suomessa sääolot saattavat kuitenkin muuttua hyvinkin äkillisesti, jolloin sateisiin pitäisi varautua rakentamalla suoja-hupun alla.



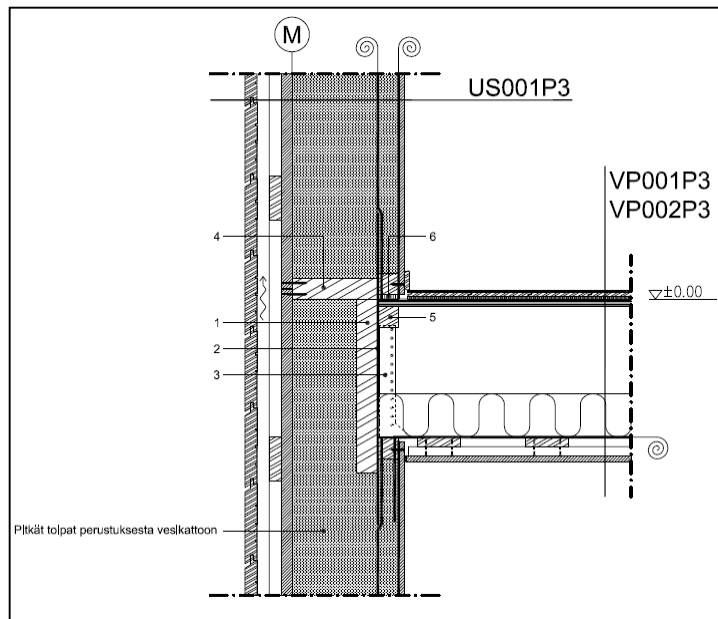
Kuva 4.6 Platform-rakenteen välipohjan liitos (Avoin puurakennejärjestelmä 2009, DV001P3)

Kun olosuhteiksi oletetaan, että puu kostuu toimituksen ja rakentamisen aikana 1,5 prosenttiyksikköä toimituskosteudesta (10–14 %) ja kuivuu 8 % kosteuspiitoisuuteen. Puun tasapainokosteuspitoisuus voi talvella olla vain 4–6 %, jos sisäilma on hyvin kuiva. Luvussa 2 esitettyjä kaavoja käyttämällä saadaan kuvassa 4.6 olevan rakenteen painumaksi 6–9 mm, mikä on likimäärin sama kuin tutkimuksissa on todettu. Joten laskentatavan voidaan arvioida olevan riittävän tarkka ennustamaan kosteudenmuutoksesta johtuvia painumia. Rakenteen kuivumisen aiheuttama kutistuminen on noin 5 mm ja kuormituksen aiheuttama kokoonpuristuma noin 1–4 mm riippuen kuormituksesta. Kaikki poikittaiset rakenteet (kuten alajuoksut, palkit), jotka ovat seinän kohdalla, lisäävät painumia.

#### 4.1.3 Rakennuksen kokonaistarkastelu

Rakennuksen painumisesta ei aiheudu varsinaisesti vakavaa haittaa ellei puurakennetta ole yhdistetty painumattomiin rakenneosiin (esim. hissikuilu). Suurin painuma syntyy alakerroksissa, mutta painumaero on suurinta yläkerroksissa, mikä pitää huomioida etukäteen liitoksissa ja kaadoissa. Suurien painumien myötä voi rakennuksessa ilmetä epätasaista painumista, joka on paljon haitallisempi kuin tasainen painuminen. Esimerkiksi jos osa seinistä on jatkuvia (kuva

4.7), eli poikittaisia puuosia on vähän ja jos osa seinistä taas on kuvan 4.6 mukaisilla liitoksilla toteutettu, voi painumaero olla kerrosta kohden 3–5 mm. Noin suuren painuman kertautuminen usean kerroksen matkalla johtaa yläkerroksissa vaikeuksiin, esimerkiksi viisikerroksisen kerrostalon ylimmässä kerroksessa painumaero seinien välillä olisi jo 15–25 mm.



Kuva 4.7 Jatkuvat seinät (Avoin puurakennejärjestelmä 2009, DV003P3)

Suurien painumien ongelmaksi voi tulla esimerkiksi lattioiden kaltevuus, ilman- tai höyrynsulun repeäminen ja sitä kautta tiiveys- ja kosteusongelmat. Tällöin liitoksiin syntyisi pakkovoimia ja ylimääräistä rasitusta, pahimmassa tapauksessa kosteuden vaihdellessa puun turvotessa ja kutistuessa liitokset löystyisivät ja lopulta pettäisivät.

Seinien pituuden kasvaessa seinän mahdollinen käyristyminen kasvaa. Ongelma on lähinnä ulkonäöllinen ja näkyy julkisivuissa. Todelliseksi ongelmaksi käyristyminen voi tulla, jos rakenteessa on vaakasuuntaisia rakenteita. Tällöin voi niihin kohdistua vaakavoimia. Esimerkiksi liitoksissa kiinnikkeiden suuntaiset vaakavoimat, joissa naulaan tai ruuviin kohdistuu suoraa vetovoimaa, ovat haitallisia.

Tarkasteltuna yhden kerroksen sisällä tapahtuvia painumia, huomataan suurimman painuman tulevan välipohjan rakenteesta. Välipohjan kohdalla liitosten tekoon on kiinnitettävä huomiota, koska painumat ovat suuria, esimerkkinä julkisivupaneloinnin jatkuminen välipohja rakenteen yli.

## **4.2 PuuERA-rakennejärjestelmä**

PuuERA-rakennejärjestelmä on uusi vuonna 2010 kehitetty rakennejärjestelmä, jolla pyritään muun muassa pienentämään painumien aiheuttamia ongelmia. Rakennejärjestelmän kehitys on lähtenyt liikkeelle toimijoiden halusta saada puun käyttöä lisättyä rakentamisessa. Rakennejärjestelmän kantavat osat ovat liimapuuta. Välipohjalaatta toimii liittorakenteena, jolloin laatan taipumat saadaan pieniksi ja sitä kautta värähtelyn haittoja vähennettyä.

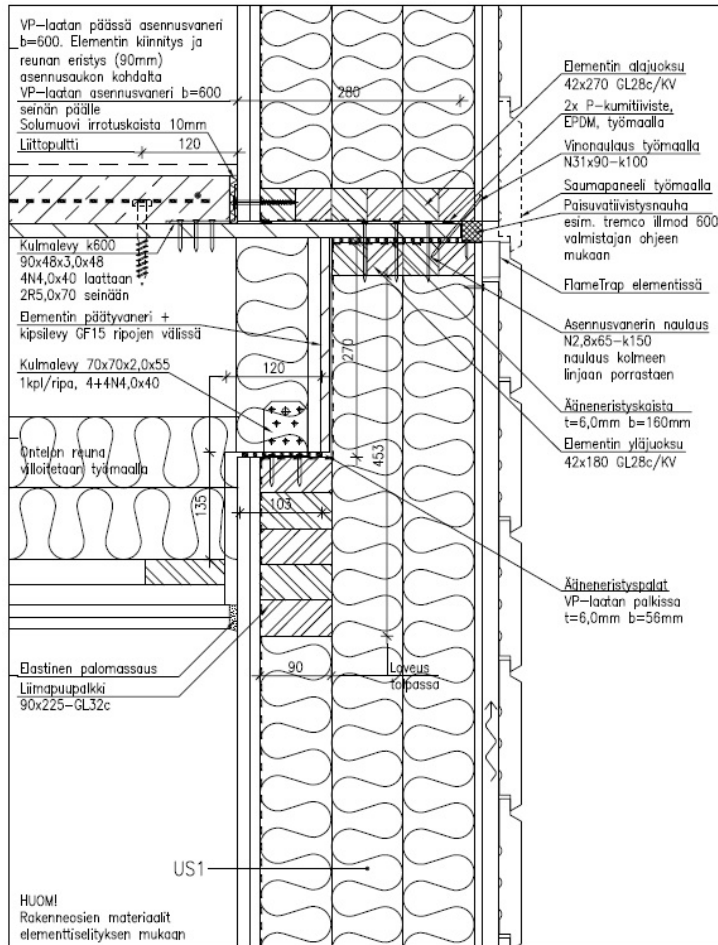
### **4.2.1 Rakentamistapa**

Kerrostalon rakentamisessa käytetään rakennejärjestelmää, jossa välipohja ei katkaise seinälinjaa, vaan seinät jatkuvat välipohjan ohi. Tällä rakenteella pyritään vähentämään kerrostalon painumista. Rakennejärjestelmässä käytetään rakennusjärjestelmää varten suunniteltuja elementtejä. Seinät ja välipohjat tehdään valvotuissa olosuhteissa tehtaalla valmiiksi.

Seinien alajuoksut on tehty liimapuusta, halkaisemalla 90x270 poikkileikkaus kahdeksi 42x270 poikkileikkaukseksi, lujuusluokaltaan alajuoksut ovat GL28c tai koivuvaneria. Yläjuoksu on tehty samalla periaatteella. Ala- ja yläjuoksun välillä on VP-laatan asennusvaneri, jonka avulla saadaan seinäelementti kiinnitettyä välipohjaan ja VP-laatan reuna villoitettua työmaalla. Välipohjan kannattajana seinälinjalla on 90x225 liimapuupalkki, lujuusluokaltaan GL32c. Osastoivat väliseinät on rakennettu limittäisistä liimapuutolpista 300 mm välein.

## 4.2.2 Detaljit ja ongelmakohtat

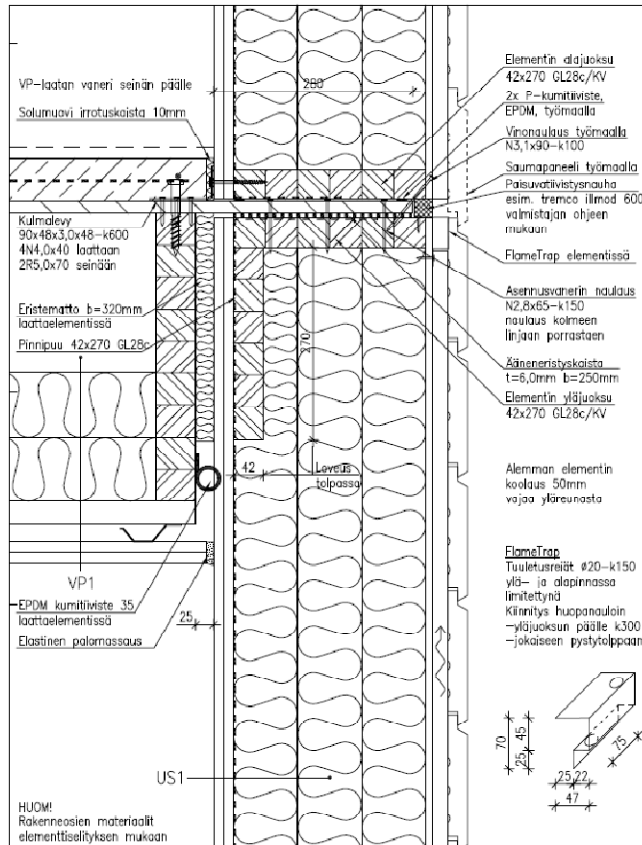
Rakennejärjestelmä on herkkä epätasaisille painumille, johtuen välipohjan erisuuntien erilaisista liitoksista seinärakenteeseen. Kuvassa 4.8 välipohja on tuettu seinälinjalle palkkien avustuksella ja kuvassa 4.9 nähdään, että välipohja on yhteen suuntaan kantava ja seinäelementit on kiinnitetty kansivaneriin.



Kuva 4.8 Välipohjan tuenta seinälinjalle (Insinööritoimisto Puolanne)

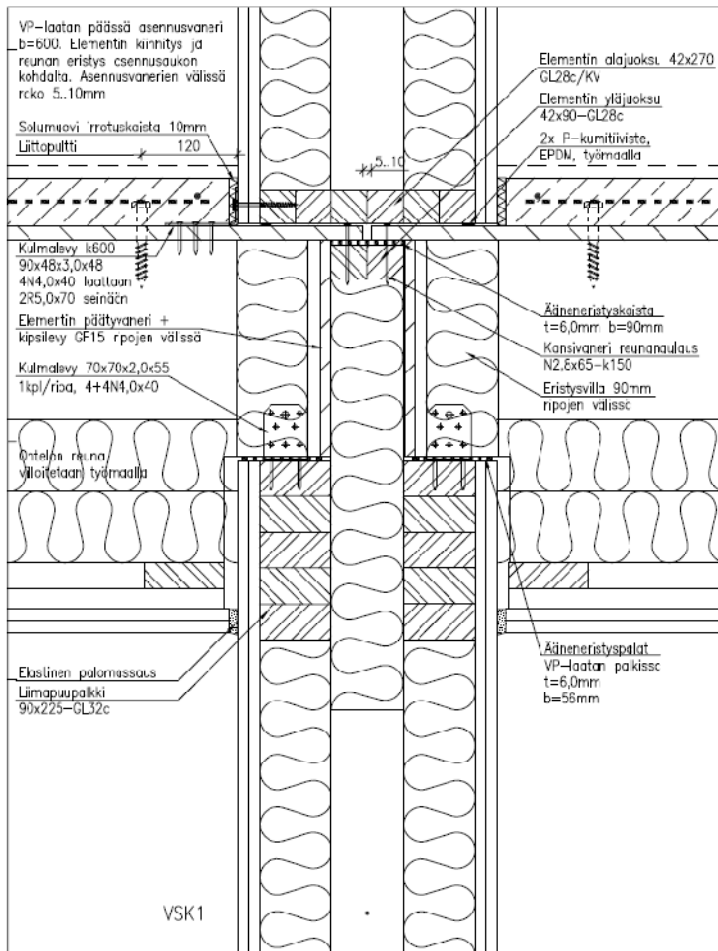
Liimapuupalkin kutistuma voi aiheuttaa raon liimapuurunkotolppien välille. Raon vuoksi tolppaan voi tulla epäkeskeisiä voimia ja rakenteeseen tiiveysongelmia. Rako on suurimmillaan vähän kuormitetuilla seinillä ja pienimmillään paljon kuormitetuilla seinillä. Palkin lovettu alaosa on arka pitkittäisille halkeamille, mikä puolestaan pienentää palkin taivutuskestävyyttä. Halkeamaa voidaan estää liimaamalla loveuksen kohdalle liimapuun sivuille tukivanerit pitkillä jänneväleillä. Liimaushetkellä liimapuupalkin pitää olla mahdollisimman kuiva, ettei havu-

vanerin ja liimapuun kosteuskertoimien erisuuruus aiheuta kutistumishalkeamaa palkissa. Asennusvanerina toimivaan koivuvaneriin kohdistuu myös kuormitusta palkin painuessa, vaneri ja kulmarauta voivat aiheuttaa lattian nousua seinien vierellä, kun muu lattiarakenne painuu.



Kuva 4.9 Palkkien suuntaisen seinän liitos (Insinööritoimisto Puolanne)

Kuvassa 4.9 näkyy kulmalevy, joka on kiinnitetty seinäelementtiin ja välipohjalaattaan. Välipohjalaatan kutistuessa voi palomassauksen tiiveydessä ilmetä ongelmia. Väliseinien liitokset ovat periaatteeltaan samanlaisia kuin ulkoseinien liitokset. Kuvassa 4.10 on esitetty välipohjalaataston tuenta kantavalle väliseinälle. Väliseinillä kutistumisen aiheuttamat painumat ovat pienempiä kuin ulkoseinien sisäpuolisissa osissa. Lisäksi kuormitus on noin kaksinkertainen ulkoseinien kuormitukseen, mikä lisää puun kokoonpuristuvuuden aiheuttamaa painumaa. Väliseinillä oleva kuormien suuruus pienentää kutistumisen aiheuttamaa ongelmaa rakenteessa.



Kuva 4.10 Kantava väliseinä (Insinööritoimisto Puolanne)

### 4.2.3 Rakennuksen kokonaistarkastelu

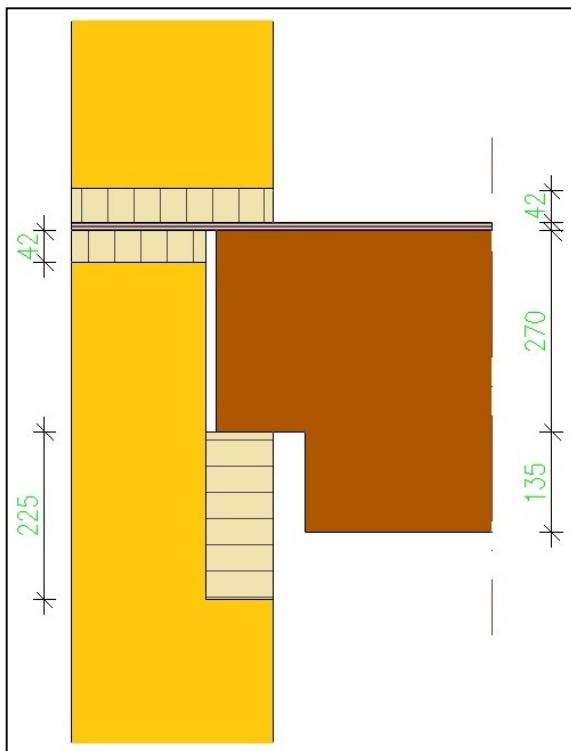
Rakennuksen kokonaispainuma on huomattavasti pienempi kuin platform-tekniikalla rakennetun vastaavan rakennuksen. Seinärakenteessa ilmenee epä-keskisyyttä kuormien siirrossa kerroksesta toiseen. Rakennusjärjestelmässä seinärakenne ei painu juurikaan, joten seinien liitokset painumattomiin rakenteisiin, kuten hissikuilu, ei tule ongelmia. Välipohjien painuma on kerrosriippuvaista, mutta pääosin rakenteen painumat ovat pieniä ja liitokset helppo ratkaista painumattomiin rakenteisiin. Rakennusjärjestelmän pääongelmaksi syntyykin seinä- ja välipohjarakenteen liitos, ettei mahdollisesti syntyvä rako aiheuttaisi ongelmia tiiveyden suhteen.



## 5 MUODONMUUTOSTEN LASKENTA

Laskentaa tehtäessä käytetään luvussa 2 mainittuja kaavoja. Laskennassa tarkastellaan kahta pistettä, joihin muodostuu suuret kuormitukset. Valitut tarkastelukohdat ovat rakennuksen nurkissa ja seinälinjojen keskialueella. Loppukosteuden määrittämiseen olen apuna käyttänyt Dof-laskentaa, joka on esitetty liitteessä 1. Esimerkkilasku 1. kerroksen osalta on esitetty liitteessä 2.

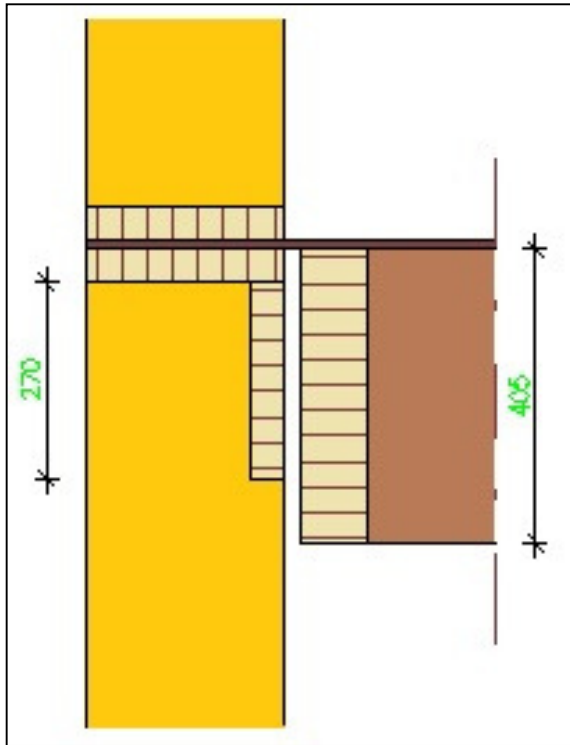
PuuERA-järjestelmän rakenne nähdään kuvassa 5.1. Seinätolppina on liimapuuta GL28c, 42x270. Ala- ja yläsidepuut ovat liimapuuta GL28c. Välipohjalaatan kantavat palkit ovat liimapuuta 90x405. Välipohjalaatan tukipalkkina on liimapuuta 90x225.



Kuva 5.1 PuuERA, välipohjan liitos seinään

Välipohjan tukipalkkia oletetaan kuormittavan ainoastaan kyseisen tason kuormat. Seinärakenne siirtää ylempien tasojen kuormat eteenpäin. Rakenteeseen syntyy epäkeskeisyyttä kyseisestä kuormien siirtotavasta johtuen.

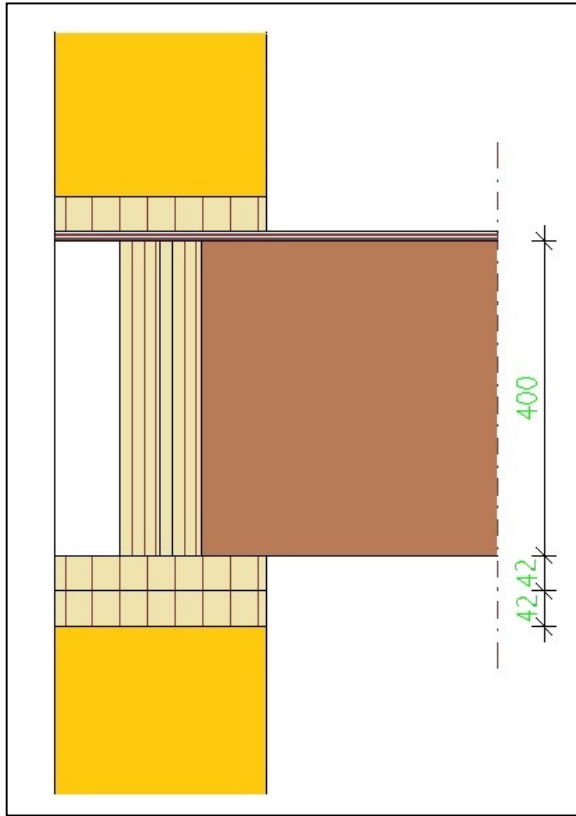
Ala- ja yläsidepuun muodonmuutoskertoimeksi otetaan tangentin suunnan kerroin, koska kyseiset sidepuut on saatu halkaisemalla 90x270 liimapuu. Liimapuupalkkien muodonmuutoskertoimina käytetään säteen suuntaista kerrointa ja runkotolppien kertoimina syynsuuntaista kerrointa.



Kuva 5.2 PuuERA, välipohjan liitos palkkien suuntaiseen seinään

Kuva 5.2 osoittaa välipohjalaatan palkkien suuntaisen liitoksen seinään. Liitoksien tarkemmat detaljit on esitetty luvussa 4. Laskennassa tarkastellaan lähemmin ongelmakohtia, kuten paljon painuvien osien ja vähän painuvien osien painumaeroja. PuuERA-kohteessa tarkastellaan lähemmin välipohjan liitoksia ja platform-kohteessa kokonaispainumaa, joka on varsin suuri.

Platform-rakenne on esitetty kuvassa 5.3. Seinätolppana ja ala- ja yläsidepuuna on sama liimapuu, kuin edellä olevassa Puu-ERA-rakenteessa. Välipohjarakenteena on Kerto-S 51x400. Kehäpalkkina on kaksi Kerto-S 51x400.



Kuva 5.3 Platform, rakenne

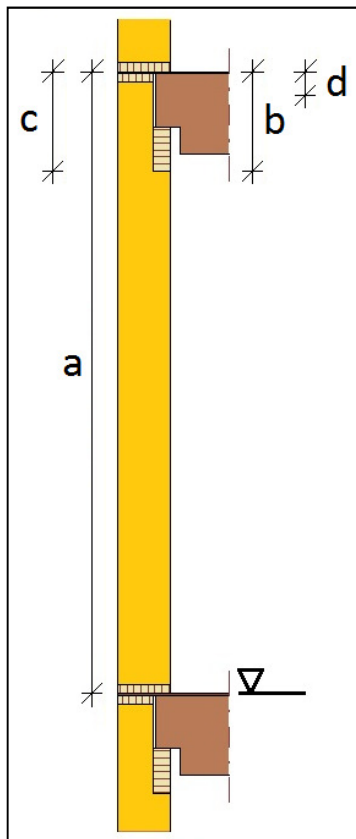
Kuormitukset siirtyvät seinältä kehäpalkkien avulla alemmalle seinälle. Välipohjalta tulevat kuormat siirtyvät suoraan seinän keskilinjalle, joten rakenteeseen ei synny epäkeskeisyyttä kuormista.

Muodonmuutoskertoimina käytetään liimapuuosissa samoja kertoimia kuin PuumERA-rakenteessa. Viilupuulle käytetään viilupuun omia kertoimia (Kerto-S ja Kerto-Q).

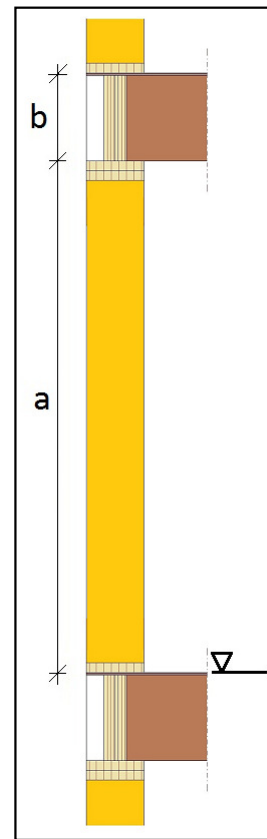
## 5.1 Tulokset

Laskentaa suoritettaessa kävi ilmi, että As Oy Heinolan PuuMERA rakennuksen teoreettinen kokonaispainuma on viiden kerroksen matkalla vain 1–2 cm. Laskettu katon painumaero vastaa puoltatoista kerrosta platform-rakennejärjestelmällä (kuva 4.6) rakennettuna. Laskennassa ei ole otettu huomioon ulkoseinän korkeampaa kosteuspitoisuutta sisäseinään verrattuna. Ulkoseinän korkeampi kosteuspitoisuus aiheuttaa seinän ulko-osassa turpoamista, mikä suurentaa PuuERA-rakenteessa seinän ja palkin välissä olevaa rakoa.

Seinän käyristyminen on todella pientä eikä aiheuta suurta vahinkoa rakennejärjestelmille. Seinä käyristyy keskilinjalta ulospäin noin 3 mm. Laskentatulokset on esitetty tarkemmin kahdella seuraavalla sivulla. Ensimmäisellä sivulla käydään läpi PuuERA-järjestelmän painuma ja toisella sivulla platform-järjestelmän painuma. Kuvissa 5.4 ja 5.5 on ilmoitettu painumien merkinnät.



Kuva 5.4 PuuERA-järjestelmän painumatulosten merkintä



Kuva 5.5 Platform-järjestelmän painumatulosten merkintä

## Painuma PuuERA-järjestelmä

Lähtöarvot:

Puu kuivuu 13 % -> 8 % (3v kuluessa)

Materiaali: liimapuu GL28c/GL32c

Kuormitukset: otettu kyseisestä kohteesta

**Katon** painumaero 17,7 mm ( $\Sigma a_i$ )

**5. krs** kerroksen painuma  $a_5 = 2,4$  mm,  
lattian painumaero **18,8 mm** ( $a_1+a_2+a_3+a_4+b_4-c_4$ )

- kutistumasta

- seinätolppa 1,6 mm, juoksut 0,8 mm

**4. krs** kerroksen painuma  $a_4 = 3,0$  mm,  
lattian painumaero **15,6 mm** ( $a_1+a_2+a_3+b_3-c_3$ )

- kutistumasta

- seinätolppa 1,6 mm, juoksut 0,8 mm

- puristumisesta

- seinätolppa 0,3 mm, juoksut 0,3 mm

- palkin kohdalla, palkki  $b_4 = 4,3$  mm, seinä  $c_4 = 0,8$  mm  
ero  $d_4 = 3,5$  mm

**3. krs** kerroksen painuma  $a_3 = 3,6$  mm,  
lattian painumaero **11,9 mm** ( $a_1+a_2+b_2-c_2$ )

- kutistumasta

- seinätolppa 1,6 mm, juoksut 0,8 mm

- puristumisesta

- seinätolppa 0,6 mm, juoksut 0,6 mm

- palkin kohdalla, palkki  $b_3 = 4,3$  mm, seinä  $c_3 = 1,0$  mm  
ero  $d_3 = 3,3$  mm

**2. krs** kerroksen painuma  $a_2 = 4,1$  mm,  
lattian painumaero **7,7 mm** ( $a_1+b_1-c_1$ )

- kutistumasta

- seinätolppa 1,6 mm, juoksut 0,8 mm

- puristumisesta

- seinätolppa 0,9 mm, juoksut 0,8 mm

- palkin kohdalla, palkki  $b_2 = 4,3$  mm, seinä  $c_2 = 1,1$  mm  
ero  $d_2 = 3,2$  mm

**1. krs** kerroksen painuma  $a_1 = 4,6$  mm,  
lattian painumaero **0,0 mm**

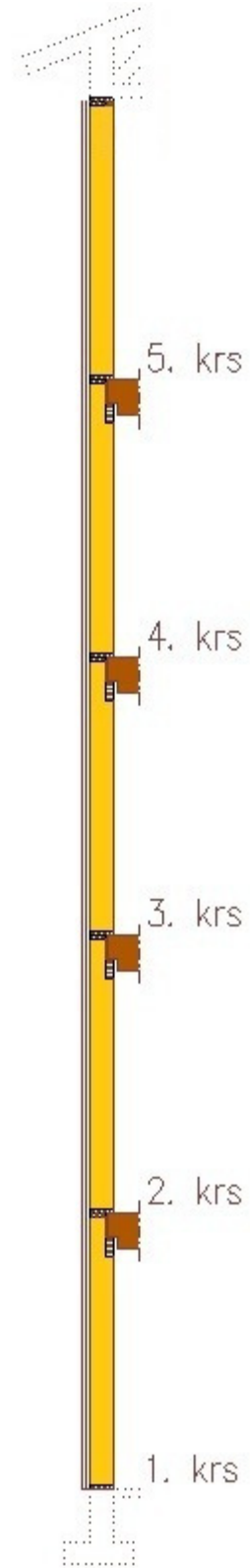
- kutistumasta

- seinätolppa 1,6 mm, juoksut 0,8 mm

- puristumisesta

- seinätolppa 1,1 mm, juoksut 1,1 mm

- palkin kohdalla, palkki  $b_1 = 4,3$  mm, seinä  $c_1 = 1,2$  mm  
ero  $d_1 = 3,1$  mm



## Painuma Platform-järjestelmä

Lähtöarvot: Puu kuivuu 13 % -> 8 % (3v kuluessa)

Materiaali: seinät liimapuu GL28c, välipohja viilupuu (Kerto-S)

Kuormitukset: otettu kyseisestä kohteesta

**Katon** painumaero 54,2 mm

**5. krs** kerroksen painuma  $a_5+b_5 = 9,4$  mm,  
lattian painumaero **51,5 mm** ( $a_1+a_2+a_3+a_4+b_2+b_3+b_4+b_5$ )

- kutistumasta

- seinä 2,6 mm, välipohja 6,4 mm

- puristumisesta

- seinä 0,1 mm, välipohja 0,3 mm

seinä  $a_5 = 2,7$  mm ja välipohja  $b_5 = 6,7$  mm

**4. krs** kerroksen painuma  $a_4+b_4 = 11,3$  mm,  
lattian painumaero **41,4 mm** ( $a_1+a_2+a_3+b_2+b_3+b_4$ )

- kutistumasta

- seinä 2,6 mm, välipohja 6,4 mm

- puristumisesta

- seinä 0,8 mm, välipohja 1,5 mm

seinä  $a_4 = 3,4$  mm ja välipohja  $b_4 = 7,9$  mm

**3. krs** kerroksen painuma  $a_3+b_3 = 13,2$  mm,  
lattian painumaero **29,5 mm** ( $a_1+a_2+b_2+b_3$ )

- kutistumasta

- seinä 2,6 mm, välipohja 6,4 mm

- puristumisesta

- seinä 1,4 mm, välipohja 2,8 mm

seinä  $a_3 = 4,0$  mm ja välipohja  $b_3 = 9,2$  mm

**2. krs** kerroksen painuma  $a_2+b_2 = 15,1$  mm,  
lattian painumaero **15,7 mm** ( $a_1+b_2$ )

- kutistumasta

- seinä 2,6 mm, välipohja 6,4 mm

- puristumisesta

- seinä 2,0 mm, välipohja 4,1 mm

seinä  $a_2 = 4,6$  mm ja välipohja  $b_2 = 10,5$  mm

**1. krs** kerroksen painuma  $a_1 = 5,2$  mm,  
lattian painumaero **0,0 mm**

- kutistumasta

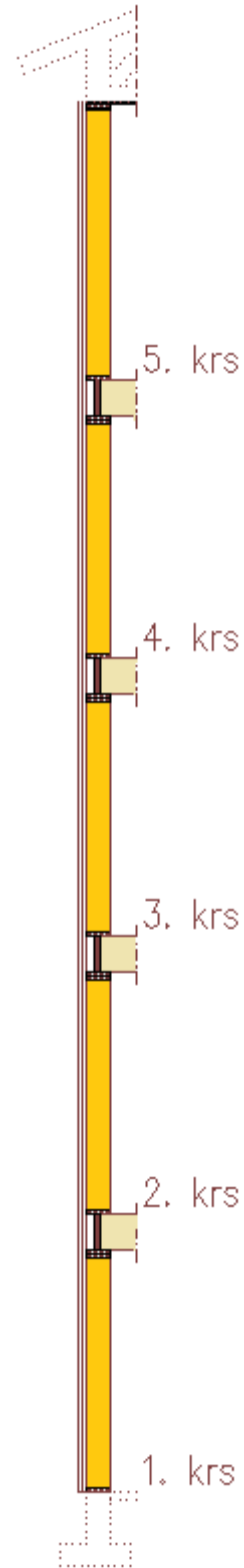
- seinä 2,6 mm

- puristumisesta

- seinä 2,6 mm

seinä  $a_1 = 5,2$  mm

Kerto-Q:ta käytettäessä kutistumisen aiheuttama painuma välipohjan osalta pienenee kymmenesosaan ja puristumisen kuudesosaan jokaisessa kerroksessa.



## 5.2 Tulosten vaikutukset rakennukseen

Platform-rakenteessa painuma on paljon suurempi kuin PuuERA-rakenteessa, mutta painuma on tasaista koko laatan alueella, eikä rakenteessa ole epäkeski-syyttä samassa suhteessa kuin PuuERA-rakenteessa. Platform-rakenteen painuma voidaan ottaa huomioon rakennusta suunniteltaessa ja painumiin pystytään varautumaan.

PuuERA-rakenteen painumien epätasaisuus on vaikeampi huomioida suunnittelussa. Palkkien ja seinien epätasainen painuminen voidaan todeta käytännössä vasta, kun rakenne on kuivanut ja virunut, eli käytännössä epäkohdat tulevat esille vasta reilun kolmen vuoden jälkeen. Epäkohtia ovat muun muassa tiiveys ja rakenteiden halkeilu, joista tiiveys on ensisijaisen tärkeä, koska tiiveys liittyy niin ääneneristävyyteen, lämmöneristävyyteen ja paloturvallisuuteen. Tiiviyttä on jälkikäteen vaikea paikata, kun ajatellaan rakennuksen kokoa ja laajuutta.

## 6 PÄÄTELMÄT

Rakennuksen painumien laskenta on itse asiassa arviointia. Vaikuttavia asioita on niin paljon, ettei kaikkia pysty ottamaan huomioon kaavamaisen tarkasti, vaan on ajateltava itsenäisesti, kuinka rakenne oikeasti käyttäytyy. Kosteuden vaihdellessa vuoden aikana aiheutuu rakenteeseen vuoroin kutistumista ja vuoroin turpoamista. Turpoaminen ei yleensä aiheuta vaurioita rakenteessa, koska turpoamisen aiheuttamaa poikkileikkauksen kasvamista pienentää elastisuudesta johtuva, kuormituksen aiheuttama kokoonpuristuvuus. Vaikka rakennuksen laskettu painuma on pieni, ei se tarkoita, että painuma todellisuudessa olisi niin pieni tai ettei muodonmuutoksia tapahtuisi.

Rakennuksen painumia on seurattava tarkemittauksilla, jos halutaan saada selville todellinen painuma, ja mittauksia on tehtävä eri olosuhteissa. Ensimmäinen mittaus tulisi tehdä heti rakennuksen valmistuttua, jotta alkutiedot saataisiin mahdollisimman tarkasti selville. Olosuhteiden muuttuessa tulee odottaa ennen uudelleen mittauksia, koska muutokset tapahtuvat hyvin hitaasti.

Esimerkiksi tammi–helmikuussa pitkän pakkaskauden jälkeen tehtäisiin yksi mittaus. Toinen keväällä maaliskuussa, kun aurinko on ruvennut jo lämmittämään seiniä. Kolmas kesällä heinäkuussa pitkän kuumien jaksojen jälkeen ja neljäs syksyllä syys–lokakuussa, kun vesi roiskuu ja home kasvaa. Rakenteiden kosteuskierto vakioituu 3–4 vuodessa, joten mittaustestejä kannattaisi tehdä myös ensimmäisen vuoden jälkeen.

PuuERA-rakenne on hyvä vaihtoehto platform-rakentamiselle, mutta se vaatii vielä kehitystä detaljitasolla, jotta sen virhealttiutta pienennettäisiin. Uutta rakennusjärjestelmää kehitettäessä ei saisi olla kiire, eikä saisi jättää mitään kehitettyjä tuotteita suunnittelun ulkopuolelle.

Tuloksissa esitetty PuuERA-rakenteen laskennallinen painumaero palkin kohdalla voi todellisuudessa olla huomattavasti suurempi. Laskennassa ei huomioitu seinän ulko-osan mahdollista turpoamista, ja liitteessä 1 olevien Dof-laskelmissa sisätilan suhteelliseksi kosteudeksi on määritetty 50 % jokaiselle kuukaudelle, vaikka todellisuudessa suhteellinen kosteus voi olla kesällä yli 60 % ja talvella alle 20 %. Laskennassa oletettu 8 prosentin loppukosteus voi todellisuudessa olla talvella pari prosenttiyksikköä alhaisempi. Ulkoseinän turpoaminen lisää painumaeroa 0,5–1 mm ja alhaisempi loppukosteus noin 1 mm. Raon mahdollinen muodostuminen olisi hyvä selvittää koerakenteella (seinän ja välipohjanliitos). Koerakennetta olisi hyvä kuormittaa ja kuivata, jotta selviäisi tuleeko kutistumisesta ongelmia. Jos koerakenteeseen syntyy rako palkkien välille, voisi tulevissa rakennuksissa tiivyyttä parantaa asentamalla syntyvän raon kohdalle paisuvan tiivistysnauhan.



Hissikuiluun liittyminen ei tule ongelmaksi PuuERA-rakenteessa, koska rakenteen kokonaispainuma on niin pieni. Platform-rakenteessa hissikuiluun liittyminen vaatii enemmän suuriin painumisiin varautumista (esimerkiksi suuremmat hissin oviaukot, pystysuunnassa joustavat liitokset, hissin kynnysratkaisu). PuuERA-rakenteessa perustuksien epätasainen painuminen voi aiheuttaa enemmän ongelmia hissikuiluun liittymiseen, kuin kuivumisen ja kuormituksen aiheuttama painuminen.

## KUVAT

Kuva 2.1 Puun rungon poikkileikkaus, s. 8

Kuva 2.2 Puun soluseinämän rakenteen yleiskuvaus, s. 9

Kuva 2.3 Tasapainokosteus ilman kosteuden ja lämpötilan mukaan, s. 10

Kuva 2.4 Periaatepiirros sorption kuvaajasta, s. 12

Kuva 2.5 Kuivumisen aiheuttama käyristymä, s. 13

Kuva 2.6 Kuivumisen aiheuttama halkeilu, s. 13

Kuva 2.7 Puun muodonmuutokset kutistumisesta, s. 14

Kuva 2.8  $S_I$  kokonaismuutosprosentti, s. 16

Kuva 2.9 Sahattujen kappaleiden kutistumismuodonmuutoksia, s. 17

Kuva 2.10 Kuormituksen vaikutus viruman suuruuteen, s. 22

Kuva 2.11 Murtolujuuden suhde aikaan, s. 23

Kuva 2.12 Puun sisäiset jännitykset kuivauksesta a) alussa b) lopussa, s. 26

Kuva 2.13 Pintakerroksen ja sisäosan jännityksen ajan kuluessa, s. 27

Kuva 3.1 Puun tehollinen leveys halkeamissa, s. 31

Kuva 4.1 Alapohja, s. 32

Kuva 4.2 Seinien pystytys, s. 33

Kuva 4.3 Välipohja, s. 33

Kuva 4.4 Toisen kerroksen seinät, s. 34

Kuva 4.5 Katto, s. 34

Kuva 4.6 Platform-rakenteen välipohjan liitos, s. 35

Kuva 4.7 Jatkuvat seinät, s. 36

Kuva 4.8 Välipohjan tuenta seinälinjalle, s. 38

Kuva 4.9 Palkkien suuntaisen seinän liitos, s. 39

Kuva 4.10 Kantava väliseinä, s. 40

Kuva 5.1 PuuERA, välipohjan liitos seinään, s. 41

Kuva 5.2 PuuERA, välipohjan liitos palkkien suuntaiseen seinään, s. 42

Kuva 5.3 Platform, rakenne, s. 43

Kuva 5.4 PuuERA-järjestelmän painumatulosten merkintä, s. 44

Kuva 5.5 Platform-järjestelmän painumatulosten merkintä, s. 44

## TAULUKOT

Taulukko 2.1 Puun tasapainokosteudet, s. 11

Taulukko 2.2 Muodonmuutoskertoimia amerikkalaisille puulajeille, s. 15

Taulukko 2.3 Kertopuun muodonmuutoskertoimet, s. 18

Taulukko 2.4 Eräiden puulajien lämpötilakertoimia, s. 21

Taulukko 3.1  $k_{\text{mod}}$ -kerroin, s. 28

Taulukko 3.2 Virumakertoimen  $k_{\text{def}}$ -arvoja, s. 29

## KAAVAT

Kaava 2.1 Tasapainokosteuspitoisuus, s. 10 (STEP 1, 1996, A4/9)

Kaava 2.2 Tasapainokosteuspitoisuus, s. 11 (FPL, 2010, 4-3)

Kaava 2.3 Kosteuden aiheuttama muodonmuutos (6-14 %), s. 15 (FPL, 2010, 13-15)

Kaava 2.4 Kosteuden aiheuttama muodonmuutos (<30 %), s. 16 (FPL, 2010, 13-17)

Kaava 2.5 Lämpölaajeneminen, s. 20 (Kärkkäinen, 2007, s.242)

Kaava 2.6 Käyristyminen, s. 24 (Liimapuukäsikirja, 2002, s.66)

Kaava 2.7 Kuormituksen aiheuttama muodonmuutos, s. 25

Kaava 2.8 Hooken laki, s. 25

Kaava 2.9 Kosteuden aiheuttama jännitys, s. 26

Kaava 3.1  $k_{\text{mod}}$ -kerroin, s.28 (Kevarinmäki, 2010, s.15)

Kaava 3.2 Hiipumaluku, s. 29 (Liimapuukäsikirja, 2002, s.46)

Kaava 3.3 Kimmokerroin, viruma huomioitu, s.29 (Liimapuukäsikirja, 2002, s.46)

Kaava 3.4 Kokonaispainuma, viruma huomioitu, s. 30 (SFS-EN 1995-1-1, 2010, s.19)

Kaava 3.5 Kokoonpuristuma, johdettu Hooken laista, s. 30

## LÄHTEET

Avoim puurakennejärjestelmä. 2009. Liittymädetaljit. Puuinfon julkaisuja.

[http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/kirjasto/asuinrakennuksen-rakennetyypit-ja-detaljit/liittymadetaljitnormitalop3pdf\\_0.zip](http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/kirjasto/asuinrakennuksen-rakennetyypit-ja-detaljit/liittymadetaljitnormitalop3pdf_0.zip) (Luettu 4.2.2011)

FPL. Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. 2010. United States Department of Agriculture, Forest Service, Research and Development, Forest Products Laboratory. [http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl\\_gtr190.pdf](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf) (Luettu 4.2.2011)

Insinööritoimisto Puolanne. 2011. PuuERA-rakennejärjestelmän detaljit

Kevarinmäki, A. 2010. 2.painos. Eurokoodi 5 Puurakenteiden suunnittelu - lyhennetty suunnitteluohje. Puuinfon julkaisuja.

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/kirjasto/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/100204-eurokoodi-5-lyhennetty-suunnitteluohje-web-310111.pdf> (Luettu 4.2.2011)

Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Hämeenlinna: Karisto.

Liimapuukäsikirja. 2002. Puuinfon julkaisuja.

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/kirjasto/liimapuukasikirja/Liimapuukäsikirja.pdf> (Luettu 4.2.2011)

RIL 205-1-2009. 2009. Puurakenteiden suunnitteluohje.

Siikanen, U. 2008. Puurakentaminen. Tampere: Rakennustieto Oy.

SFS-EN 1995-1-1. 2008. Eurokoodi 5 Puurakenteiden suunnittelu Osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

STEP 1. 1996. Puurakenteet. Tampere: Rakennustieto Oy.

Viljakainen, M. 2005. Avoin puurakennusjärjestelmä-suunnitteluperusteet. Puuminfon julkaisuja. [http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/kirjasto/avoin-puurakennusjarjestelma/Suunnitteluperusteet\\_koko\\_ohje.pdf](http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/kirjasto/avoin-puurakennusjarjestelma/Suunnitteluperusteet_koko_ohje.pdf) (Luettu 4.2.2011)

VTT sertifikaatti no: 184/03. Kertopuun sertifikaatti.

[http://www.finnforest.fi/tuotteet/kerto/Documents/Kerto\\_VTT\\_CertificateNo184-03\\_Revision\\_24\\_March\\_2009.pdf](http://www.finnforest.fi/tuotteet/kerto/Documents/Kerto_VTT_CertificateNo184-03_Revision_24_March_2009.pdf) (Luettu 4.2.2011)