Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan
korkeakoulu

Kemian tekniikan korkeakoulu
Puunjalostustekniikan koulutusohjelma

Emil Jansson

CLT-rakennuskomponentin halkeilun hallinta urittamalla ja toiminta pientalon sisäilmastossa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 5.5.2015
Valvoja: Professori Lauri Rautkari
Ohjaaja: Professori Hannu Hirsi

Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan korkeakoulu

Aalto-yliopisto, PL 11000, 00076 AALTO
www.aalto.fi

Diplomityön tiivistelmä

Tekijä Emil Jansson

Työn nimi CLT-rakennuskomponentin halkeilun hallinta urittamalla ja toiminta pientalon sisäilmastossa

Laitos Puunjalostustekniikan laitos

Professuuri Puutuotetekniikka **Professuurikoodi** Puu-28

Työn valvoja Prof. Lauri Rautkari

Työn ohjaaja(t)/Työntarkastaja(t) Prof. Hannu Hirsi

Päivämäärä 5.5.2015 **Sivumäärä** 116+7 **Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Ristiinliimattu massiivipuu (CLT) on levymäinen monikäyttöinen rakenteellinen insinööripuutuote. Tuotteen ongelmana on, että se halkeilee pinnastaan ja se haittaa levyjen hyödyntämistä näkyvissä kohteissa. Työssä tutkittiin CLT:n halkeilukäyttäytymistä. Tavoitteena oli selvittää halkeiluun vaikuttavia tekijöitä ja esittää keinoja halkeilun estämiseksi (mm. urittamalla pintaa).

Työn kirjallisuusosuudessa perehdyttiin näkyvän CLT:n vuorovaikutusilmiöihin suhteessa sisäilmaan, pinnankäsittelyyn, energiankulutukseen, sekä halkeiluun ja uritukseen. Kirjallisuustutkimus osoitti, että sisäilmaan suorassa yhteydessä olevat suuret puupintaalat ja puumassat kykenevät vähentämään sisäilman kosteuden vaihtelua ja kiinteistön lämmitys- ja jäähdytysenergian tarvetta. Jotta edellä kuvatut hyödyt voidaan saavuttaa, tulee puupinnan olla yhteydessä huoneilmaan siten, ettei sitä peitetä levyillä tai kosteutta läpäisemättömällä kalvolla.

Pintakäsittelyaineen valinta vaikuttaa CLT:n ilmeeseen, halkeiluun ja edellä mainittuihin funktionaalisiin ominaisuuksiin. Peittävät ja sulkevat pintakäsittelyt vähentävät puun kosteuselämistä ja täten vähentävät halkeilutaipumusta. Toisaalta taas, kuultavat pintakäsittelyt sallivat kosteuden siirtymisen huoneilman ja rakenteen välillä, ja jättävät puun pintakuvion näkyviin. Kokeiden perusteella peittävät pintakäsittelyt korostavat syntyneitä halkeamia. Toiminnallisista ja visuaalisista syistä CLT:lle suositellaan kuultavia, vesihöyrynläpäisyn sallivia vahakäsittelyitä, joilla halkeilu ei korostu.

Työssä kokeiltiin pintaan työstetyn urituksen toimintaa halkeilun estämiseksi ja haittojen vähentämiseksi. Uritustyyppejä oli kolme: suora ura, vino ura ja laakea pyöristetty ura. Urat kohdistettiin pintalamellien väliseen liimasaumaan. Halkeilua testattiin syklisellä kosteusrasituksella ja tulosten perusteella parhaiten toimi vino ura, joka esti halkeamien syntyä tehokkaasti. Suoralla uralla pystyttiin lieventämään halkeilun aiheuttamia haittoja. Pyöreä ura ei toiminut halkeilun estämisessä. Urituksen halkeilua hillitsevä vaikutus perustuu yhdistelmään optisesta näköestevaikutuksesta ja CLT-pintakerroksen jännitysjakauman muutoksesta. Halkeilun todettiin keskittyvän suurella todennäköisyydellä uran pohjalle. Kokeessa testattu liimapuusisustuslevy ei soveltunut CLT:n pintakerrokseksi.

Halkeilu syntyy levyssä olevista jäännösjännityksistä, lamellien välisestä syysuuntaerosta ja puun kosteuselämisestä. Työn johtopäätöksissä esitettiin pohdintoja, joilla halkeilutaipumukseen voidaan vaikuttaa.

Avainsanat CLT, halkeilu, sisäilma, pintakäsittely, uritus, puu, liimalaminaatti

Aalto University
School of Chemical Technology

Aalto University, P.O. BOX 11000, 00076
AALTO
www.aalto.fi

Abstract of master's thesis

Author Emil Jansson

Title of thesis Surface cracking prevention with grooves in CLT construction component exposed to indoor climate

Department Department of Forest Products Technology

Professorship Wood Product Technology **Code of professorship** Puu-28

Thesis supervisor Prof. Lauri Rautkari

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) Prof. Hannu Hirsi

Date 5.5.2015 **Number of pages** 116+7 **Language** Finnish

Abstract

Cross-Laminated Timber (CLT) is a slab-type multipurpose engineered wood product. The key issue with CLT is the tendency of surface cracking, which prevents the use of these panels in visual locations. This thesis studied the surface cracking phenomenon of CLT. The aim was to study the factors affecting the crack formation and present methods for decreasing the cracking tendency (e.g. grooving of the surface).

The literature review focused on interactions of CLT with indoor air, surface coatings, energy consumption, cracking and grooving. The study revealed that vast wooden surfaces and large masses of wood, which are connected to indoor air, are able to decrease the variation of indoor humidity and decrease the energy consumption of heating and cooling of the building. For these benefits to be utilized, the wood surface must not be covered with sheeting or with film-forming coating, with low permeability.

The selection of coating material will affect the visual look of CLT, as well as the cracking tendency and functional properties. Sealing coating materials will decrease the amount of moisture movements in wood, and thus decrease cracking tendency. However, translucent coatings can allow water-vapor to transfer between indoor air and wooden structure, while leaving the visual structure of wood still visible. According to tests, sealing matte coatings will emphasize the cracks which form to the surface. For functional and visual reasons, translucent wax coatings with vapor permeability are recommended.

Thesis included an experimental phase, in which surface grooving of CLT was tested for prevention and diminishing of cracks. Three groove variants were tested: straight groove, tilted groove, and rounded groove. The grooves were aligned to the seam of surface lamellas. The test included cyclic moisture exposure and the results revealed that the tilted groove was able to effectively reduce the cracking tendency of CLT. The straight groove was able to diminish the effects of cracking by partially hiding it. The rounded groove did not function appropriately. The effect was concluded to be a combination of visual blocking of cracks and change in tension distribution in surface layer. The cracks were likely to form in to the bottom of the grooves. Interior glue board laminate was not suitable for CLT surface layer substitution.

Cracking phenomenon is a result of residual stresses in the panel, differences in interlamella grain direction and moisture movements of wood. In the conclusions of the thesis, some methods for affecting the cracking tendency of CLT are described.

Keywords CLT, cracking, indoor, climate, surface, coating, grooving, wood, glue laminate

Alkusanat

Työ toteutettiin Stora Enso Oy:n ja Tikkurila Oy:n avustuksella. Työn suunnittelussa olivat osallisena Miikka Vainio (Stora Enso Puumerkki), Tuomas Salila (Stora Enso Buiding and Living), Jussi Kemppi (Tikkurila puuteollisuusmaalit), Arto Nummela (Tikkurila puuteollisuusmaalit), Jorma Katainen (Vivola Oy), arkkitehti Heikki Viiri ja perhe Lundqvist.

Työn valvojana toimi apulaisprofessori Lauri Rautkari, ja työn ohjaajana professori Hannu Hirsi. Haluan kiittää kaikkia työn suunnitteluun ja toteutukseen osallistuneita, erityisesti Miikka Vainiota tutkimuksen mahdollistamisesta. Ohjaajalle ja valvojalleni haluan osoittaa kiitokset tuesta ja kannustuksesta työn parissa, sekä koulutuksen aikana saamistani arvokkaista ja innostavista opetuksista ja mahdollisuuksista. Lisäksi suuri kiitos kuuluu rakennetekniikan laboratorion työntekijöille, joiden tuella kykenin toteuttamaan diplomityön kokeellisen osion.

Osoitan myös kiitokseni tukijoukoista tärkeimmälle, rakkaalle vaimolleni. Kiitos tuesta ja kannustuksesta Elisa.

Espoo 5.5.2015

Emil Jansson

Sisällysluettelo

Tiivistelmä / Abstract
Alkusanat
Sisällysluettelo ... 6
Merkinnät ... 8
Lyhenteet ... 9
1 JOHDANTO ... 10
1.1 Työn taustat, rajaus ja tavoitteet ... 10
1.2 Työn rakenne ... 10
2 CLT RAKENNUSMATERIAALINA ... 12
2.1 Yleisesti ... 12
2.2 CLT-tyypit ja tuotevariaatiot ... 13
2.3 Valmistus ... 15
2.3.1 Prosessikuvaus ... 15
2.3.2 Raaka-aineen käsittely, lajittelu ja lamellien valmistus ... 16
2.3.3 Ladonta, liimaus ja puristus ... 18
2.3.4 Aihion jälkikäsittely ja CNC-työstöt ... 19
3 PUUMATERIAALIN LUJUUS- JA KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA ... 21
3.1 Sahatavaran kuivauksen vaikutus CLT tuotannossa ... 21
3.2 Puusolukon kosteusreaktiot ... 22
3.2.1 Puusolukon rakenne ... 22
3.2.2 Kuusisolukon aspiraatio ... 25
3.2.3 Puun hygroskooppisuus ja kosteuseläminen ... 26
3.2.4 Materiaalin sisäiset jännitykset ... 29
3.3 CLT:n pintahalkeilu ja uritus ... 31
3.3.1 Kuivauksen ja ladonnan vaikutus pintahalkeiluun ... 31
3.3.2 Lamellin muodon ja syysuunnan vaikutus halkeiluun ... 33
3.3.3 Urituksen mahdollisuudet halkeilun estämiseksi ... 35
4 PUUN PINTAKÄSITTELY SISÄKÄYTÖSSÄ ... 38
4.1 Vaatimukset pintakäsittelylle sisäkäytössä ... 38
4.2 Pintakäsittelyaineen tyypillinen koostumus ... 40
4.3 Erityyppiset maalituotteet ja niiden koostumus ... 41
4.3.1 Maaliseoksen komponenttien suhde ... 41
4.3.2 Komponenttien valinta ... 42
4.3.3 Maalijärjestelmän vaihtoehdot ... 43
4.4 Pintakäsittelytekniikat ... 45
4.4.1 Ruiskumaalaus ... 46
4.4.2 Telakonepinnoitus ... 48
4.4.3 Valukonepinnoitus ... 48
4.5 Pintakäsittelyn vesihöyrynläpäisykyky ja siihen vaikuttavat tekijät ... 49
4.5.1 Diffuusio ja vesihöyrynläpäisykyky ... 49
4.5.2 Polymeerin vaikutus permeabiliteettiin ... 50
4.5.3 Pigmentoinnin vaikutus permeabiliteettiin ... 52
4.5.4 Kalvonpaksuuden vaikutus permeabiliteettiin ... 54
4.6 Pintakäsittelyn vaikutus CLT:n halkeiluun ... 55
5 PUUNKÄYTÖN VAIKUTUKSET SISÄILMAAN SUOMESSA ... 57
5.1 Puun terminen massa ja huoneilman lämpötila ... 57
5.2 Puun kosteuspuskurointikapasiteetti ja huoneilman kosteus ... 62
5.3 Arvio CLT-rakenteen vaikutusmahdollisuuksista sisäilman laatuun ... 69

5.4 CLT:n hygrotermisten ominaisuuksien hyödyntäminen ja älykkäällä talotekniikalla saavutettavat energiansäästöt ... 70
6 MATERIAALIT JA TUTKIMUSMENETELMÄT ... 74
6.1 Halkeaman määrittely ja halkeamamittausten suoritus ... 74
6.2 Esikokeet ... 75
6.3 Varsinaisen koesarjan käsittelyt ... 75
6.4 Koekappalesarjat ja –merkinnät ... 79
6.5 Tulosten käsittely ... 79
6.6 Tilastollinen analyysi ... 81
7 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU ... 83
7.1 Koesyklit ... 83
7.2 Halkeilukokeiden tulokset ... 84
7.3 Käsittelyryhmien tilastollinen vertailu ... 85
7.4 Uritustapojen vertailu ... 85
7.5 Effex-pintalamellin toiminta ... 88
7.6 Urituksen toteutettavuus ja esteettinen arvio ... 90
7.7 Pintakäsittelyn ja tasaannutuskosteuden vaikutukset ... 90
7.8 Urituksen vaikutus pintakäsittelyn suorittamiseen ... 91
8 CASE: VILLA LYCKA ... 92
9 JOHTOPÄÄTÖKSET ... 96
9.1 Huomiot urituskokeiden tuloksista ja onnistumisesta ... 96
9.2 Urituksen hyödyt ja toiminta CLT:n halkeilun hallinnassa ... 98
9.3 Halkeilun alkuperä ja muut keinot halkeilun vähentämiseksi ... 99
9.4 CLT materiaaliominaisuuksien ja halkeiluilmiön tutkimuksen merkittävyys ... 102
9.5 CLT:n pintakäsittely ja urituksen vaikutus ... 103
9.6 CLT:n toiminta sisäilmastossa ... 104
9.7 Suositukset ja ehdotukset urituksen suhteen ... 105
9.8 Suositukset jatkotutkimuksen suhteen ... 107
10 YHTEENVETO ... 109
LÄHDELUETTELO ... 113
Liiteluettelo ... 117
Liitteet

Merkinnät

A	mm^2	*Halkeama-ala*
A_0	-	*Lämpötilan amplitudi sisäpuolella*
A_e	-	*Lämpötilan amplitudi ulkopuolella*
D_w	$kg*m^{-3}$	*Kosteusdiffusiviteetti*
MBV	$g*m^3 / \%RH$	*Kosteuspuskurointikapasiteetti*
P	h	*Lämpöimpulssin kesto*
S	m^2	*Vaikutuspinta-ala*
T_0^{max}	$°C$	*Maksimilämpötila sisärajapinnassa*
T_0^{min}	$°C$	*Minimilämpötila sisärajapinnassa*
T_e^{max}	$°C$	*Maksimilämpötila ulkorajapinnassa*
T_e^{min}	$°C$	*Minimilämpötila ulkorajapinnassa*
a	m^2 / s	*Materiaalin terminen diffuusiokyky*
a_w	$(g*m^{-2}) / d$	*Vedensidontakyky*
b	$(W*s^{½}*m^{-2}) / K$	*Materiaalin terminen effuusiokyky*
b_m	$kg / (m*s*Pa)$	*Kosteuseffusiviteetti*
c_p	$J / (K*kg)$	*Ominaislämpökapasiteetti*
d_p	m	*Tunkeumaetäisyys*
$d_{p,1\%}$	m	*Tunkeumaetäisyys, jossa vaihtelun suuruus 1%*
f	-	*Lämpöalenematekijä*
p_{sat}	Pa	*Kylläisen vesihöyryn paine*
t_p	s	*Vaikutusajanjakson pituus*
$t_{T_0^{max}}$	h	*Ajanhetki, jolloin sisälämpötila maksimissa*
$t_{T_e^{max}}$	h	*Ajanhetki, jolloin ulkolämpötila maksimissa*
x_n	mm	*Halkeamasuorakulmion leveys*
y_n	mm	*Halkeamasuorakulmion pituus*
Δm	kg	*Massan muutos*
Δu	$\%$	*Kosteussisällön muutos*
$\sigma_{t,max}$	N / mm^2	*Maksimivetojännitys*
δ_p	$kg / (m*Pa*s)$	*Vesihöyryn läpäisevyys eli permeabiliteetti*
ϕ	h	*lämpötilan aikaviive*
λ	$W / (K*m)$	*Lämmönjohtavuus*
ρ	kg / m^3	*Tiheys*
ξ_v	$kg / \%RH$	*Volumetrinen kosteuskapasiteetti*

Lyhenteet

1K-PUR	Yksikomponenttinen polyuretaanihartsi
CDD	Jäähdytystarveluku
CLT	Ristiinlaminoitu massiivipuu
CNC	Numeerinen ohjaus
CPVC	Kriittinen pigmentin tilavuuskonsentraatio
DEDAB	Dodesyylietyylidimetyyli ammoniumbromidi
EPI	Emulsiopolymeeri-isosyanaattihartsi
HDD	Lämmitystarveluku
HEC	Selluloosan hydroksietyylieetteri
IVI	Teollinen näkyvä pintalaatu
MDF	Kuitulevy
MF	Melamiiniformaldehydihartsi
MUF	Melamiiniureaformaldehydihartsi
NPEP	Nonyylifenoli etoksifenoksylaattiaddukti
NVI	Näkyvä pintalaatu
OSB	Suunnattu suurlastulevy
PAQ	Aistittu ilmanlaatu
PRF	Fenoliresorsinoliformaldehydihartsi
PVC	Pigmentin tilavuuskonsentraatio
RH	Suhteellinen kosteus
RHS	Suhteellisen kosteuden mukaan säätyvä
SDS	Natriumdodesyylisulfaatti
TBP	Tributyylifosfaatti
UV	Ultravioletti
VI	Näkyvä pintalaatu

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustat, rajaus ja tavoitteet

CLT:n (Cross-Laminated Timber) eli ristiinliimatun massiivipuun hyödyntäminen sisäilmanlaadun ja rakennuksen energiatehokkuuden parantamisessa on pitkälti vielä tutkimatta. Nyt jo tiedetään, että avoimet puupinnat lisäävät rakenteen kosteuspuskurointikapasiteettia, joka aistitaan miellyttävämpänä ja tasaisempana huoneilmanlaatuna. CLT:llä on massiivisena puutuotteena suuri kapasiteetti toimia rakenteellisen tarkoituksensa ohella toiminnallisena osana rakennuksen sisäilman säätelyssä, edellyttäen, että CLT-pinnat voidaan jättää näkyville. Visuaalinen ja hengittävä CLT-pinta tarjoaa suoran rajapinnan vallitsevaan sisäilmastoon. Toistaiseksi tämän rajapinnan ilmiöistä ja pinnan variaatioista, kuten erilaiset pintatyöstöt ja -käsittelyt, ei löydy kattavaa tutkimustietoa. Tämän työn puitteissa pyrkimyksenä on CLT-tuotteiden arvonlisäys visuaalisuuden, funktionaalisuuden ja arkkitehtuurin kautta. Suomessa tällaisia ratkaisuja voidaan kokeilla vasta pientalorakentamisessa.

Keskeiseksi ongelmaksi CLT:n käytössä näkyvänä materiaalina on todettu materiaalin pintahalkeilu. Halkeilun seurauksena näkyvien pintojen esteettisyys kärsii merkittävissä määrin, eikä halkeiluilmiön hallitsemiseksi ole kehitetty keinoja. Kiteyttäen, ristiinliimattu massiivipuu ei vielä sovellu hyödynnettäväksi näkyvänä rakennuskomponenttina.

Tämän työn tavoite on tutkia ristiinliimatun massiivipuun halkeilukäyttäytymistä ja esittää keinoja sen hallitsemiseksi pintaa urittamalla, tai muilla keinoilla. CLT:n halkeiluongelmien ratkaisemiseksi ja laajojen puupintojen ja sisäilmaston vuorovaikutusilmiöiden tutkimiseksi, tavoitteena on koostaa soveltuvaa tutkimustietoa CLT:n toiminnasta Suomen olosuhteissa. Työn kokeellisessa osuudessa keskitytään mekaanisesti työstettyjen pintauritusten toimintaan kosteuselämisen, halkeilun ja pinnankäsittelyn kannalta. Kemialliset modifikaatiot rajataan työn ulkopuolelle, fokus kohdistetaan halkeilun hallintaan mekaanisin keinoin. Keskeinen hypoteesi on, että urittamalla saadaan lievitettyä pintalamelliin syntyviä syysuunnan vastaisia vetojännityksiä, jolloin halkeiluilmiö saadaan hallintaan. Urilla pyritään myös synnyttämään mahdollisille halkeamille otollinen ilmenemiskohta, jolloin halkeamien aiheuttama visuaalinen haitta lievenisi.

1.2 Työn rakenne

Työn kirjallisuusosio jakautuu karkeasti kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa käsitellään CLT:n valmistusta ja ominaisuuksia yleisesti. Kappaleessa käydään läpi tuotteen määritelmä ja yksinkertaistettu valmistusprosessi. Kappaleen lopussa kootaan yhteen tiivis analyysi uuden tuotteen mahdollisuuksista ja uhkista.

Kirjallisuusosan toisessa kappaleessa perehdytään ristiinliimatun massiivipuun ominaisuuksien lähtökohtiin ja raaka-ainevalinnan myötä syntyviin seurauksiin. Tarkoituksena on selvittää CLT:n halkeilutaipumuksen vaikuttimia raaka-aineen ja tuotteen rakenteen kautta. Kappaleessa käsitellään yleisesti aiheita sahatavaran kuivaushalkeilusta, valmiin tuotteen jännitysjakaumista ja mahdollisia keinoja CLT pintahalkeilun estämiseksi raaka-ainetta muokkaamalla.

Kirjallisuusosion kolmas osa keskittyy rakennukseen sijoitetun CLT:n ja loppukäyttäjän rajapintaan. Kappaleessa perehdytään pintakäsittelyyn visuaaliselta ja funktionaaliselta näkökulmalta. Lisäksi keskitytään CLT:n vuorovaikutusilmiöihin sisäilman kanssa ja arvioidaan kytköstä sisäilman laadun ja lämmitysenergian tarpeen välillä erityisesti Suomen olosuhteissa.

Työn kokeellinen osuus jaetaan kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa on suoritettu esikokeita, jossa CLT:n halkeiluilmiötä tarkastellaan vapaamuotoisemmin, ja pyritään löytämään toimivimmat ja mielenkiintoisimmat tapaukset ja parametrit varsinaisen koesarjan suorittamiseen. Varsinaisessa koesarjassa hankitaan vahvistus esikokeiden löydöksille neitseellisellä koemateriaalilla.

Työn lopussa kootaan havainnot työhön kytkeytyvästä pilottihankkeesta, jossa uritettua CLT:tä on kokeiltu. Lisäksi koostetaan johtopäätökset kokeiden ja kirjallisuustutkimuksen löydöksistä.

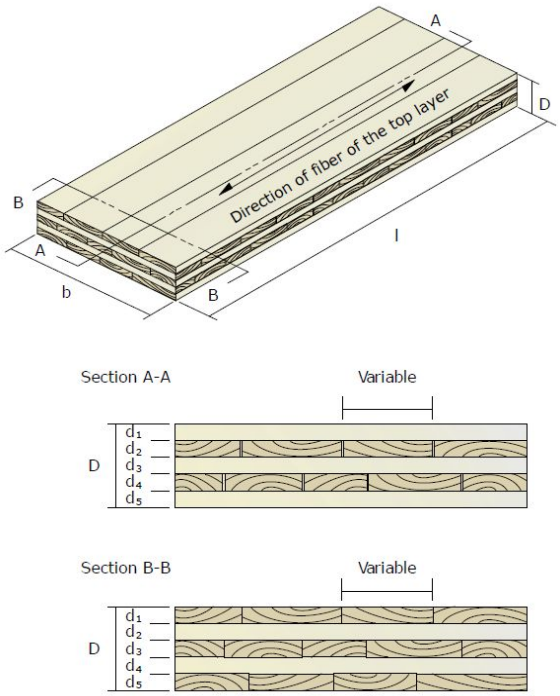
2 CLT RAKENNUSMATERIAALINA

Kappaleessa käydään läpi CLT-materiaalin yleiset ominaisuudet ja valmistus.

2.1 Yleisesti

Työssä viitataan ristiinliimattuun massiivipuuhun kansainvälisesti tunnetulla termillä CLT, joka on yleistynyt myös Suomessa valtamedian artikkeleissa ja uutisissa. Myös termiä kiintopuu on tarjottu suomenkieliseksi vastineeksi, mutta termi ei ole vielä laajaalaisesti vakiintunut.

CLT on luonteeltaan levymäinen rakennuspuutuote (Kuva 1), jonka periaate on samankaltainen kuin perinteisen liimapuun. Rakennesahatavara liimataan kerroksittain siten, että kerrosten välillä sahatavaran syysuunta käännetään kohtisuoraksi edelliseen kerrokseen nähden. Kerroksia on käytännössä aina pariton määrä, jotta rakenne säilyy symmetrisenä keskikerroksen suhteen. Yleisin raaka-aine CLT:n valmistuksessa on kuusi, joissain tapauksissa ja joiltain osin myös mänty tai lehtikuusi (Stora Enso 2012).



Kuva 1. CLT:n tyypillinen rakenne. (Gagnon et al. 2013, s. 5.)

Tuotteen rakenne vaihtelee jonkin verran valmistajasta riippuen, mutta yleisesti ottaen tällä hetkellä kaikki CLT-tuotteet ovat hyvin samankaltaisia. Vaihtelua esiintyy lähinnä lamellipaksuusjakaumissa ja käytetyssä liimassa tai liimaustavassa.

Ristiinliimattu massiivipuu muistuttaa läheisesti rakennettavuudeltaan ja käytettävyydeltään perinteistä betonielementtirakentamista (Gagnon et al. 2013, s.6), ja sen takia kynnys

CLT:n yleistymiseen rakennusteollisuudessa voidaan olettaa olevan matalampi. CLT-levyn tyypilliset käyttökohteet ovat myös hyvin samankaltaisia kuin betonielementtien. Massiivipuulevyn lujuus- ja käyttöominaisuudet puoltavat sen käyttöä välipohjissa, yläpohjissa sekä ulko- ja väliseinissä (Gagnon et al. 2013). Oikeilla eristysratkaisuilla CLT:tä voidaan käyttää myös alapohjassa. Mikään ei myöskään estä CLT:n käyttöä liittorakenteissa yhdessä perinteisten ranka-, teräs- tai betonirakenteiden kanssa (mts. 20).

2.2 CLT-tyypit ja tuotevariaatiot

CLT:n rakenne tarjoaa lukuisia mahdollisuuksia erilaisten erikoistuotteiden valmistamiseen, joissa esimerkiksi hyödynnetään muita insinööripuutuotteita pintakerroksena, jolloin saadaan tuotteelle tavoiteltuja visuaalisia tai akustisia ominaisuuksia.

Stora Enso ilmoittaa valmistamiensa CLT-levyjen maksimileveydeksi 2,95m ja pituudeksi 16m, tuotantotilojen ja logistiikan ehdoilla. Suurin tuotepaksuus on 40cm. Levyt jaotellaan useampaan kategoriaan kerrosrakenteensa, pintakerroksen suuntauksen ja pinnanlaadun perusteella. (Stora Enso 2012)

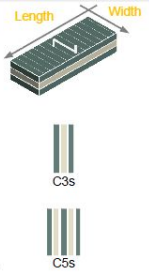
Tyypilliset paksuudet on esitelty taulukossa 1. Taulukosta ilmenee myös lamellien paksuudet ja lamellirakenne. Levyt voidaan tilata siten, että pintalamelli on käännetty levyn leveys- tai pituussuuntaan, jolloin se soveltuu tiettyihin kohteisiin paremmin ja tehokkaammin. Poikkeukset taulukon tiedoista ovat mahdollisia erikoistilauksissa.

CLT-levyt voidaan tilata kolmella eri pintalaadulla. Jaottelu tehdään pinnan visuaalisen ilmeen perusteella (Taulukko 2). Laadukkaammissa (VI ja IVI) luokissa pintaan valikoidaan vähäoksaisia ja virheettömiä pintalautoja. Piiloon asennettavat CLT elementit voidaan tilata ”ei näkyvällä” (NVI) laadulla, jossa sallitaan oksat ja muut puun luonnolliset virheet. Laatuluokkia voidaan valikoida levykohtaisesti siten, että toinen puoli valmistetaan esimerkiksi ei näkyvällä laadulla (NVI) ja toinen puoli näkyvällä laadulla (VI). Levyn pinta on aina hiottu, mutta heikoimmassa laadussa sallitaan jonkin verran työstöjälkeä pinnassa. (Stora Enso 2012)

Taulukko 1 Stora Enson tarjoamat CLT-variaatiot. Palstat vasemmalta oikealle: Nimellinen paksuus, rakennetunnus, kerrosten lukumäärä ja lamellikonfiguraatio. (Stora Enso 2012)

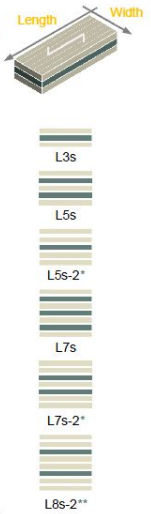
C panels

Nominal thickness [mm]	Designation [—]	Layers [—]	Lamella structure [mm]						
			C	L	C	L	C	L	C
60	C3s	3	20	20	20				
80	C3s	3	30	20	30				
90	C3s	3	30	30	30				
100	C3s	3	30	40	30				
120	C3s	3	40	40	40				
100	C5s	5	20	20	20	20	20		
120	C5s	5	30	20	20	20	30		
140	C5s	5	40	20	20	20	40		
160	C5s	5	40	20	40	20	40		



L panels

Nominal thickness [mm]	Designation [—]	Layers [—]	Lamella structure [mm]						
			L	C	L	C	L	C	L
60	L3s	3	20	20	20				
80	L3s	3	30	20	30				
90	L3s	3	30	30	30				
100	L3s	3	30	40	30				
120	L3s	3	40	40	40				
100	L5s	5	20	20	20	20	20		
120	L5s	5	30	20	20	20	30		
140	L5s	5	40	20	20	20	40		
160	L5s	5	40	20	40	20	40		
180	L5s	5	40	30	40	30	40		
200	L5s	5	40	40	40	40	40		
160	L5s-2*	5	60	40	60				
180	L7s	7	30	20	30	20	30	20	30
200	L7s	7	20	40	20	40	20	40	20
240	L7s	7	30	40	30	40	30	40	30
220	L7s-2*	7	60	30	40	30	60		
240	L7s-2*	7	80	20	40	20	80		
260	L7s-2*	7	80	30	40	30	80		
280	L7s-2*	7	80	40	40	40	80		
300	L8s-2**	8	80	30	80	30	80		
320	L8s-2**	8	80	40	80	40	80		



* Cover layers consisting of 2 lengthwise layers
** Cover layers and inner layer consisting of 2 lengthwise layers

Status: 04/2012

Taulukko 2. Stora Enson toimittamat laatuluokat ja niiden kriteerit. (Stora Enso 2012)

Surface quality appearance grade/Product characteristics			
CHARACTERISTICS	VI	IVI	NVI
Bonding	occasional open joints up to max. 1 mm width permitted	occasional open joints up to max. 2 mm width permitted	occasional open joints up to max. 3 mm width permitted
Blue stains	not permitted	slight discolouration permitted	permitted
Discolorations (brown stains, etc.)	not permitted	not permitted	permitted
Resin galls	no knot clusters, max. 5 x 50 mm	max. 10 x 90 mm	permitted
Bark ingrowth	occasional occurrences permitted	occasional occurrences permitted	permitted
Dry cracks	occasional surface cracks permitted	permitted	permitted
Core – pith	occasional, up to 40 cm long permitted	permitted	permitted
Insect damage	not permitted	not permitted	occasional small holes up to 2 mm permitted
Knots – sound	permitted	permitted	permitted
Knots – black	max. 1.5 cm Ø	max. 3 cm Ø	permitted
Knots – hole	max. 1 cm Ø	max. 2 cm Ø	permitted
Rough edges	not permitted	not permitted	max. 2 x 50 cm
Surface	100% sanded	100% sanded	max. 10% of surface rough
Quality of surface finish	occasional small faults permitted	occasional faults permitted	occasional faults permitted
Quality of narrow side bonding and face ends	occasional small faults permitted	occasional faults permitted	occasional faults permitted
Chamfer on L panels	yes	no	no
Rework edge of cut with sandpaper	yes	no	no
Machining – chainsaw	not permitted	permitted	permitted
Lamella width	≤ 130 mm	max. 230 mm	max. 230 mm
Wood moisture	max. 11%	max. 15%	max. 15%
Timber species mixture	not permitted	not permitted	permitted with spruce/silver fir, pine

VI Visible quality

IVI Industrial Visible quality

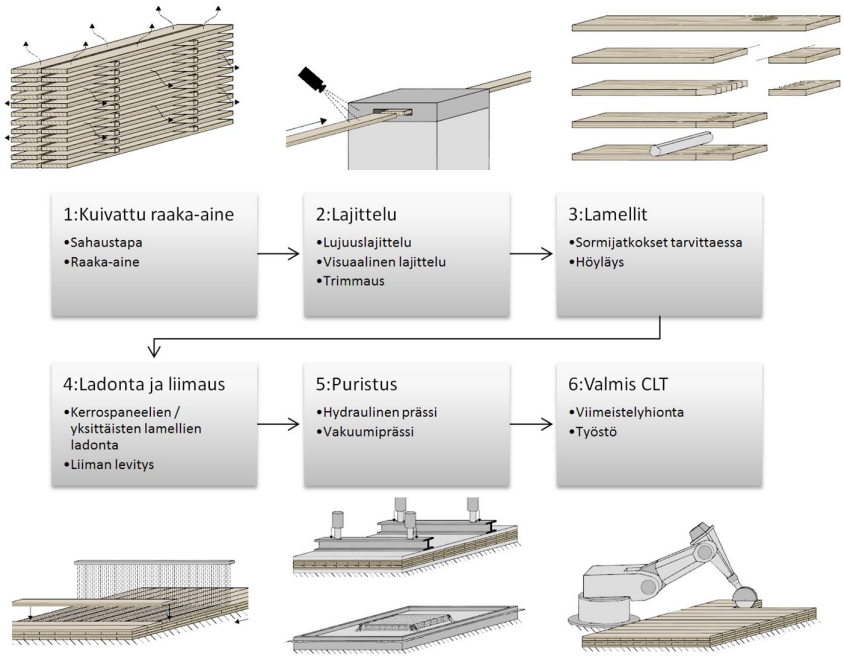
NVI Non-Visible quality

2.3 Valmistus

Kappaleessa käydään läpi tyypillinen CLT:n valmistusprosessi.

2.3.1 Prosessikuvaus

CLT:n valmistusprosessi on havainnollistettu pääpiirteittäin kuvassa 2. Eri vaiheiden sisällä on lukuisia muuttujia, jotka vaikuttavat lopputuotteen ominaisuuksiin radikaalisti. Lisäksi tuotantoprosessissa on muutamia vaihtoehtoisia vaiheita, riippuen tuotteesta ja valmistajasta.



Kuva 2. Yksinkertaistettu CLT valmistusprosessi. (Sovellettu suoraan lähteestä: Mestek et al. 2011)

Tyypillinen valmistusprosessi voidaan siis jaotella karkeasti kuuteen vaiheeseen poislukien laadunvarmistus ja pakkaus- ja varastointivaiheet. Aihion läpimenoaika prosessissa ilman jälkityöstöjä on Gagnon et al. (2013, s.9) mukaan noin 15-60 minuuttia riippuen tuotantolaitteista ja liimasta. Viisi ensimmäistä vaihetta vaikuttavat merkittävästi lopputuotteen teknisiin ja visuaalisiin ominaisuuksiin. Kuudes vaihe on lähinnä perustuotteen yksilöintiä tilaajan tarpeisiin. Vaiheet kuvataan yksityiskohtaisemmin seuraavissa kappaleissa.

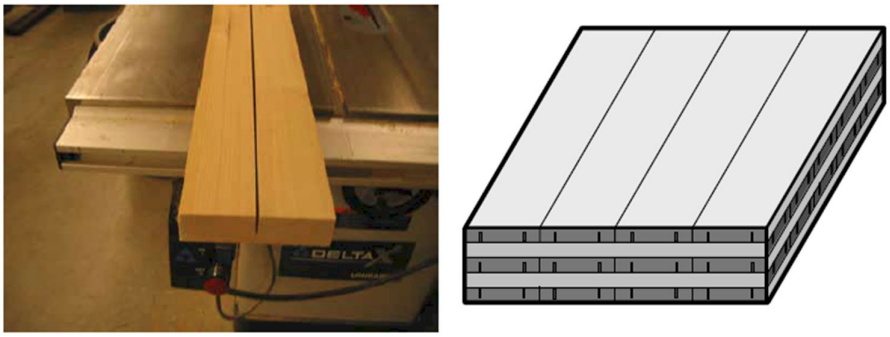
2.3.2 Raaka-aineen käsittely, lajittelu ja lamellien valmistus

Energiaintensiivisin ja kallein vaihe tuotannossa on raakalautojen kuivaus ja yleiset puutavaran kuivauksen lainalaisuudet pätevät myös tässä tapauksessa. Kuivauksessa syntyy materiaalihukkaa ja prosessin nopeuttaminen ja energiatehokkuuden lisääminen on haastavaa. Lisäksi prosessi vaatii tarkkaa valvontaa ja suunnittelua. Oikein suoritettu kuivaus on yksi tärkeimmistä vaikuttimista lopputuotteen laatuun. Jo ennen kuivausta suoritettu raaka-ainevalinta on tärkeää varsinkin siinä tapauksessa, kun pyritään tuottamaan näkyvää pintalaatua paneeliin, tämä asettaa vaatimuksia raaka-ainetoimittajalle, olkoon se ulkopuolinen sahalaitos tai tehtaan omaa tuotantoa. Suositeltu kosteus ennen liimausta ja ladontaa on noin 12 ±3%, joissain tapauksissa myös 8 ±2% (Yeh et al. 2013, s.11; Brandner 2013, s.6).

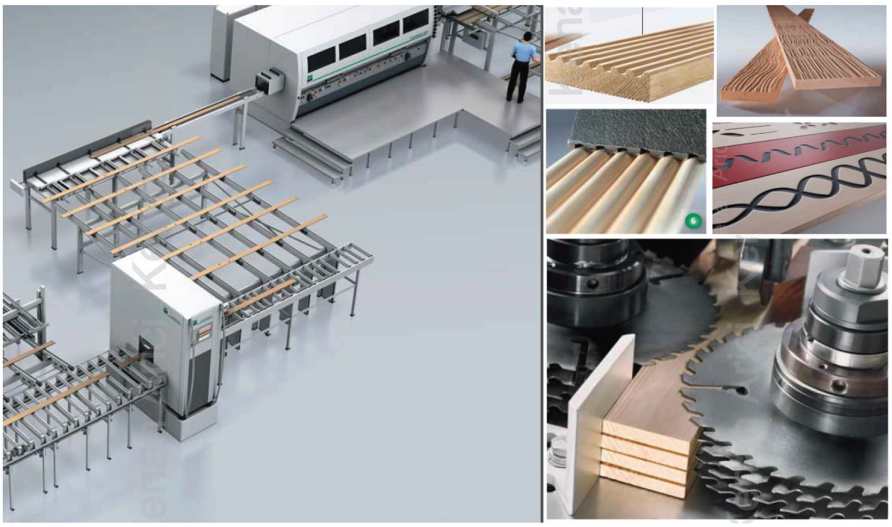
Tyypillisesti eurooppalainen CLT valmistetaan 20mm, 30mm, tai 40mm paksuisista lamelleista. Brander(2013, s.4) suosittaa yksittäisen laudan leveydeksi korkeintaan paksuuden nelinkertaa, vedoten vierintäleikkausilmiöön (ks. kappale 3.3.3) kerrosten välillä.

Useimmiten laudat höylätään neljältä sivulta, koska liiman tarttuvuuden kannalta vastahöylätty pinta on edullisin. Tärkeintä on kuitenkin varmistaa lautojen yhtäläinen paksuus prosessin jatkon kannalta (Brandner 2013, s.5). Kuivauksessa syntynyt hapettuma ja pienet muodonmuutokset saadaan poistettua kevyellä höyläyksellä. Samalla voidaan myös tarkkailla kuivauksen onnistumista, ja esimerkiksi tehdä mittauksia lamellien kosteuspitoisuudesta ja kosteusjakaumasta sekä –gradientista. Parhaassa tapauksessa lajittelun yhteydessä liian kosteiksi havaitut tai epätasaisesti kuivuneet lamellit poistetaan prosessista ja siirretään tasaantumaan. Yeh et al. (2013, s.11) suosittaa, ettei kahden vierekkäisen lamellin kosteusero saisi olla yli viittä prosenttia. Tämän tyyppinen menettely on heidän mukaansa mahdollista esimerkiksi online-mikroaaltokosteusmittausta hyödyntämällä.

Höyläyksen yhteydessä on mahdollista työstää lamellien reunat esimerkiksi ohjautuviksi ponttiliitoksiksi tai työstää varjouria lamellien nurkkiin. Yeh et al. (2013, s.14) mainitsee niin sanottujen tappourien työstämisen lamellien taakse vaikuttavan paneelin kosteuselämiseen ja mahdollisesti estävän kuivaushalkeamien esiintymistä (Kuva 3). Modernit CNC höylätyöstökeskukset mahdollistavat useiden työvaiheiden suorittamisen yhdellä kertaa, jolloin lamellien pinta voidaan urittaa ja kuvioida samalla kun lamelli mitallistetaan (Kuva 4).



Kuva 3. Tappourat lamellien taustapuolella. Vas. (Yeh et al. 2013), oik. (Brandner 2013).



Kuva 4. WeinigPowermat 2400 CNC-höylätyöstökeskus. (Michael Weinig AG 2014)

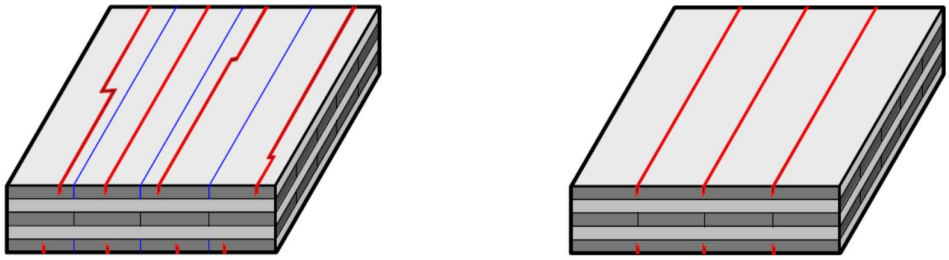
2.3.3 Ladonta, liimaus ja puristus

CLT-paneelin ladontaan on käytännössä kaksi eri lähestymistapaa. Perinteinen tapa on latoa yksittäisiä lamelleja aihioon. Vaihtoehtoinen tapa on muodostaa lamelleista valmiita kerrosaihioita, jotka sitten yhdistetään. Kumpaakin tapaa voidaan myös hyödyntää samanaikaisesti, jolloin esimerkiksi paneelin pituussuuntaiset kerrokset ovat valmiita kerrosaihioita ja poikittaiskerrokset ladotaan lamelli kerrallaan, tai päinvastoin. (Brandner 2013, s.10; Yeh et al. 2013, s.13)

Yksittäin ladotut lamellit on myös teoriassa mahdollista liimata syrjiltään, mutta kauttaaltaan liimattujen lamellien käsittely aiheuttaa hankaluuksia. Yeh et al. (2013, s.13) mukaan syrjäliimaus on suhteellisen harvinaista CLT valmistajien keskuudessa, mutta esimerkiksi Stora Enson CLT:ssä syrjäliimausta hyödynnetään. Brandner (2013, s.11) puhuu syrjäliimauksen ja kerrosaihioiden puolesta, sillä syrjäliimaus parantaa lopputuotteen mekaanisia ominaisuuksia ja tiiveyttä. Valmiista kerrospaneeleista koostettu CLT on aina syrjäliimattua. Etuna on myös pienempi paksuusvaihtelu, mikäli kerrospaneelin paksuus on tasattu syrjäliimauksen jälkeen. Tästä on merkittävää etua ajatellen liimausta ja puristusta. Brandner (mts.12) mainitsee myös, että kerrospaneeleja on mahdollista valmistaa halkaisemalla liimapuuta esimerkiksi vannesahalla, mikä saattaa olla jossain tapauksissa tehokkaampaa kuin erillisten kerrospaneelien valmistaminen.

Syrjäliimauksella on merkitystä myös lopputuotteen elinkaaren kannalta. Onnistuneesti syrjäliimattu tuote halkeilee ajan myötä satunnaisesti lamellisaumojen välissä, kun taas syrjäliimaamaton tai heikosti syrjäliimattu tuote halkeilee säännöllisesti rinnakkaisten lamellien välisen liimasauman kohdalta (Kuva 5). Koko paneelin kannalta tasaisempaa kosteuskäyttäytymistä ja pienempiä muodonmuutoksia edistää ladonta, jossa vierekkäisten

lamellien ydinpuu ja pintapuupuoli vuorottelee. Tällä on myös vaikutusta puristusvaiheessa kun lamellien käyristymien aiheuttamat häiriöt liiman leviämisessä minimoituvat ja lisäksi paneeliin syntyvät sisäiset jännitykset jakaantuvat tasaisemmin. (Yeh et al. 2013, s.13)



Kuva 5. CLT-paneelissa esiintyvien halkeamien käyttäytyminen syrjäliimatun (vas.) ja syrjäliimaamattoman (oik.) pintakerroksen tapauksessa. (Brandner 2013, s.11)

Liimana voidaan käyttää yleisimpiä puutuoteteollisuuden rakenneliimoja, kuten fenoliresorsinoliformaldehydi (PRF), emulsiopolymeeri-isosyanaatti (EPI), yksikomponenttien polyureetaani (1K-PUR), sekä melamiiniformaldehydi ja melaminiiureaformaldehydi (MF ja MUF). Tuotannossa suositaan usein vaaleita tai värittömiä liimoja, sekä tuotannollisista syistä useimmiten päädytään hartseihin, jotka eivät vaadi kuumapuristusta. Esimerkkejä huoneenlämmössä kovettuvista liimoista on yleisimpänä polyuretaani, tietyt resorsinolit sekä isosyanaatit. Polyuretaanin etuna on kyky tukkia ja tasata materiaalissa olevia virheitä, sillä se turpoaa kuivuessaan ja täyttää liimasaumassa olevia reikiä. (Yeh et al. 2013, s.4; Brandner 2013, s.11; Eckelman 1999, s.5-7)

Liimauksen jälkeen tapahtuva puristaminen on keskeinen vaihe koko tuotteen laadun kannalta. Puristuksen tehtävänä on tuottaa tasainen ja riittävä paine liimakerrokseen, jossa lamellien pinnanlaadussa olevat poikkeaman ja sahatavaran vääristymät kastuvat liimasta ja liimaantuvat hyvin. Toisaalta on varottava köyhdyttämästä liimasaumaa liikaa, jolloin liimasauma jää liian ohueksi ja heikoksi. Kaiken kaikkiaan puristukseen vaikuttaa eniten valittu liima, puulaji, liimattavien kappaleiden pinnanlaatu, liimanlevitysjärjestelmä ja levitysmäärä. (Brandner 2013, s.14)

2.3.4 Aihion jälkikäsittely ja CNC-työstöt

Puristuksen jälkeen aihiot käyvät läpi jälkikäsittelyvaiheet, joista tärkeimmät ovat trimmaus, hionta ja CNC-työstö asiakkaan tilauksen mukaan. Jälkikäsittelyn aikana on mahdollista suorittaa myös tarvittavia korjaavia toimenpiteitä, mikäli tuotteeseen on päässyt visuaalisia poikkeamia tai työstössä on puutteita. Tässä vaiheessa on myös mahdollista lisätä ei-kantavia pintakerroksia aihioon, kuten OSB-levyä tai kipsilevyä.

Trimmauksessa aihion reunat tasataan ja aihio mitallistetaan tarkasti jälkityöstövaiheita varten. Samalla poistetaan mahdollisesti huonommin liimautuneita reuna-alueita ja syrjäpuristuksesta mahdollisesti syntyneitä painumia ja poikkeamia. Työstölaitteistosta riippuen trimmaus voidaan toteuttaa myös CNC-työstön yhteydessä (Brandner 2013, s.18).

CLT-pinta on lähes poikkeuksetta hiottu, mikä on syytä ottaa huomioon pintakäsittelyssä. Joissain tapauksissa myös höyläys on mahdollista, mutta siinä on riskinä pinnan särkyminen ja tikkuuntuminen sekä hankaluutena on höyläkalustolta vaadittava kapasiteetti. Tavoitepaksuus voidaan säätää yleisesti ottaen noin 0,1mm tarkkuudella hionnassa (Yeh et al. 2013, s.15). Heikoimmissa CLT-laaduissa sallitaan poikkeamat ja hiomattomat kohdat aihiossa.

CNC-työstössä aihio muokataan asiakkaan toiveiden mukaiseksi, ja siihen työstetään tarvittavat aukot. Samalla työstetään myös talotekniikan vaatimat kanavat ja urat. Työstökeskus voi olla niin sanottu portaalityyppinen, joka liikkuu suhteessa aihioon tai perinteinen työstötasoon ja numeerisesti ohjattuihin varsiin perustuva. Työstössä voidaan toteuttaa muotoleikkaukset, jiirit, jyrsinnät, poraukset ja sahaukset tehokkaasti ja alle millimetrin tarkkuudella. Lopputuloksena on valmiita seinä-, katto- tai lattiaelementtejä piirustusten mukaisesti valmistettuna

3 PUUMATERIAALIN LUJUUS- JA KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA

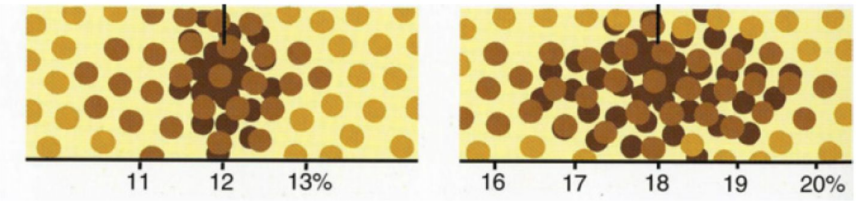
Kappaleessa perehdytään CLT raaka-aineen valmistukseen ja sen yhteyksiin tutkittavan halkeiluilmiön kannalta. Lisäksi kappaleessa tarkastellaan valmiin CLT-levyn ominaisuuksia ja halkeiluun vaikuttavia tekijöitä.

3.1 Sahatavaran kuivauksen vaikutus CLT tuotannossa

Sahatavaran kuivaus on monimutkainen optimointiprosessi, jossa parametreina on kustannukset, nopeus ja lopputuotteen laatu (PuuInfo 2011). CLT:n kannalta merkittävin seikka raaka-aineen kuivauksen osalta on se, että levytuote altistuu vaihteleville kosteusoloille sekä ulko- että sisäilmarajapinnassa. Lisäksi tuotantovaiheen vaatimukset kosteudelle, esimerkiksi liimauksessa, ovat yhtenä rajoitteena. Niin kuin muillakin rakennuksissa käytettävillä puumateriaaleilla, tuotteen loppukäyttökohde ja sijainti on otettava huomioon tuotannon alkuvaiheista alkaen.

Kuivumisen aiheuttamat laatu- ja saantopoikkeamat johtuvat puun hygroskooppisesta luonteesta. Kutistumat, vääntymät ja halkeilut aiheuttavat mahdollisia ongelmakohtia raaka-aineeseen, joiden vaikutukset kertaantuvat lopputuotteessa. Erityisesti työn aihepiirin kannalta merkittävintä on lamelliin jäävät sisäiset jännitykset sekä mahdollisesti kuivauksessa syntyvät halkeamat.

Niin kuin useasti puuteollisuudessa, tilastollinen epävarmuus on läsnä myös CLT:n valmistuksessa. Sahatavaran kuivauksen tulos on aina likipitäen normaalijakautunut, jolloin kuivauksen lopputulosta kuvaa lähinnä jakauman muoto ja keskiarvokosteuden tavoitteenmukaisuus. Lisäksi on huomioitava vielä tuloksen sisäinen keskiarvoistus, sillä sahatavarakappale ei suinkaan kuivu itsessään tasaisesti (ks. kuva 6), vaan mitattu kosteus on usein sahatavarakappaleen sisäinen keskiarvo. Keskihajonnan (s) ja tavoitekosteuden suhteella on peukalosääntönä pidetty yhteys, jolloin määrätyn kuivauserän tavoitekosteus vaihtelee n.10 % keskihajonnalla keskikosteuden ympärillä (Kuva 6). Yhteys ei enää päde tarkasti alhaisilla kosteusprosenteilla, mutta trendi on sama. Ilmiö on edullinen varsinkin yhdenmukaista kuivaustulosta tavoiteltaessa alhaisilla kosteusprosenteilla, kuten CLT-tuotannossa. (Welling et al. 2010, s.5) Mikäli tavoitekosteus on siis 9-10%, on keskihajonta enää luokkaa ±1-2%. On kuitenkin huomattava, että näin tiukoilla tavoitteilla, poikkeamien suhteellinen merkitsevyys on suurempi, toisin sanoen, epäonnistuneesti kuivatun kappaleen vaikutus lopputulokseen korostuu.



Kuva 6. Keskihajonnan (s) muutos suhteessa keskimääräisen tavoitekosteuden suuruuteen. Vasemmalla tavoite kosteus on 12% ja oikealla 18%. Hajonta (s) on huomattavasti kapeampi vasemmalla kuin oikealla.(Welling et al. 2010)

Sahatavaran poikkileikkauksen kosteusjakauma, eli kosteusgradientti, ei ole tasainen. Syy kosteusgradienttiin on se, että kuivaus etenee poikkileikkauksessa pinnasta lähtien, edeten hitaammin ja hitaammin kohti ydintä. Kosteuden liikkeisiin puusolukossa perehdytään tarkemmin kappaleessa 3.2.3. Kuivauksen kannalta kuitenkin on yhtä tärkeää olla tietoinen kosteusgradientin aiheuttamasta harhasta jos tarkkaillaan pelkästään keskiarvokosteutta. Usein laatumäärityksissä ei ole mainintaa kosteusjakaumasta, vaan asian oletetaan hoituvan epäsuorasti muilla laatuvaatimuksilla, sillä kosteusgradientti on yksi merkittävimmistä syistä kuivatun sahatavaran jäännösjännityksiin ja muodonmuutoksiin. (Welling et al. 2010, s.6)

Kuva 7. Havainnekuva kosteusjakaumasta äskettäin kuivatussa sahatavarakappaleessa. Kosteus on keskittynyt kappaleen keskiosiin ja pintaosat ovat huomattavasti kuivempia.

3.2 Puusolukon kosteusreaktiot

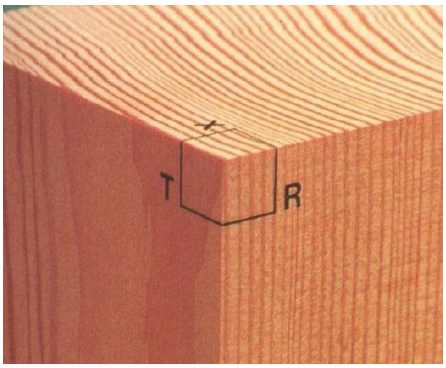
Kappaleessa perehdytään puusolukon perusrakenteeseen CLT-halkeiluilmiön näkökulmasta. Kappaleessa ei käsitellä puun makrorakenteita, vaan tekstissä keskitytään mikroskooppisiin ja molekyylitason rakenteisiin ja ilmiöihin, joilla on vaikutusta puun kosteusreaktioiden ja sitä kautta sahatavaran, sahatavaran jatkojalosteiden ja insinööripuutuotteiden, kuten CLT, toimintaan. Käsittely rajataan koskemaan havupuita yleisesti ja erityisesti CLT:n yleisintä pääraaka-ainetta, kuusta (Picea Abies).

3.2.1 Puusolukon rakenne

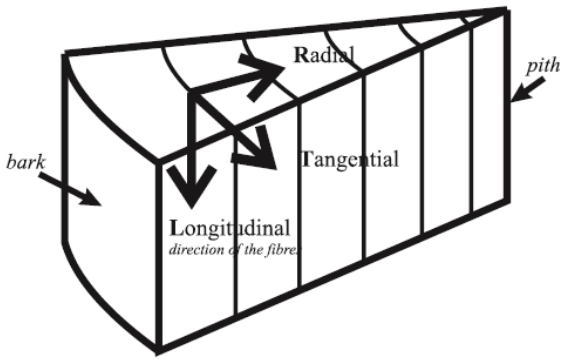
Puu on luonnonmukainen materiaali ja sen ominaisuudet ovat muodostuneet palvelemaan elävän puun tarpeita. Tästä syystä puutuotteiden käytössä, valmistuksessa ja suunnittelussa

on otettava huomioon tietyt materiaalin lainalaisuudet ja hyväksyttävä tosiasia, että kaikki ominaisuudet eivät ole käyttökohteen kannalta ihanteellisia. Sinänsä tilanne ei eroa synteettisistä tai muista luonnon raaka-aineista merkittävästi, sillä kullakin aineella on omat fysiikan, kemian ja materiaalitekniikan sanelemat reunaehtonsa.

Kuvassa 8 nähdään puun poikkileikkausuunnat, joista puhutaan usein sahatavaran yhteydessä. Puu kasvaa ydinkeskeisesti - ortotrooppisesti, ja sen ominaisuudet vaihtelevat kolmen poikkileikkaussuunnan välillä. Kuva 9 selventää poikkileikkaussuuntien suhdetta puurungon mukaiseen koordinaatistoon. On huomattava, että puun ominaisuudet muuttuvat myös poikkileikkauksen sisällä, johtuen rungon tavasta kasvaa ulkoreunaltaan ja solukoiden erikoistumisen myötä puun ikääntyessä. Tämä vaihtelu synnyttää puulle ominaisen syykuvion. Kuvio on seurausta kasvukauden etenemisestä, jolloin keväällä voimakkaan kasvun aikaan jälsi synnyttää uutta puusolukkoa nopeammin ja seurauksena on harvempaa puuainesta. Kasvukauden päätteeksi jälsi synnyttää tiivistä kesäpuuta, joka havaitaan poikkileikkauspinnoilla tummempina sävyinä. (Hameury 2006, s.7-8; Time 1998, s.1-3; Lepage 2012, s.13-16)



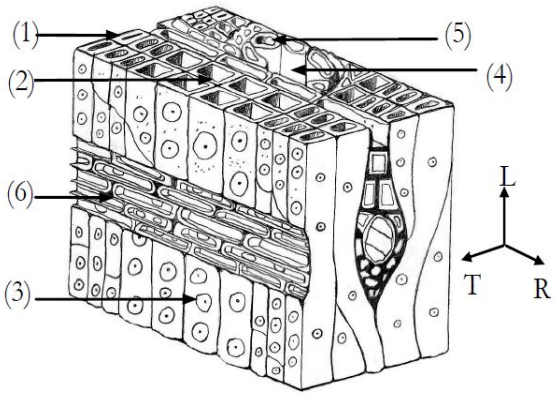
Kuva 8. Puutavaran poikkileikkauspinnat ja merkintätavat: X=pitkittäinen poikkileikkaus, T=tangentiaalinen poikkileikkaus, R=radiaalinen (säteittäinen) poikkileikkaus. (Lepage 2012, s.13)



Kuva 9. Puun poikkileikkauspinnat suhteessa runkoon.(Gereke, Niemz 2010)

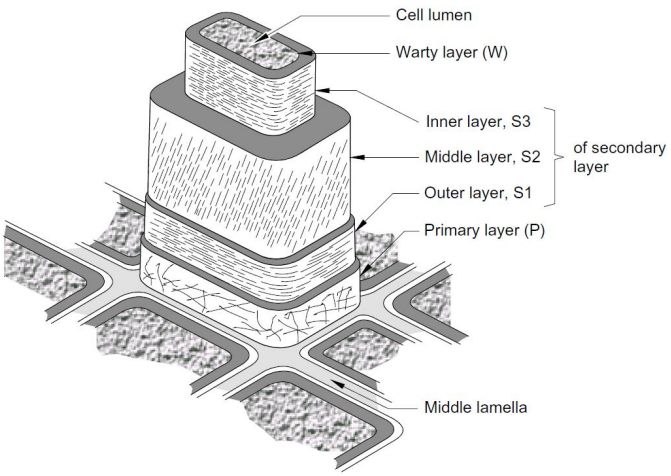
Poikkileikkauksen solukot koostuvat solutasolla tarkasteltuna pääosin johtosolukosta eli trakeideista. Ne antavat puumateriaalille suurimman osan sen ominaisuuksista puutuottei-

den kannalta. Trakeidit ovat onttoja soluja, joiden päätehtävänä on toimia nesteiden johdinkanavana puun pituussuunnassa ja antaa rungolle riittävä lujuus. Trakeideja ja muita soluja yhdistää huokoset, jotka säätelevät nesteen liikettä solukossa. Muita erikoistuneita soluja ovat mm. ydinsäteet, jotka kuljettavat ravinteita rungon säteen suunnassa. Lisäksi muun solukon seassa kulkee pihkatiehyitä. Kuvassa 10 on esitetty havainnekuva havupuun solukosta kaikissa poikkileikkaussuunnissa. (Time 1998, s. 2-3; Hameury 2006, s. 8-9; Lepage 2012, s. 18-20)



Kuva 10. Puusolukon rakenne. Selitteet: (1) kesäpuusolu, (2) kevätpuusolu, (3) huokonen, (4) pihkatiehyt, (5) epiteelisolu, (6) ydinsäde.(Hameury 2006, s.8)

Mikrotasolla tarkasteltuna erotetaan tärkeimmät tekijät, jotka vaikuttavat puumateriaalin käyttöominaisuuksiin. Kuvassa 11 on esitetty yksittäisen trakeidin rakenne. Solu koostuu useammasta kerroksesta, jotka eroavat toisistaan sekä molekyylirakenteeltaan, että kuitusuuntauksensa osalta. Puun kolme tärkeintä molekyylirakennetta ovat selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini. Ligniini ja hemiselluloosa ovat rakennetta yhteensitovia ja vesitasapainoa sääteleviä aineita, kun taas selluloosa vastaa rakenteellisesta lujuudesta. Selluloosamolekyylit ketjuuntuvat ja muodostavat niin sanottuja mikrofibrillejä, jotka muodostavat edelleen pidempiä fibrillejä. Puuraaka-aineen merkittävimmät lujuusominaisuudet ovat seurausta trakeidin S2-kerroksen fibrillikulmasta, jossa kuidut ovat asettuneet lähes kuidun pituusakselin suuntaisesti. Tämä antaa trakeidille ja puulle sille ominaisen hyvän puristus- ja vetolujuuden syysuunnassa. CLT:n pintahalkeilutaipumuksen kannalta merkittävintä on heikko vetolujuus syysuuntaa vastaan, mikä selittyy puusoluja ympäröivän välilamellin koostumuksella. Se koostuu pääosin ligniinistä ja hemiselluloosasta, jotka eivät ole rakenteellisesti lujia yhdisteitä. Puumateriaalin heikohko puristuslujuus syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa selittyy soluonteloiden romahtamisella. (Lepage 2012, s.16-17)

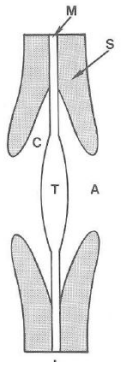


Kuva 11. Puun kuitutason rakenne. (Time 1998, s.5)

3.2.2 Kuusisolukon aspiraatio

Havupuusolukossa, varsinkin kuusen tapauksessa, erityistä ovat johtosolukkoa yhdistävät rengashuokosparit (kuva 12). Huokoset ovat toiminnallisia yksiköitä elävän puun solukossa ja vaikuttavat nesteen virtaukseen puussa venttiilien tapaan. Rengashuokosen keskellä on välilamellista muodostunut paksunnos, torus, joka kykenee sulkemaan huokosen vettä ja virtausta läpäisemättömäksi

Huokosten aspiraatio on otettava huomioon puutavaran käyttökohteen kannalta. Elävässä, ja terveessä puussa suurin osa huokosista on auki, lukuun ottamatta sydänpuusolukkoa, joka yleensä aspiroituu huokosten ja uuteaineiden vaikutuksesta. Kun puu kaadetaan, rungon kosteus pyritään säilyttämään jalostukseen asti, mutta kuivausvaiheessa, kosteutta aletaan poistaa solukosta, jolloin riippuen tavoitekosteudesta ja kuivauskäsittelyn aggressiivisuudesta, osa huokosista voi sulkeutua. Toruksen toiminta ei siis edellytä, että puu olisi vielä elävä. Huokosen sulkeuduttua pysyvästi, sahatavaran kosteustekninen toiminta muuttuu oleellisesti, sillä vesihöyryn vastus solukossa lisääntyy merkittävästi kun vapaa konvektio estyy. Lisäksi aspiraatio on huomioitava esimerkiksi pintakäsittelyssä ja liimauksessa, sillä aspiroitunut solukko ei ole ihanteellinen pinta kyseisiin tarkoituksiin (Lepage 2012, s.17). Toisaalta aspiraatio voidaan kääntää myös eduksi sahatavaran kannalta, koska sulkeutunut solukko on inertti, kosteuseläminen on hillitympää ja hygroskooppiset ilmiöt ovat hitaampia. Näitä ominaisuuksia voitaisiin kenties hyödyntää rakennustuotteen, kuten CLT:n eduksi.

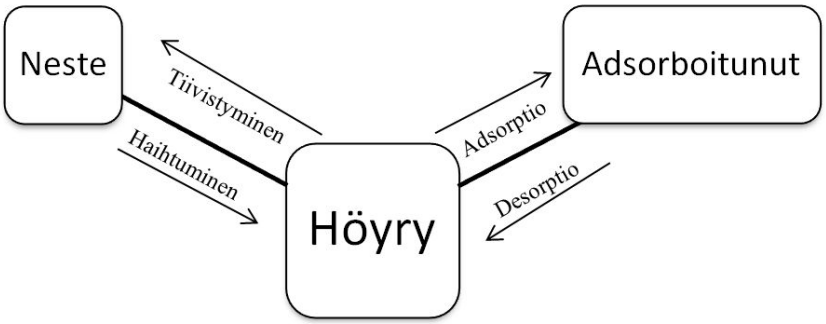


Kuva 12. Kuusisolukonrengashuokosten rakenne. Selitteet: M: keskilamelli, A: huokosaukko, T: torus eli sulkulevy, C: huokoskammio, S: sekundääriseinä. (Hameury 2006, s.9)

3.2.3 Puun hygroskooppisuus ja kosteuseläminen

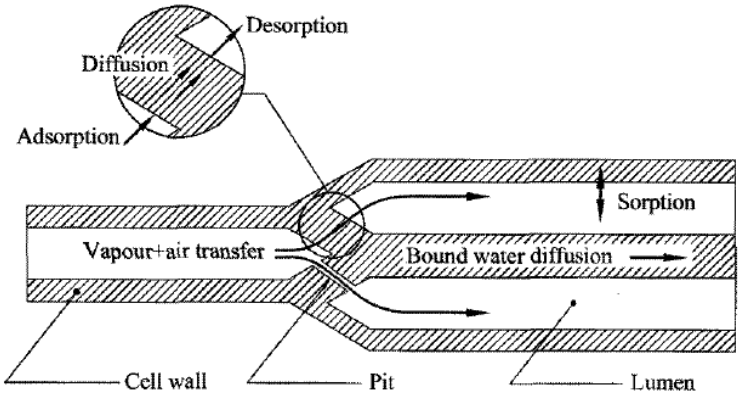
Puu on dynaamisessa kosteustasapainossa suhteessa ympäröivään ilmankosteuteen. Ilmiö on monimutkainen ja yksi merkittävimmistä haasteista ja samalla mahdollisuuksista puuta hyödynnettäessä. Puu siis luovuttaa ja vastaanottaa kosteutta ympäröivästä systeemistä ja rakennetussa ympäristössä siirtymistapana on useimmiten vesihöyry. Ilmiön taustalla on selluloosamolekyylien haarojen kemialliset ominaisuudet, jotka tarjoavat vesimolekyyleille edellytykset kemiallisten sidosten muodostamiseen.

Vesi esiintyy neljässä eri olomuodossa, höyrynä, nesteenä, jäänä ja sitoutuneena eli adsorboituneena. Jäätä ei esiinny oikeaoppisissa rakenteissa ja siksi se jätetään tällä kertaa tarkastelun ulkopuolelle puhuttaessa puun hygroskooppisuudesta. Lisäksi nestemäinen vesi ei ole varsinaisessa merkityksessään oleellinen tämän työn kannalta, sillä adsorboitunut vesi on se, joka varsinaisesti aiheuttaa puun kosteusliikkeet ja on vastuussa puun hygroskooppisista ominaisuuksista esimerkiksi sisäilman kannalta. Pienimmissä huokosissa adsorboitunut vesi saattaa kondensoitua nestemäiseksi vedeksi tietyissä olosuhteissa kun adsorboituneiden vesimolekyylien kerros yltää ahtaan huokosen molemmille seinämille (Lepage 2012, s. 25). Tarkasteltavien kolmen vesifaasin suhdetta voidaan kuvata vuokaaviolla (Kuva 13).



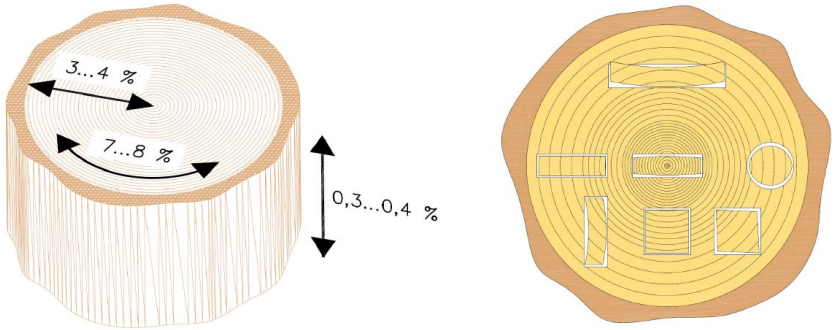
Kuva 13. Veden faasimuutokset puumateriaalin näkökulmasta.

Adsorboituminen tapahtuu molekyylitasolla pääosin diffuusion myötä. Puun huokoisessa rakenteessa sisällä oleva vesihöyry adsorboituu huokosten seinämiin ja huoneilman suora kosketus materiaalin pintakerroksissa synnyttää vastaavan ilmiön puun paljailla pinnoilla. Vesihöyryn kulkeutuminen puun sisäosiin vaatii konvektiota ja diffusiivisen paine-/konsentraatioeron, joka pakottaa kosteaa ilmaa huokosrakenteiden ahtaiden käytävien läpi (Kuva 14). Tärkeimmät muuttujat huokoisen aineen kosteuskäyttäytymiselle ovat lämpötila ja suhteellinen kosteus (vesihöyryn paine). (Lepage 2012, s. 29-31)



Kuva 14. Kaaviokuva solutasolla tapahtuvasta kosteuden kulkeutumisesta puussa. (Krabbenhoft, Damkilde 2004)

Adsorptio tarkoittaa tässä tapauksessa vesimolekyylien sitoutumista kemiallisesti amorfisen selluloosan karboksyyli- (-COOH) ja hydroksyyli (-OH) ryhmiin vetysidoksin. Molekyylitasolla vesimolekyylit tunkeutuvat kuidun S2-kerroksen selluloosaketjujen väliin ja pakottavat ketjut erilleen toisistaan molekyylien välisillä vuorovaikutusvoimilla. Tästä seuraa säteittäistä ja tangentiaalista turpoamista puussa, mutta vain vähäistä pituussuuntaista elämistä (Kuva 15). (Time 1998, s. 4)

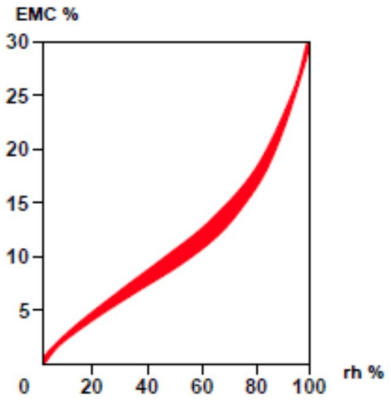


Kuva 15. Puun kosteuseläminen ja poikkipinnan syykuvion vaikutus sahatavarakappaleen muodonmuutoksiin. (PuuInfo 2011)

Desorptio ei etene samaa reittiä kuin adsorptio. Kuivuvan puun tasapainokosteus tietyssä suhteellisessa kosteudessa on aina korkeampi kuin saman kappaleen kosteus sen vettyessä. Vesimolekyylien irrottaminen soluseinämästä ja poistaminen ahtaista soluonteloista vaatii

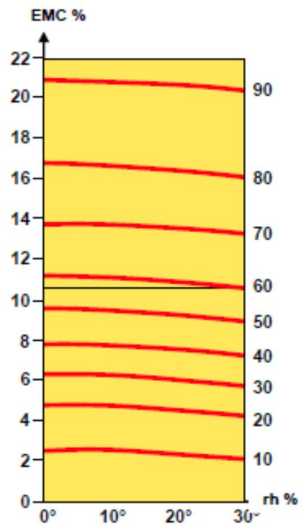
enemmän energiaa kuin niiden kiinnittyminen ja pääsy sinne. Selityksenä tälle tarjotaan muun muassa niin sanottua ”mustepullo vaikutusta” (*ink bottle effect*), jolloin ontelon tyhjentymisen nopeus riippuu ontelon ahtaimman kohdan pullonkaulamaisesta käytöksestä, kun taas vettyessä nopeuden sanelee ontelon levein kohta. (Lepage 2012, s. 29; Time 1998, s. 29)

Vettymisen ja kuivumisen erosta syntyy niin sanottu hystereesi-ilmiö, joka määrittää puumateriaalin kosteudelle raja-arvot suhteessa vallitsevaan kosteuteen ja suhteessa kappaleen lähihistoriaan (Kuva 16). Todellisessa toimintaympäristössään puukappaleen kosteus elää hystereesikäyrän sisällä, ja etenee aina kohti tasapainotilaa ympäristön kanssa.



Kuva 16.Tyypillinen hystereesikäyrien rajaama kosteusalue puumateriaalille eri kosteusolosuhteissa. (Welling et al. 2010, s.9)

Lämpötila ja suhteellinen kosteus ovat erittäin riippuvaisia toisistaan. Kuitenkin rakennetussa ympäristössä on usein mahdollisuuksia vaikuttaa näihin tekijöihin. Jos ajatellaan, että huoneilman suhteellinen kosteus vakioitaisiin, niin lämpötilalla on erittäin pieni vaikutus puun kosteussisältöön. Kuvassa 17 ilmiötä voidaan havainnollistaa käytännön esimerkillä. Jos ajatellaan, että tilan kosteus vakioitaisiin esimerkiksi 60 prosenttiin, niin puun tasapainokosteus muuttuisi ainoastaan prosentilla, vaikka lämpötilaa vaihdeltaisiin nollan ja kolmenkymmenen asteen välillä. Tämä on merkittävä seikka, jos pohditaan sisätilojen aktiivista ilmanvaihtoa, jossa ilmaa voidaan kosteuttaa tai kuivattaa tarpeen mukaan.



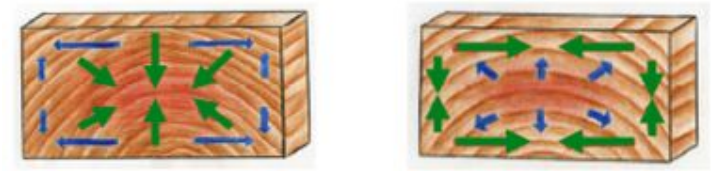
Kuva 17. Lämpötilan vaikutus puun tasapainokosteuteen kun ympäröivän ilman suhteellinen kosteus on vakio. (Welling et al. 2010, s.10)

3.2.4 Materiaalin sisäiset jännitykset

Halkeiluilmiö johtuu kiistatta jännitysten esiintymisestä ja laukeamisesta valmiissa CLT-levyssä. Näiden jännitysten päätymistä tuotteeseen voidaan selittää tuotantoprosessin eri vaiheilla, sekä puun luontaisilla ominaisuuksilla. Karkeasti voidaan jaotella, että sisäiset jännitykset (*eigenstresses*) ovat joko ennen puristusta tai puristuksen aikana syntyneitä, tai vasta tuotteen elinkaaren aikana syntyviä jännityksiä käyttökohteessa. Tuotannolliset jäännösjännitykset siirtyvät valmiiseen tuotteeseen puristuksen ja liimauksen aikana, jolloin ei-ideaalit sahatavarakappaleet ladotaan aihioon, kun taas käytön aikaiset jännitykset syntyvät ensisijaisesti kosteusmuodonmuutoksista ja jännityksistä, sekä kuormankannon aiheuttamista muodonmuutoksista. Edelleen rasitustarkastelu voidaan jakaa osiin siten, että toisaalta halkeiluilmiö syntyy paikallisista, lamellikohtaisista ja lamellinsisäisistä reaktioista. Koko levyn laajemmassa mittakaavassa halkeaman esiintyminen on riippuvainen useamman vierekkäisen ja päällekkäisen lamellin vuorovaikutuksista, lamellien rajapinnoista sekä liimasaumoista.

Kuivauksen seurauksena sahatavaraan syntyy jännitysjakauma kosteuden siirtymisen hitauden takia. Kun tuore sahatavara alkaa kuivua, sen pintakerrokset alkavat elää voimakkaasti, kun kappaleen keskikohta säilyttää vielä alkuperäiset mittansa. Tämä synnyttää kappaleen pintaan voimakkaita vetorasituksia ja vastavuoroisesti keskikohta puristuu kokoon (Kuva 18). Puun ominaisuuksista vetolujuus syysuunnan poikki on heikoin, ja siitä seuraa halkeamia puun pintaan. Halkeamat etenevät kuivauksen aikana siihen syvyyteen, jossa materiaalin vetolujuus ei enää ylity. Kun kuivaus on suoritettu, alkaa niin sanottu tasaantumisvaihe, jolloin pintakerroksen kosteus lisääntyy suhteessa keskikerrokseen, kun ympäristön ja puun sisäinen kosteus kulkeutuu kohti pintaa. Toisin sanoen, tässä vaiheessa

kappaleen keskikohta alkaa kuivua, joka synnyttää vetojännityksiä kappaleen keskelle. Kappaleen pinnat ovat nyt vuorostaan puristettuna. Jälleen kerran vetojännitykset saattavat edetä siihen pisteeseen, että puun keskiosaan syntyy halkeamia jotka yltävät ns. neutraaliakseliin saakka. Teoriassa ja ideaalitilanteessa kosteusgradientti tasaantuu, ja jännitykset poistuvat kappaleesta. Tässä vaiheessa sahatavaraan on kuitenkin syntynyt jo useita halkeamia ja halkeaman alkuja, jotka ovat voineet näennäisesti umpeutua. Ilmiö on väistämätön ja ainoastaan sen vakavuuteen voidaan vaikuttaa. Joka tapauksessa kaikki sahatavarapoikkileikkaukset ovat lähtökohtaisesti haljenneita. Sahatavarakappaleen elinkaaren aikana vastaavat kosteusvaihtelut ja gradientit vuorottelevat ympäröivien olosuhteiden mukaan, mutta kuivausvaiheessa seuraukset ovat suurimmat. Edellä kuvattu ilmiö on voimakkain pelkka- ja läpisahatuissa kappaleissa. Tutkimusten mukaan neli- ja tähtisahaus vähentää kuivausjännityksiä ja muodonmuutoksia kuivausvaiheessa. Syynä tähän on rasitusten kannalta edullisempi poikkileikkauksen syykuvio. (Welling et al. 2010, s.7; Pang, Haslett 2002)



Kuva 18. Kuivausrasitukset sahatavaralamellissa. Vasemmalla rasitukset kuivauksen alkuvaiheessa, oikealla rasitukset kuivauksen loppuvaiheessa ja kuivauksen jälkeen. Vihreät, paksummat nuolet kuvaavat puristusta ja siniset ohuemmat nuolet kuvaavat vetorasitusta. (Welling et al. 2010, s.7)

Voidaan todeta, että muotoaan muuttaneita sahatavarakappaleita päätyy aina jossain määrin myös levytuotantoon. Tuotannossa ja ladonnassa vääristyneet sahatavarakappaleet pakotetaan levymäiseen muottiin. Tämä synnyttää suuriakin paikallisia jännityksiä levyyn liiman kuivuessa ja pakotettujen muodonmuutosten asettuessa tuotannon vaatimuksiin. Pahimmassa tapauksessa jännitykset kasvavat niin suuriksi, että koko levy vääristyy (Gereke, Niemz 2010). Erityisesti paikalliset jännitykset pyrkivät vapautumaan tuotteen elinkaaren aikana ja ovat potentiaalisia katalyyttejä levyn pintahalkeilulle. Ilmiö korostuu myös siksi, että usein levytuotantoon valitaan ikään kuin hylkysahatavaraa tai heikompia jakeita, varsinkin keskikerroksiin.

Vaikka ristikkäisladonta vähentää keskikerroksista välittyvien jännitysten etenemistä pintakerroksiin, niin sopivissa olosuhteissa (esim. vinosyisyys, oksat), jännitykset voisivat päästä etenemään pintakerroksiin asti. Ilmiöt korostuvat myös levyn käyttökohteessa, sillä ajan saatossa viruminen ja syklinen rasitus saavat lopulta aikaan muodonmuutoksia levyssä, joka saattoi tuotannosta tullessaan olla täysin suora. Tavallinen CLT-tuotantoprosessi on ongelmallinen myös siitä syystä, että yleisesti tuotannossa käytetään polyuretaanilii-

maa, joka ei vaadi kuumapuristusta. Kuumuus ja sen myötä aihiosta vapautuva höyry voisi auttaa lamelleja asettumaan uuteen muotoonsa ja vähentää sisäisiä jännityksiä merkittävästi.

Sisäisten jännitysten vapauttamiseen on olemassa moderneja keinoja, ja kenties olisi tutkimisen arvoista, saavutettaisiinko CLT-aihion mikroaaltokäsittelyllä etuja levyn mittapysyvyyden parantamiseksi ja halkeilun vähentämiseksi. Mikroaaltokuivauksella on saavutettu hyviä tuloksia massiivipuun kuivauksessa, jolloin mikroaaltojen tunkeutuminen puuainekseen ja kappaleen lämpiäminen kauttaaltaan saa aikaan sen, että höyry purkaantuu puun sisältä ja samalla pehmittää puun ligniiniä ja kuituja, jolloin jännitykset pääsevät vapautumaan. (Torgovnikov, Vinden 2010)

3.3 CLT:n pintahalkeilu ja uritus

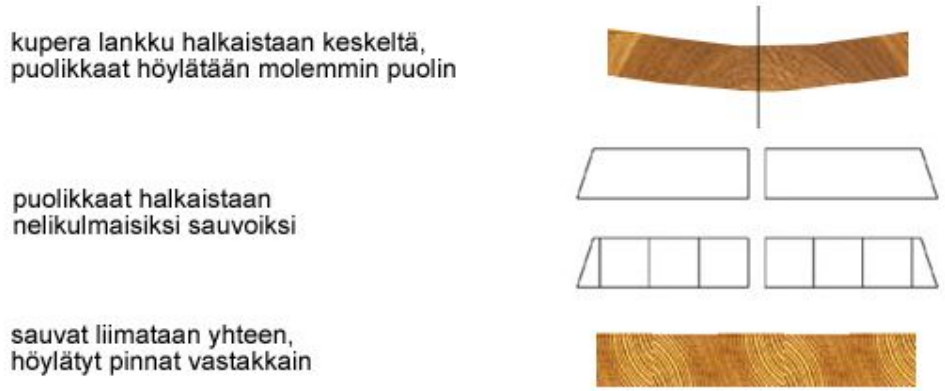
Yhteenvetona edellisistä kappaleista syvennytään halkeiluilmiön vaikuttimiin, ja tarkastellaan yhtäläisyyksiä sahatavaran halkeilun ja CLT:n pintahalkeilutaipumuksen välillä.

3.3.1 Kuivauksen ja ladonnan vaikutus pintahalkeiluun

Keskeinen ongelma CLT:n pintahalkeilussa on syysuuntapoikkeamat lamellien sisällä ja lamellien välissä. Kahden vierekkäisen lamellin välissä syysuunta vaihtuu äärettömän lyhyellä alueella, joka synnyttää suuren jännityskeskittymän sauman kohdalle. Koska lamellin kosteusliikkeet on alapinnastaan estetty, ilmiö voimistuu vielä selkeämmin levyn pinnassa. Jossain tapauksessa vetojännitys saattaa ylittyä lamellin keskellä, mikäli syysuunnat eivät poikkea saumassa merkittävästi ja syrjäliimaus on onnistunut. Lamellin keskellä syykuvion tangentti on perinteisesti vaakasuora, joka on vedon kannalta epäedullisin tilanne. Lopulta jännitykset vapautuvat halkeaman muodossa. (Gereke, Niemz 2010) Kosteustekniikka haltuun ottamalla ja kehityspanoksia lisäämällä ladontavaiheeseen, on mahdollista vaikuttaa pintahalkeiluilmiön esiintymiseen.

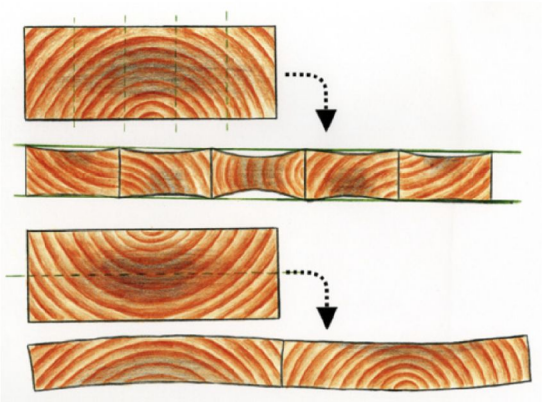
Läpisahattu, rungon tangentinsuuntainen sahatavarapoikkileikkaus voidaan ladonnan yhteydessä vakiinnuttaa vastaamaan säteittäin sahattua sahatavarapoikkileikkausta vierekkäisten lamellien rajapinnassa syysuunnan kannalta, kuten perinteisesti liimalevyvalmistuksessa on tehty. Jo pelkkä ydinpuu- ja pintapuupuolen vierekkäinen vaihtelu auttaa kerroslamellin toiminnassa, mutta liimalevyvalmistuksessa ladonta viedään vielä pidemmälle. Liimalevyssä tangentinsuuntaisesta poikkileikkauksesta halkaistaan niin sanottuja sauvoja, jotka liimataan takaisin yhteen höylätyiltä lappeiltaan vuorottelemalla sydänpuusuuntaa. Prosessia havainnollistaa kuva 19. Tekniikasta syntyy useampi ylimääräinen työvaihe CLT-valmistusprosessiin, mutta esimerkiksi korkean laatuluokan tuotteessa kyseistä metodia voitaisiin hyödyntää helposti pintalamellissa. Kosteuselämisen kannalta säännönmukainen ja vakaa kerros CLT-aihion pinnassa saattaisi estää epäsäännöllisten ja leveiden

halkeamien syntymistä tuotteen pintaan. Työn kokeellisessa osuudessa testataan Stora Enson vastaavalla tavalla valmistetun Effex-pintalamellin toimintaa halkeilun kannalta.



Kuva 19. Liimalevyn valmistus. (PuuProffa 2012)

Toinen vaihtoehto olisi työstää vastaavaa liimalevyä ns. jälleensahatuista sahatavarakappaleista, jolloin suurempia kappaleita halkaistaisiin vielä kuivauksen jälkeen jolloin vastaavan liimalevyn tuotanto saattaisi olla kustannustehokkaampaa. Tällöin on kuitenkin huomioitava, että liimattavien sahatavarakappaleiden kosteusjakaumat poikkeavat toisistaan huomattavasti, sillä jälleensahatun kappaleen kosteusgradientti jakaantuu nyt pienempien kappaleiden sisällä ja välillä. Jo kahden prosentin kosteusero kahden liimattavan kappaleen rajapinnan yli alkaa heikentää lopullisen liimasauman lujuutta. (Welling et al. 2010, s.6) Ilmiötä selventää kuva 20.



Kuva 20. Jälleensahatun sahatavarakappaleen uudelleenliimaus ja liimalevyn valmistus. Huom. kosteusjakauman aiheuttamat vääristymät liimalevyssä. (Welling et al. 2010, s.6)

Kosteus ja kosteusjakaumat ovat keskeisessä asemassa pintahalkeiluilmiössä. Gagnon et al. (2013, s.9) toteaa yksiselitteisesti, että huolellisesti hallittu kosteussisältö CLT:ssä estää kosteusmuodonmuutokset ja pintahalkeamien syntymisen. Hankaluutena tässä on kuitenkin laatia niin sanottu täydellinen resepti, jolla saavutetaan kustannustehokkain ratkaisu.

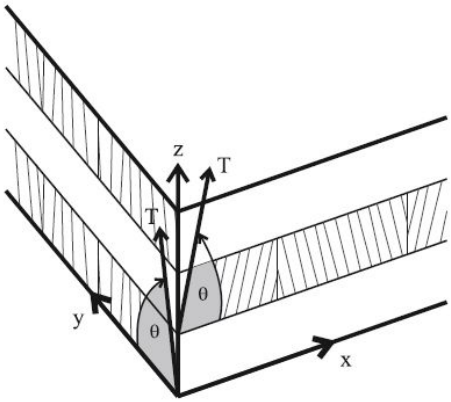
Gereke ja Niemz (2010) testasivat ohuen CLT-levyn käyttäytymistä kokeessa, jossa eri lamellikerrosten kosteutta säädeltiin latomisvaiheessa. Kun kaikki kerrokset olivat ladontavaiheessa tasaannutettu 85% suhteellisessa kosteudessa, havaittiin pinnassa huomattavasti enemmän halkeamia testiympäristöön sijoittamisen jälkeen, kuin paneeleissa, jonka lamellikerrokset oli tasaannutettu 65% suhteellisessa kosteudessa ennen ladontaa. Ilmiö johtuu siitä, että erot puun tasapainokosteudessa eri ympäristöissä ja siten myös kosteusliikkeet lamelleissa olivat pienemmät, koska 65 prosenttissa tasaannutetut kappaleet olivat lähempänä testiympäristön tasapainokosteutta kuin 85 prosentissa tasaannutetut. On siis syytä kiinnittää huomiota paneelin lopullisen käyttöympäristön keskimääräiseen kosteuteen.

Edelleen samassa teoksessa (Gereke, Niemz 2010), testattiin myös edellä kuvattujen lamellikonfiguraatioiden yhdistelmää, jossa keskimmäinen lamelli ladottiin kosteammasta puutavarasta, ja pintalamellit kuivemmasta (tasaannutuskosteudet 65%-85%-65%) sahatavarasta. Seurauksena mitatut halkeamamäärät pintalamelleissa pienenivät merkittävästi, mikä on seurauksena kosteuseron luomasta puristavasta esijännityksestä pintalamellin syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Voidaan myös pohtia, voisiko vastaavan puristusjännityksen synnyttää pintakerrokseen siten, että pintalamellit puristettaisiin syrjistään esimerkiksi raskaiden rullien/valssin läpi ja sitten ladottaisiin aihioon. Tällöin puusolukon luontainen pyrkimys palautua puristuneesta tilasta aiheuttaisi oikein säädeltynä riittävän puristavan voiman lamellien välille ja halkeaman aiheuttava vetolujuuden ylitys ei pääsisi tapahtumaan. Kirjallisuudesta ei löytynyt vastaavanlaisia kokeiluja. Aikaisemmin mainitussa teoksessa kylläkin on valmistettu esijännitettyjä lamellikerroksia, jotka vaativat huomattavaa tarkkuutta liimausvaiheessa, ettei jännitys pääse vapautumaan ennen prässin avausta. Esijännitys saatiin aikaan syrjäpuristamalla pintakerrosta ennen liimausta ja liimauksen aikana. Tutkimuksessa todettiin esijännitettyjen lamellikerrosten vähentävän halkeilutaipumusta.

3.3.2 Lamellin muodon ja syysuunnan vaikutus halkeiluun

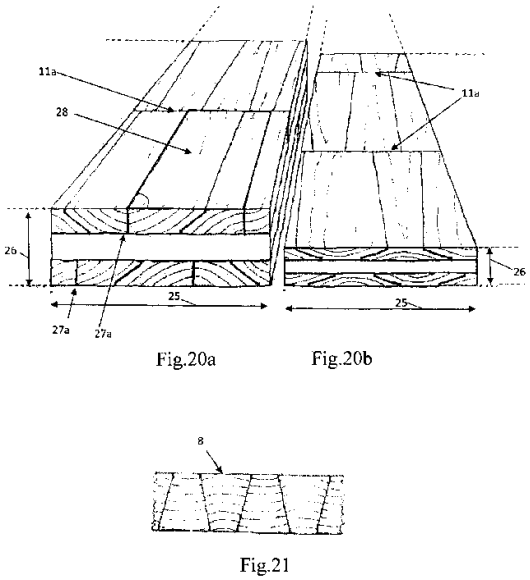
Syykuvion kulma (ks. kuva 21) todettiin aikaisemmin mainitussa teoksessa (Gereke, Niemz 2010) merkittäväksi vaikuttimeksi kosteusmuodonmuutosten ja –rasitusten muodostumisessa CLT paneelissa. Kun syykuvion kulma pintakerroksessa on noin 45 astetta, todettiin levyn staattisten ominaisuuksien heikentyvän, erityisesti jäykkyyden tapauksessa. Tämä on rakenteellisesti huono vaihtoehto, sillä vastineena ovat suuremmat poikkileikkaukset ja lyhyemmät kuormitusvälit kantavissa rakenteissa. Toisaalta taas ei-kantavissa rakenteissa kyseinen asetelma tuotti vähiten puristavia rasituksia kosteusmuodonmuutoksista, ja rasitushalkeamien ja levyn vääristymisen riskit ovat pienempiä. Suurin jäykkyys saadaan aikaiseksi, kun syykuvio on levyn normaalin suuntainen, eli pystysuora. Puun

turpoaminen ja kutistuminen tässä suunnassa on melko maltillista ja tuloksena on vähäisiä vääristymiä ja rasituksia levyssä. Vaakasuoraa syysuuntaa, mikä on CLT-tuotannossa kuitenkin yleisin, kehotetaan välttämään, sillä puu turpoaa syykuvion tangentin suunnassa eniten ja jäykkyys ja lujuus ovat huonohkoja. Seurauksena on merkittäviä kosteuden aiheuttamia jännityksiä levyyn ja suurentunut riski pintahalkeilun ilmenemiselle.



Kuva 21. Kuvaus paneelin koordinaatistosta. jossa ɵ kuvaa lamellin syysuuntaa ja T kuvaa syykuvion tangenttia. (Gereke, Niemz 2010)

Pintalamellin muotoa muokkaamalla olisi mahdollista vaikuttaa vierekkäisten lamellien rajapinnassa olevaa syysuuntaeroon. Tämän tapaisesta menettelytavasta on jo olemassa patentti (Leitinger, Schickhofer 2013), jossa laudat sahataan ensinnäkin rungon kartiokasta syykuviota noudattaen ja lankun syrjät sahataan vinoon ja ladotaan vuorottelevalla sydänpuusuunnalla (ks. Kuva 22).

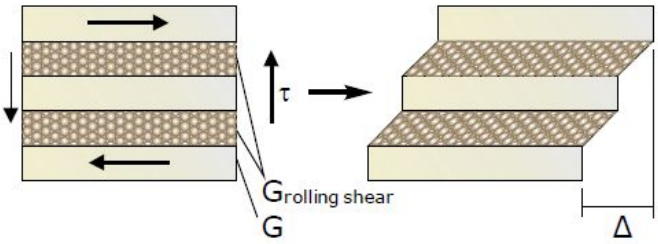


Kuva 22. Ladontaan liittyvä patentti, jossa lamellit sahataan suorasyisiksi ja syrjiltään vinoiksi jolloin syysuunta muuttuu vain vähän liimapinnoissa suhteessa vierekkäisiin lamelleihin. (Leitinger, Schickhofer 2013)

3.3.3 Urituksen mahdollisuudet halkeilun estämiseksi

Kirjallisuudesta ei löydy tutkimuksia, jossa olisi käsitelty CLT pinnan urittamista funktionaaliselta kannalta. Pinnan kuviointi ei ole uusi ajatus, mutta sen toimintaa ei ole tarkasteltu tieteellisesti, eikä sen parametreja ja vaikutusmahdollisuuksia tuotteen ominaisuuksien kannalta tunneta.

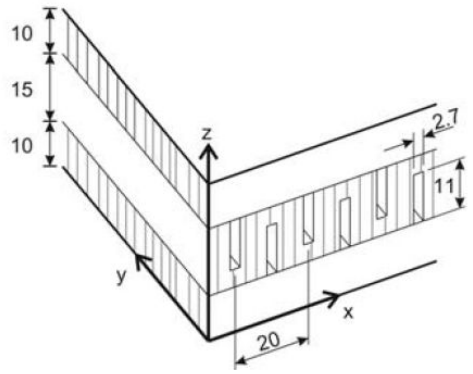
Urittamisen reunaehtoja tutkittaessa, voidaan siteerata Branderin (2013, s.16) lausumaa ehtoa, joka koskee pintalamellin taustapuolelle työstettyjen niin sanottujen tappourien (*stress relieves*) parametrejä. Perimmäinen tarkoitus näillä urilla on vähentää valmiin levyn vääntyilyä, ei niinkään vaikuttaa halkeilutaipumukseen. Brandner toteaa, että tappourat eivät saisi olla yli 4mm leveitä ja syvyydeltään ne saisivat olla korkeintaan 90% lamellin paksuudesta. Tappourien etäisyys tulisi olla suurempi kuin lamellin paksuuden nelinkerta. Syynä tähän on niin sanotun vierintäleikkaustaipumuksen kasvaminen, mikäli näitä ehtoja ei noudateta. Vierintäleikkaus on yksi merkittävimmistä mitoittavista ilmiöistä CLT-levyn rakenteellisessa toiminnassa (Ross et al. 2013, s.9). Vierintäleikkausilmiötä selventää kuva 23. On kuitenkin huomattava, että Brandner puhuu urista, jotka sijoitetaan lamellikerrosten väliseen rajapintaan, jossa leikkausvoima esiintyy. Levyn pintaan työstetyt urat eivät vaikuta ilmiöön samalla tavalla, mutta täsmällistä vaikutusta ei ole kirjallisuudessa tutkittu.



Kuva 23. Vierintäleikkausilmiö CLT-paneelissa. Levyn kuormittamisessa syntyvät veto ja puristusvoimat ylä- ja alapinnoilla saavat aikaan lamellikerrosten välille vierintäleikkausta, joka saa voiman suhteen poikittaisessa suunnassa olevat kerrokset ikään kuin kaatumaan. (Ross et al. 2013, s.9)

Jos sovitetaan aiemmin mainitut ehdot esimerkkitapauksessa Stora Enson tuottamaan kolmikerroksiseen 100mm paksuun CLT-levyyn, urituksen taajuus olisi: >120mm (4 x 30mm) ja uran syvyys maksimissaan 27mm. Vastaavasti viisikerroksisen ja 100mm paksun tuotteen kohdalla vastaavat parametrit olisivat: taajuus >80mm (4 x 20mm) ja urasyvyys <18mm. Tässä työssä ei kuitenkaan oteta vielä kantaa urituksen rasitusopillisiin ja mekaanisiin vaikutuksiin levyssä, sillä tarkastelu ulotetaan toistaiseksi vain pientalomittakaavaan, jossa tyypillisesti CLT:n kuormitusasteet ovat erittäin alhaisia ja riski esimerkiksi vierintäleikkausilmiön esiintymiselle on häviävän pieni. Jatkossa, urituksen vaikutus levyn mekaanisiin ominaisuuksiin on helposti tutkittavissa.

Pidemmälle vietynä urittamisella voidaan saavuttaa myös muunlaisia hyötyjä. Gereke et al. (2010) esittävät, että urittamalla levyn keskikerros (Kuva 24) voidaan saavuttaa esimerkiksi energiataloudellisia hyötyjä. Heidän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että vaikka keskilamellin urittaminen ei vaikuta juurikaan kosteusmuodonmuutoksiin ja –rasituksiin, niin levyn lämmöneristävyys paranee merkittävästi. Jos tällaisen ratkaisun staattiselle toiminnalle saataisiin vahvistus kuormituskokeissa, heidän mukaan teolliselle tuotannolle ei olisi mitään estettä, jos halutaan tuottaa CLT-levyä paremmilla eristysominaisuuksilla. Tällä olisi Suomen kannalta erityistä hyödynnettävyyttä lomarakentamisessa, jolloin seinät voitaisiin mahdollisesti jättää ilman erillistä eristettä.



Kuva 24. Havainnekuva uritetusta keskilamellista. (Gereke et al. 2010)

Vastaavia ominaisuuksia voitaisiin tavoitella myös yhdistämällä puukuitukomposiittia ja CLT:tä rakenteeseen, jossa keskilamelli koostuisi esimerkiksi MDF-levystä. Gereke et al. (2010) testasivat kyseistä rakennetta, ja tuloksista voidaan nähdä (Taulukko 3), että pintalamellin halkeilutaipumus pienenee, mikäli keskikerros koostuu pehmeähköstä materiaalista, kuten MDF:stä. Ongelmana tosin oli, että tällöin kuivumisrasitukset saavat pehmeän keskikerroksen lohkeilemaan. Toisaalta taas jäykkä puukomposiitti, kuten OSB tai lastulevy, synnyttää pintalamellissa suurempia halkeamia. Voidaan siis johtaa, että myös keskilamellin rakenteella ja koostumuksella on vaikutusta CLT:n pintahalkeilutaipumukseen, ja täten olisi myös tutkimisen arvoista, voitaisiinko keskilamellin urittamisella saavuttaa etua myös pintahalkeilun suhteen.

Taulukko 3. Puukuitukomposiitista koostuvan keskikerroksen vaikutus pintahalkeilutaipumukseen CLT-levyssä. Tulokset ovat keskimääräinen (n=3) kumulatiivinen halkeamien pituuksien summa CLT-koekappaleen lappeella, kun kuivaus on tapahtunut 21 päivän aikana 85% RH tasaannutuksesta 35% RH vastaavaan tasapainokosteuteen. (Gereke et al. 2010)

Middle layer	Σ crack length (mm)
Spruce	96.7
MDF500	68.2
MDF700	67.0
OSB	267.5
PB	177.4

Halkeilu syntyy siis lamellien välisten kuivumisjännitysten seurauksena. Syy siihen, että halkeama esiintyy usein juurikin vierekkäisten lamellien välisessä saumassa, on seurausta voimakkaasta vetojännitysgradientista. Jännitysgradientti lamellien välisessä rajapinnassa riippuu vierekkäisten lamellien syysuuntaerosta ja edelleen, vetojännitys on suoraan riippuvainen puun ortotrooppisesta kutistumistaipumuksesta (Gereke, Niemz 2010). Urittamalla lamellien pintaa, voidaan jännitysjakaumaa muuttaa levyn pinnassa, ja mikäli uritus kohdistetaan vierekkäisten lamellien sauman kohdalle, voidaan jännityshuippu siirtää syvemmälle ja ennen kaikkea pois näkyvistä. Voidaan pohtia, että voidaanko urittamalla saavuttaa syrjäliimatussa levyssä säännöllinen halkeamakuvio, mutta saavuttaa silti osa syrjäliimauksen hyödyistä. Joka tapauksessa todettakoon, että urituksen voi ajatella toimivan vähintään optisesti, jolloin suurimmat ja rumimmat halkeamat jäävät piiloon uran pohjalle ja levyn visuaalinen ilme paranee koska levy vaikuttaa halkeilemattomalta.

4 PUUN PINTAKÄSITTELY SISÄKÄYTÖSSÄ

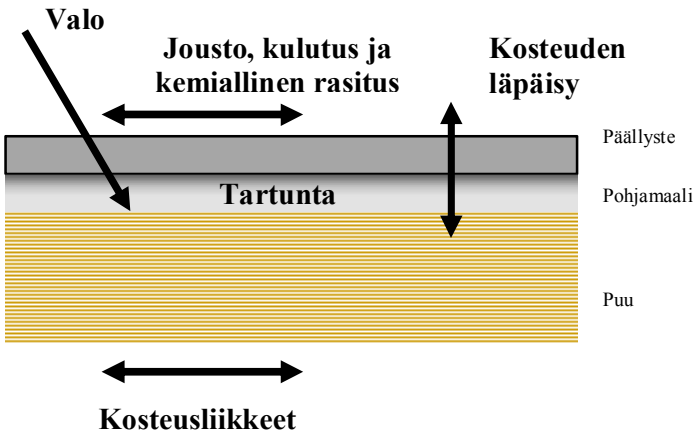
Puun pintakäsittely on laaja aihepiiri ja aiheen ympärillä on jatkuvaa tutkimustoimintaa. Pintakäsittely terminä on monisyinen, sillä se sisältää monentyyppisiä käsittelyjä ja aineita. Pintakäsittelyllä tarkoitetaan erityyppisiä aineita, jotka levitetään mekaanisesti muokatulle puupinnalle. Aineet voivat olla kalvonmuodostavia tai puuhun täysin imeytyviä. Yhteistä näille aineille on niiden esteettinen tarkoitusperä, ja joissain tapauksissa pinnan käytettävyyden, säilyvyyden ja huollettavuuden parantaminen. (Lambourne, Strivens 1999, s.3) Tässä työssä ei perehdytä pintaan kiinnitettävien laminointikalvojen toimintaan.

Tässä luvussa tarkastellaan pintakäsittelyn toimintaa CLT:n sisäilmaan rajoittuvassa pinnassa. Pintakäsittelyaineiden koostumus esitellään suppeasti, samoin kuin yleisimmät pintakäsittelytyypit ja käsittely- sekä levitystekniikat. Sen sijaan erityistä huomiota kiinnitetään pintakäsittelyn kosteustekniseen ja rakennusfysikaaliseen toimintaan, joka puolestaan on yhteydessä huoneilman laatuun ja CLT:n halkeilutaipumukseen.

4.1 Vaatimukset pintakäsittelylle sisäkäytössä

Maalipintaan kohdistuu käytössä rasituksia. Erityisesti puiset pinnat ovat käsittelyn kannalta hankalia puun kosteuskäyttäytymisen takia. Pintakäsittelyllä sisätiloissa pyritään tiettyyn arkkitehtoniseen ja sisustukselliseen estetiikkaan, mutta myös käytännöllisyyteen. Oikein toteutettu pintakäsittely parantaa käsitellyn pinnan ominaisuuksia ja ulkonäköä, ja ennen kaikkea ylläpitää pinnan kuntoa helpottamalla puhdistusta ja suojaamalla pohjamateriaalia ulkoisilta rasituksilta.

Kuvassa 25 esitetään maalipintaan kohdistuvia rasituksia ja maalipinnan toimivuuden kannalta tärkeitä tekijöitä. Osa ilmiöistä syntyy käytön myötä, kuten kulutus ja kemialliset rasitukset. Toiset liittyvät toimintaympäristöön, kuten kosteuden läpäisy (huoneen suhteellinen kosteus), kosteusliikkeet ja valo. Tartunta liittyy eritoten käsittelyvaiheeseen ja käsittelyaineen koostumukseen sekä myös kosteusteknisiin seikkoihin.



Kuva 25. Havainnekuva maalipinnalla tapahtuvista ilmiöistä ja niiden vaikuttimista. Kaikissa tapauksissa käsittelyyn ei kuulu pohjamaalikerrosta.

Ulkonäön kannalta on tärkeää, että maalit säilyttävät kiiltonsa ja sävynsä mahdollisimman pitkään huolimatta tarkoituksen mukaisesta käytöstä. Esimerkiksi auringon säteilyn tulisi joko heikentää käsittelyä huomaamattomasti ja tasaisesti tai ei lainkaan. Käsittelyn sulkuominaisuuksien (*barrier properties*) kannalta on tärkeää, että käsittely kestää siihen kohdistuvaa kulutusta ja huoltoa, ja että se pystyy säilyttämään suojaavat fyysiset ominaisuutensa mahdollisimman pitkään. Usein sulkuominaisuuksien pettäminen kiihdyttää pinnan pilaantumista entisestään, sillä se synnyttää suoria reittejä tartunta-alustaan. (Ekstedt 2003, s.2)

Sisäkäytössä pintakäsittelyn vaatimukset painottuvat esteettiselle kannalle. CLT:n tapauksessa maalatuilla sisäpinnoilla käsitetään seinä- ja kattopintoja joihin ei yleensä kohdistu suurta fyysistä kulutusta. On kuitenkin kohteita, jotka ovat alttiita likaantumiselle, ja siksi käsittelemätön CLT ei yleensä ole suositeltava vaihtoehto seinämateriaaliksi. Tällaisia erityisiä rasituskohteita ovat ovenkarmit, aukkojen reunat, nurkat ja valokatkaisimien ympärystät. Näiden kohteiden ylläpito edellyttää ajoittaista pesua tai hankausta ja kenties mietoa kemiallista puhdistusta ja siksi pintakäsittelyn on siedettävä edellä mainittuja toimenpiteitä.

Ylläpidon lisäksi puuhun kohdistuu jatkuva kosteusrasitus huoneilman kosteuden vaihtelun takia (Lambourne, Strivens 1999, s.368). Vaikka pintakäsittely olisi täysin sulkeva ja tiivis, kosteutta pääsee silti aina rakenteisiin eri reittejä pitkin, joko ympäröiviä rakenteita pitkin, ilmavuotojen tai ulkoilman ja kondension kautta. Erityisesti aukot ja elementtien reunat ovat otollisia reittejä kosteuden pääsylle elementin sisään, sillä elementtien reunoja harvoin suljetaan kosteudelta, eikä se välttämättä olisi kosteusteknisesti järkevää. Näistä syistä on aina oletettava, että CLT-elementtiin kohdistuu suoria ja epäsuoria kosteusrasituksia ja se on otettava huomioon pintakäsittelyjärjestelmää suunniteltaessa.

Pintakäsittelyn suhde vesihöyryyn on kaksijakoinen puun tapauksessa. Toisaalta kosteuden liikkeitä on hyvä rajoittaa ja hallita puu-ilma rajapinnassa, mutta toisaalta kosteus ei saisi missään tapauksessa kerääntyä käsittelyn alle pysyvästi. Huoli kosteuden kertymisestä pintakäsittelyn alle on synnyttänyt tarpeen kehittää korkean kosteuspermeabiliteetin maalituotteita. Tässä yhteydessä on keskusteltu termeistä kuten mikrohuokoisuus (*microporosity*), mutta aiheen ympäriltä ei ole saatu kattavia tai yksiselitteisiä tutkimustuloksia ja optimiarvoja maalipinnan hengittävyydelle kaikissa olosuhteissa on vaikea löytää (Lambourne, Strivens 1999, s.370; Graystone 2001)

Kosteuden kannalta olisi edullisinta, että pintakäsittely sallisi vesihöyryn läpäisyn mahdollisimman helposti. Tämä synnyttää kuitenkin ristiriidan pintakäsittelyn kestävyyden kannalta, sillä väistämättä kosteusliikkeet rapauttavat pintaa nopeammin ja syntyneet halkeamat voivat hankaloittaa pinnan puhdistusta (Ekstedt 2002, s.2). Ristiriita syntyy myös kosteuselämisen ja huoneilman kosteuden kannalta, koska tiiviimpi pintakäsittely hillitsee kosteusliikkeitä tehokkaammin (Graystone 2001), mikä voidaan havaita esimerkiksi ikkunan- ja ovenkarmeissa, mutta poissulkee puun ominaisuuden puskuroida ympäröivää ilmankosteutta. Toisaalta pintakäsittelyn halkeilu kiihdyttää käsittelyn permeabiliteettia tehokkaasti, jolloin CLT-materiaali pystyy vaihtamaan kosteutta huoneilman kanssa herkemmin. Pintakäsittelyn halkeilu peittävän kalvon muodostavilla käsittelyillä muodostaa esteettisen haitan.

4.2 Pintakäsittelyaineen tyypillinen koostumus

Pintakäsittelyaineet muodostuvat monimutkaisista yhdistelmistä kemiallisia aineita ja pintakäsittelyaineet jakaantuvat useampaan alaryhmään kemiallisten ja fyysisten ominaisuuksiensa perusteella. Tästä huolimatta, pintakäsittelyaineiden perimmäinen koostumus on lähes aina yhdistelmä muutamasta perustekijästä eri mittasuhteissa. Lambourne ja Strivens (1999, s.6) jakaa edellä mainitut komponentit vielä kahteen ylätermiin: kuljetin ja pigmentti (*vehicle, pigment*). Tällöin kuljetin käsittää hartsit ja ohenteet, ja pigmentit käsittävät lisäaineet, pääpigmentit ja täyteaineet. Lyhyt yhteenveto kaikista näistä komponenteista nähdään taulukossa 4.

Taulukko 4. Maalien koostumus. (Sovellettu suoraan teoksesta: Lambourne, Strivens 1999, s.6)

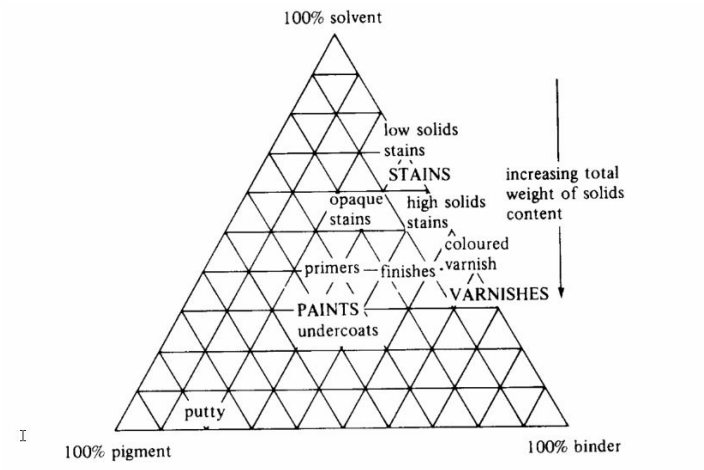
	Komponentti	Tyypillinen funktio
Kuljetin (jatkuva faasi)	Polymeeri tai hartsi (sideaineet)	Perusta jatkuvalle kerrokselle, sulkien tai muuten suojaten käsiteltävää pintaa. Koostumus riippuu käyttökohteesta.
	Ohenne tai liuotin	Vaikuttaa maalin levitettävyyteen ja käsiteltävyyteen.
Pigmentti (epäjatkuva faasi)	Lisäaineet	Vähäinen osuus kokonaisuudessa. Koostumus monipuolinen ja tarkoitus usein toimia katalyytteinä, kuivausaineena tai levityksen edistäjänä.
	Pääpigmentti (hienojakoinen orgaaninen tai epäorgaaninen)	Antaa maalille sen peittävyyden, värin ja muita optisia ja visuaalisia vaikutuksia. Yleensä vaikuttaa vain visuaalisiin ominaisuuksiin.
	Täyteaineet (karkeajakoinen epäorgaaninen aines)	Käytetään monien eri ominaisuuksien tavoitteluun, kuten viskositeetin muokkaamiseen, pigmentin säätöön ja jälkihionnan helpottamiseen.

4.3 Erityyppiset maalituotteet ja niiden koostumus

Kappaleessa avataan eri pintakäsittelyaineiden eroja ja niiden koostumuksen muokkaamista.

4.3.1 Maaliseoksen komponenttien suhde

Maalituotteen koostumus voidaan yksinkertaistaa kolmen pääkomponentin (liuotin, sideaine ja pigmentit) yhdistelmäksi. Tiettyyn kohteeseen kehitettävää maalia on muokattava muuntelemalla pääkomponenttien keskinäisiä suhteita. Kuvassa 26 kolmion kärjet edustavat kunkin pääkomponentin 100% osuutta. Kalvon muodostavissa maaleissa voidaan ajatella, että kolme pääkomponenttia on kutakuinkin tasapainossa, kun taas lakat ja petsit painottuvat voimakkaammin liuotinten ja sideaineiden puolelle. Keskinäisenä erona näillä kahdella on sideaineen määrä, sillä lakat muodostavat usein kirkkaan kovettuvan kalvon, kun taas petsit imeytyvät puuhun. Mikäli lakkaan tai petsiin lisätään pigmenttiä värjäyksen tai peittävyyden lisäämiseksi, se siirtyy kuviossa kohti kolmion keskikohtaa. Äärimmäisenä vasemmassa alanurkassa sijaitsevat paikkatahnat, -kitit ja -vahat, jotka ovat yleisiä ovi-, ikkuna-, ja huonekaluteollisuudessa. Näiden päätuotteiden väliin voidaan asettaa niin sanotut johdannaiset, jotka käsittävät suurimman osan pintakäsittelytuotteista.



Kuva 26. Eri käsittelytyyppien koostumus suhteessa kolmen pääkomponentin osuuteen pintakäsittelyaineessa. (Lambourne, Strivens 1999, s.374)

4.3.2 Komponenttien valinta

Komponenttien keskinäisten suhteiden lisäksi, on pohdittava itse komponenttien koostumusta. Väripigmenteistä käytetyin on titaanidioksidi, sillä valkoiset ja vaalennetut sävyt ovat nykyään yleisiä. Väripigmentit valitaan aina tarpeen mukaan ja niiden yhdistelmien monimuotoisuus ja muunneltavuus on lähes ääretöntä. Pääosin pigmentit jaetaan kahteen ryhmään, orgaanisiin ja epäorgaanisiin pigmentteihin. Pigmentin käsittelyssä ja valinnassa on lukuisia muuttujia liittyen mm. partikkelikokoon, valon taittavuuteen ja kemialliseen kestävyyteen. (Lambourne, Strivens 1999, s.12 ja s.92-104)

Liuotin- ja ohennekemikaalit ovat usein perinteisiä orgaanisia ja haihtuvia liuottimia tai vettä, ja ne määräytyvät useimmiten suoraan sideaineiden perusteella, sillä näiden kahden komponentin yhteensopivuus on äärimmäisen tärkeää maalin toimivuuden kannalta. Orgaaniset liuottimet ovat yleensä kevyen molekyylipainon omaavia hiilivetyjä tai hapetettuja yhdisteitä. Tärkeintä valinnassa on sovittaa liuottavuus (tai liuottamattomuus ohenteiden tapauksessa) yhteen pigmenttien kanssa, ja toisaalta taas varmistaa maalin kuivuminen haihtumisen kautta. (Lambourne, Strivens 1999, s.166) On ilmeistä, että vesipohjaiset pintakäsittelyaineet ovat nousseet yhä enemmän suosioon osittain liuottimien aiheuttamista rasitteista maalin valmistuksessa ja käytössä.

Sideaineen valinnalla on suuri merkitys lopullisen maalikalvon ominaisuuksiin. Myös sideaineita on lukuisia eri tyyppejä, joista ohessa muutamia:

- Alkydi ja polyesterihartsit
- Polyuretaanit
- Akryylihartsit
- Öljyt ja luonnonöljyt

4.3.3 Maalijärjestelmän vaihtoehdot

Maalijärjestelmää voidaan muunnella valitsemalla tavallisista kalvonmuodostavista pintakäsittelyaineista poikkeava käsittelyaine, kuten öljy, lakka, petsi, silikaattimaali tai vaha. Lisäksi edellisessä kappaleessa käsiteltyjen pintakäsittelyaineiden loppuominaisuuksia voidaan muovata maalijärjestelmällä, johon yhdistetään esikäsittely tai pohjamaali.

Öljyt ovat olleet pitkään yleisiä huonekalujen pintakäsittelyssä. Kovettuvat öljyt muodostavat aistittavan kalvon puun pinnalle ja suojaavat sitä tahriintumiselta. Myös imeytyvät öljyt suojaavat puuta, mutta sormituntuma saattaa olla rasvainen toisin kuin kuivilla ja kovettuvilla öljyillä. Tunnettu esimerkki kuivuvasta ja kovettuvasta öljystä on pellavaöljy. Muita vastaavia öljyjä ovat kiinanpuuöljy, perillaöljy ja maapähkinäöljy. Imeytyvistä öljyistä tyypillisin puunkäsittelyssä on parafiiniöljy. Tämän tyyppiset öljyt koostuvat usein triglysereidestä. Öljyjä ei yleensä värjätä, eikä niitä käytetä sellaisenaan laajojen pintojen käsittelyssä. Öljyjen ominaisuuksia voidaan kuitenkin hyödyntää erityyppisissä suojaaineissa ja petsituotteissa, jolloin voidaan saada aikaan värjättyjä puupintoja kohtuullisimmilla kustannuksilla. (Ekstedt 2002, s.7)

Tikkurilan (2008, s.4) mukaan petsit ovat liuoksia, jotka koostuvat liukenevista väriaineista. Niiden kiintoainepitoisuus on usein alle 20 % (Lambourne, Strivens 1999, s.375). Petsit on tarkoitettu puuaineksen värjäämiseen imeyttämällä petsi puusolukkoon, ja eroaa siis merkittävästi maaleista. Petsatut pinnat viimeistellään usein lakkakerroksella. Petsin imeytymistä säätelevät maalattavan puun ominaisuudet ja petsin ainesosien molekyylipaino ja liuottimen laatu. Vesipohjaiset petsit saavat puun turpoamaan ja imeytyminen pysähtyy aikaisemmin, kun taas liuotinpohjaiset petsit imeytyvät usein syvälle puuhun. Myös pigmenttihiukkasten koko vaikuttaa merkittävästi kuinka syvälle värjäys ulottuu. (Lambourne, Strivens 1999, s.375)

Petseihin voidaan yhdistää pieniä määriä sideaineita pigmentin vakauttamiseksi. Liuotinpohjaisissa tuotteissa hyödynnetään usein öljyjä ja alkydejä ja vesipohjaisissa hyödynnetään usein eri dispersiopolymeerejä. Jos petsin kiintoainepitoisuus on alhainen, voidaan sen ominaisuuksia muokata silikoniöljyillä ja vahoilla roiskeveden kestävyyden lisäämiseksi. Tässä tapauksessa öljyt ja vahat eivät oleellisesti vähennä puun vesihöyrynläpäisykykyä ja täten sallivat kosteusliikkeet ja puun hygroskooppisen toiminnan. On kuitenkin huomattava, että tämän tyyppinen pintakäsittely ei ole erityisen kestävä tai suojaava. Mikäli petsin vesihöyrynläpäisykykyä halutaan pienentää, se voidaan toteuttaa kasvattamalla kiintoainepitoisuutta, jolloin puhutaan paksusta petsistä. Kasvanut pintakäsittelykerroksen paksuus ja kiintoainepitoisuus aiheuttaa kuitenkin herkästi ongelmia sideaineen valinnassa ja annostelussa, sillä käsittelyn hilseily muodostuu uhkaksi tällä koostumuksella. (Lambourne, Strivens 1999, s.375-376)

Läpikuultavien vesipohjaisten petsien valmistaminen on ollut hankalaa, vaikka markkinarako tällaisille tuotteille on olemassa. Suurimmat ongelmat ovat liittyneet kosteuden hallintaan ja UV-valon sietoon. Koska läpikuultava käsittely edellyttää alhaista kiintoainepitoisuutta ja dispersiopolymeerien käyttöä, on tuloksena vesihöyryn- ja kosteudenläpäisevä kalvo, joka ei suojaa puuta hyvin. UV-valoaltistus yltää vaivatta alla olevaan puuhun, jolloin valon haitallinen vaikutus ilmenee nopeasti. UV-kestävyydeltään hyvät vinyyli- ja akryylilateksit eivät ole osoittautuneet toimiviksi läpikuultavissa petseissä ja siksi UV-kestävyyttä on pyritty parantamaan komponenteilla, jotka kykenevät absorboimaan UV-säteilyä. (Lambourne, Strivens 1999, s.376)

Läpinäkyviä kalvoja saadaan parhaiten aikaan lakoilla. Periaatteessa lakat ovat maaleja ilman peittävää väriä. Tikkurila (2008, s.5) listaa puutuoteteollisuuden yleisimmiksi lakkatyypeiksi katalyytti-, polyuretaani- ja vesiohenteiset lakat. Myös UV-kovettuvia lakkoja hyödynnetään tuotantolinjoilla. Lakat ovat menettäneet suosiotaan suhteessa kehittyneisiin petseihin, mutta kulutusominaisuuksiltaan vahvat lakat ovat edelleen varteenotettava vaihtoehto kohteissa joihin kohdistuu kovaa kuluttavaa rasitusta, kuten esimerkiksi ovet ja ovenkarmit. Perinteisesti korkealaatuiset lakat valmistettiin fenolimodifioidusta kiinanpuuöljystä tai pellavaöljystä. Suorat alkydilakat suoriutuvat yleensä huonommin. (Lambourne, Strivens 1999, s.376-377)

Lakkojen ongelmana on halkeilu ajan myötä, varsinkin mikäli lakan kuiva-ainepitoisuus on korkea. Lakkakerroksen permeabiliteetti on alhainen, mikä suojaa sitä puun kosteusliikkeiltä, mutta aivan kuten petsien tapauksessa, UV-säteily on pääasiallinen ongelma halkeilun ja puun valoeroosion takia. Ongelmaa on ratkottu lisäämällä lakkayhdisteisiin UV-säteilyä absorboivia ainesosia, kuten bentsofenoniryhmiä, keltaista läpikuultavaa rautaoksidia ja lentotuhkaa sekä muita valostabilointiaineita. (Lambourne, Strivens 1999, s.377)

Silikaattimaalit ovat vanhimpia ihmiskunnan hyödyntämiä pintakäsittelyitä. Periaatteessa yksinkertaisimmillaan silikaattimaali on käytännössä veteen sekoitettua maa-ainesta, kuten savea tai multaa, joka kuivuessaan tarttuu maalattavaan pintaan. Nykyaikaiset silikaattimaalit keksittiin noin 1818, jolloin kalium- ja natriumvesilasi kehitettiin pintakäsittelyyn soveltuviksi. Nykyisenkaltaiset yksikomponenttiset dispersiosilikaattimaalit tulivat markkinoille 1967. Vesilasipohjaiset maalit kovettuvat perinteisen vesipohjaisen dispersiomaalin tavoin veden haihtumisen myötä. Sen myötä käynnistyy tasaantumis- ja kovettumisprosessit, joita kutsutaan piioksidoitumiseksi (*silicification*). Silikaattimaalin tartunta alustaansa eroaa muista sideaineista, sillä piioksidoituminen muodostaa herkästi sidoksia myös alustaansa, jolloin kiinnittyminen ei ole ainoastaan fysikaalista. Silikaattimaalin erikoisuutena mainitaan, että se on erittäin höyrynläpäisevää ja erittäin kovaa ja kulutuksen

kestävää. Kovuus ja höyrynläpäisy aiheuttavat myös ongelmia puun tapauksessa, sillä näistä syistä maali halkeilee herkästi puun elämisen myötä. Silikaattimaalit kuivuvat aina mattapintaisiksi. Alkaalisilikaatit ovat piihapon estereitä, joita voidaan käyttää maalien sideaineena sitomaan pigmenttejä ja muita komponentteja. Ne eroavat vesilasimaaleista siten, että hydrolyysireaktion sivutuotteena ei synny emäksiä. (Funke et al. 2000, s.722-723)

Vahat ovat monipuolinen ryhmä kemikaaleja, joiden määritteleminen tyhjentävästi on osoittautunut äärimmäisen hankalaksi. Tässä tapauksessa tyydytään kuitenkin yleisimpään kemian kirjallisuudessa esiintyvään määritelmään: ”Vahat ovat pitkäketjuisten karboksyylihappojen estereitä ja pitkäketjuisia alkoholeja.” Tämä määritelmä ei ole ongelmaton, mutta kattaa perinteiset vahalaadut, kuten mehiläisvaha ja carnaubavaha. Vahat voidaan luokitella useisiin ryhmiin, joiden pääryhmät ovat luonnonvahat ja synteettiset vahat. Luonnonvahat syntyvät biokemiallisten prosessien tuotteena, ja voivat olla joko fossiilista alkuperää tai kasvi- / eläinkunnan tuotteita. Luonnonvahoja käytetään harvoin sellaisenaan teollisuusprosesseissa, sillä niitä on usein käsiteltävä ennen teollista hyödyntämistä. Luonnonvahoja jalostetaan usein tislaamalla, uuttamalla, hydratoimalla, valkaisemalla tai hapettamalla. Tarkoituksena on poistaa epäpuhtaudet raaka-aineesta. (Wolfmeier et al. 2000, s.113-114)

Puolisynteettiset vahat ovat luonnonvahoja, joita on muokattu kemiallisilla reaktioilla kuten esteröinnillä. Täyssynteettiset vahat eivät ole luonnollista alkuperää, ja ne ovat kehitetty 1900-luvulla. Synteettiset vahat, kuten Fischer-Tropsch- ja polyolefiini- ja polypropyleenivahat, päätyvät usein lisäaineiksi muiden vahojen sekaan. Esimerkiksi polyolefiinivahan sekoittaminen fossiiliseen parafiinivahaan säätää seoksen viskositeettia. (Wolfmeier et al. 2000, s.114-115)

4.4 Pintakäsittelytekniikat

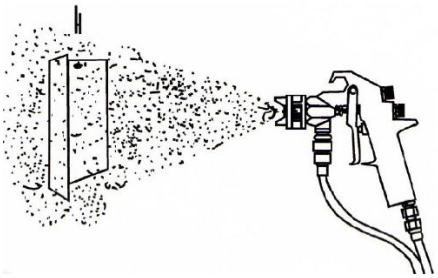
Tässä osiossa tehdään lyhyt katsaus uritetun CLT:n käsittelyyn soveltuvista pintakäsittelytekniikoista. Toisin sanoen, tarkastelu ei ole kattava läpileikkaus kaikista mahdollisista pintakäsittelytekniikoista, vaan erityistä huomiota kiinnitetään hyviksi todettuihin, olemassa oleviin ja uritetun kappaleen käsittelyyn soveltuviin tekniikoihin ja niihin liittyviä käytännöllisiä tai kustannusteknisiä ongelmia. Tarkoituksena on selvittää onko CLT:n pintakäsittelylle olemassa toimivia teollisia pintakäsittelyratkaisuja ja pohjustaa kokeellisessa osiossa tehtäviä pintakäsittelykokeiluja. Tarkastelusta rajataan pois työläät manuaaliset käsittelykeinot, kuten yksinkertaiset telaus- ja sivellinkäsittelyt, sillä ne tulevat kysymykseen vain pienen mittakaavan toiminnoissa tai rakennuskohteessa suoritettavissa käsittelyissä.

4.4.1 Ruiskumaalaus

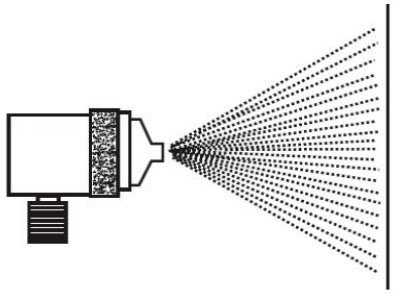
Ruiskumaalaus (spray) on yksi yleisimmistä pintakäsittelymetodeista arkkitehtonisissa ja teollisissa kohteissa. Verrattuna tavanomaiseen sivellintyöskentelyyn, se on monin verroin nopeampaa ja jälki on usein tasaisempaa. Ruiskumaalaus voidaan toteuttaa perinteisesti käsin, tai ruiskumaalauslaitteistoa voidaan hyödyntää teollisessa pintakäsittelylinjassa. Erilaisia ruiskutuslaitteita on lukuisia, ja yhteistä niille on pintakäsittelyaineen hajottaminen pieniksi ilman mukana kulkeutuviksi partikkeleiksi. Pintakäsittelyaineen pisaroitumiseen liitetään muuttujat kuten syöttö- ja ruiskutuspaine, maalin virtausominaisuudet, pintajännitys ja viskositeetti. (Wicks et al. 2007, s.475)

Perinteisen ruiskumaalauksen haittapuolena on heikko materiaalitehokkuus, sillä vain pieni osa ruiskutetuista partikkeleista lopulta päätyy maalattavalle pinnalle. Ilmaan jäävä ruiskutusylimäärä on kerättävä talteen, poistettava maalausympäristöstä ja estettävä sen pääsy vastamaalatulle pinnalle tai pinnoille, joita ei haluta käsitellä. Lisäksi, koska ruiskumaalaus hyödyntää usein ilmavirtaa partikkeleiden kuljettimena, on otettava huomioon ilmavirtaan liittyvät ongelmatapaukset. Esimerkiksi ilmavirran pyörteisyys ja kimpoaminen käsiteltävältä pinnalta saattaa aiheuttaa käsittelyn epäonnistumista paikoittain. (Wicks et al. 2007, s.475-476)

Hajoitusilmaruiskutuksessa (Kuva 27) maali hajotetaan pienellä kohdistetulla paineilmasuihkulla. Menetelmä on vanhin ruiskumaalausmetodi, mutta edelleen hyvin yleinen. Hajoitusilmaruiskutus soveltuu moneen tarpeeseen, ja ruiskutustulosta voidaan säätää eri keinoilla. Pintakäsittelyaineen viskositeetin lisäys kasvattaa partikkelikokoa. Ilmanpaineen lisäys vuorostaan pienentää partikkelikokoa, samoin kuin ruiskutussuuttimen halkaisijan tai aineen pintajännityksen pienentäminen. Tälle ruiskutustavalle löytyy myös modernimpi variaatio (Kuva 28), jossa korkean ilmanpaineen sijaan hyödynnetään matalampaa ilmanpainetta, mutta korkeaa ilmatilavuutta suhteessa perinteiseen tapaan. Tällä keinolla käsittelyn hyötysuhde paranee, sillä kappaleesta kimpoavan maalin määrä vähenee. (Wicks et al. 2007, s.476-478) Tämä on myös varteenotettava seikka uritetun pinnan käsittelyä koskien.



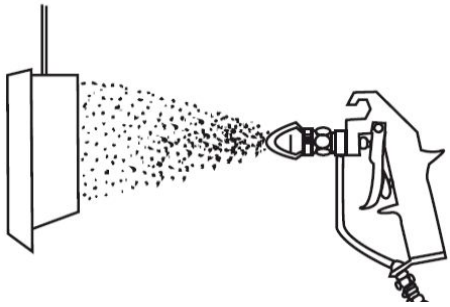
Kuva 27. Hajoitusilmaruiskutus. (Tikkurila 2008, s.19)



Kuva 28. Suurtilavuusmatalapaineruiskutus. (Tikkurila 2008, s.22)

Toinen vaihtoehto on poistaa paineilma ruiskutuksesta kokonaan, jolloin puhutaan niin sanotusta korkeapaineruiskutuksesta (Kuva 29). Tässä metodissa maali pakotetaan suuttimesta ulos korkealla paineella. Maali laajenee suuttimesta ulos tullessaan paine-eron myötä. Kun suurinopeuksinen ja laajeneva maali kohtaa ympäröivän ilman, virtaukset rikkovat peitteen ja muodostuu hieno maalisumu. Maalisumun ominaisuuksia voidaan muokata ympäröivän ilman nopeudella, suuttimella, viskositeetilla, paineella ja pintajännityksellä. Erona ilmaruiskutekniikoihin on se, että partikkelit ovat suurikokoisempia ja tasaisemmin jakautuneita ruiskun alueella, kun ilmaruiskutustekniikat tuottavat yleensä suihkun reunoja kohti ohuemman maalipeiton.

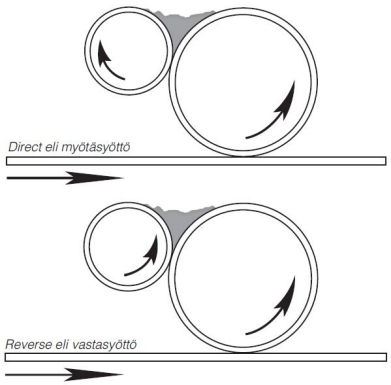
Korkeapaineruiskutus sallii nopeamman tuotantotahdin kuin ilmaruiskutustekniikat, mutta se asettaa vaatimuksia maalin ohenteelle, jonka tulisi olla voimakkaammin haihtuvaa kompensoidakseen suihkusta puuttuvan ilmakomponentin haihduttavan vaikutuksen. Korkeapainesuihkutus toisaalta vähentää maalausongelmia, jotka liittyvät suljettujen onkaloiden ja kolojen maalaamiseen, sillä maalipartikkelit lentävät suoraviivaisemmin kantavan ilmasuihkun puuttuessa. Toisaalta taas, ilmaruiskutus saattaa jossain tapauksissa helpottaa kolojen maalausta, sillä ilma kuljettaa partikkeleita mukanaan kauemmas maalattavasta kohdasta. Vesipohjaiset maalit ja lateksimaalit ovat ongelmallisia korkeapaineruiskutuksessa, sillä vesi sitoo itseensä ilmaa paineistuksen aikana ja se vapautuu ruiskutuksen jälkeen maalipinnassa, jolloin seurauksena on pieniä kuplia sisältävä maalipinta. (Wicks et al. 2007, s.478)



Kuva 29. Korkeapaineruiskutus. (Tikkurila 2008, s.20)

4.4.2 Telakonepinnoitus

Telakonepinnoitus tapahtuu yksinkertaisella laitteistolla, jota kutsutaan jossain tapauksessa myös maalivalssiksi. Telat uivat joko maalikaukalossa, jossa on annosteleva huuli telaa vasten, tai sitten annostelu hoidetaan erillisellä syöttötelalla. Syöttötelan pyörimissuuntaa ja etäisyyttä muuttamalla saadaan aikaan erilaista pintastruktuuria maalipintaan. Esimerkiksi, vastasyöttömetodilla (Kuva 30) saadaan aikaisesi tasaisempi pinta, mutta ohuempi kertakäsittelykalvo, jolloin yleensä tarvitaan useampi peräkkäinen käsittelytela tai käsittelykerta. Telakonepinnoitus on kustannustehokas metodi laajoille tasaisille pinnoille, kun käsiteltävät sarjat ovat suuria ja yhdenmukaisia. (Wicks et al. 2007, s.485-486; Tikkurila 2008, s.25)

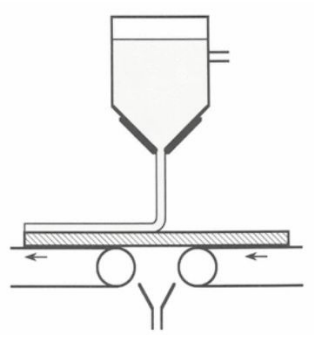


Kuva 30. Telakonepinnoituksen periaate ja kaksi syöttövariaatiota. (Tikkurila 2008, s.25)

Telan kumipinnoitus vaikuttaa maalin levitykseen ja täytyy usein sovittaa pintakäsittelyaineelle soveltuvaksi, jottei se kulu tai reagoi maalin kanssa. Telasta voidaan jättää myös siivuja pois, jolloin kyseinen kohta jää käsittelemättä. Uritetun pinnan kannalta mielenkiintoisimpia ovat harjatelat, joilla voidaan levittää myös epätasaisemmille pinnoille. Mikäli pintaa halutaan tasoittaa, voidaan levitystelan jälkeen laittaa kulkemaan myös erillinen tasoitustela. (Wicks et al. 2007, s.487-488; Tikkurila 2008, s.25)

4.4.3 Valukonepinnoitus

Valukonepinnoitus on yleinen pinnoitustapa levymäisille ja jopa lievästi profiloiduille tuotteille, kuten seinäpaneelit. Sen toiminta on erittäin nopeaa ja linjanopeutta voidaan helposti muuttaa. Laitteen toiminta perustuu raon läpi pumpattavan pintakäsittelyaineen muodostavaan verhoon, jonka läpi maalattava kappale kuljetetaan. Verhon tulee olla leveämpi kuin käsiteltävä kappale, jotta maalikerroksesta tulee tasapaksu myös reunaalueilla. (Tikkurila 2008, s.24; Wicks et al. 2007, s.487-488)



Kuva 31. Valukonepinnoituksen periaate. (Kistler, Schweizer 1997, s.464)

Pinnoituskerroksen paksuutta voidaan säätää muuttamalla suutinrakoa, pumppauspainetta, maalin viskositeettia tai kuljetinnopeutta. Erityistä huolta on pidettävä, ettei annostelukaukaloon pääse epäpuhtauksia, sillä muuten verho voi reikiintyä ja maalikerros jää puuttumaan tietyiltä alueilta kokonaan. On myös mahdollista kuljettaa kaavaria verhon takana peiton varmistamiseksi, mutta usein valupinnoitus tuottaa jo itsessään täydellistä jälkeä ennen kaikkea taloudellisesti. (Tikkurila 2008, s.24; Wicks et al. 2007, s.487-488) Kaavarin käyttö voisi olla ratkaisu myös uritetun pinnan valupinnoituksessa.

4.5 Pintakäsittelyn vesihöyrynläpäisykyky ja siihen vaikuttavat tekijät

Pintakäsittely toimii rajapintana puun ja huoneilman välissä. Pintakäsittelyllä on siis merkittävä rooli niin puun kosteusteknisen toiminnan, kuin huoneilman kannalta. Tässä kappaleessa syvennytään pintakäsittelyn ominaisuuksiin kosteudenläpäisyn kannalta ja tarkastellaan kuinka pintakäsittely voi toimia yhtä aikaa suojana ja funktionaalisena kerroksena asumisviihtymisen ja terveyden edistäjänä.

Kappaleessa pyritään muodostamaan käsitys siitä, onko viime aikoina paljon esillä ollut ’hengittävä pintakäsittely’ mahdollinen CLT:n tapauksessa, ja mitä se tarkoittaa halkeilun ja sisäilmalaadun kannalta. CLT on pintakäsittelyn kannalta erikoisasemassa, sillä se tarjoaa merkittävän puupinta-alan lisäämisen asuinympäristössä, ilman erillisiä panostuksia pintamateriaaleihin. On tärkeää olla perillä pintakäsittelyn kosteusominaisuuksista, jotta tätä CLT-materiaalin luontaista mahdollisuutta ei tärvellä. On muistettava, että yleisesti ottaen pintakäsittely vähentää puun kosteusaffiniteettia ja kosteuspuskurointikykyä (van Meel et al. 2011).

4.5.1 Diffuusio ja vesihöyrynläpäisykyky

Pintakäsittelyn toiminnasta kosteuden suhteen on vallalla useita ristiriitaisia käsityksiä, ja aihe on edelleen osittain kiistanalainen. Graystone (2001) korostaa kokoelma-artikkelissaan, että realististen käsitysten muovaaminen pintakäsittelyn ominaisuuksista,

kuten ”hengittävyys”, tieteellisen tiedon perusteella on kestänyt pitkään eikä ole vieläkään yksiselitteistä.

Vedenläpäisy kalvon läpi on termodynaaminen prosessi. Sen taustat ovat todella monimutkaiset ja kosteuskinetiikan mallit ennustavat sitä vielä melko heikosti. On kuitenkin selvää, että diffuusio on päätekijä kosteuden liikkeissä kalvon läpi, ja siinä merkittävimpänä tekijänä vaikuttaa konsentraatioero läpäisevän kalvon molemmin puolin. Tämä ilmiö tunnetaan niin sanottuna Fickin ensimmäisenä lakina, joka tarkoittaa, että staattisessa systeemissä kosteusvuo on verrannollinen kosteuskonsentraation gradienttiin. (Graystone 2001)

Diffuusioprosessi etenee siten, että vesi absorboituu puuhun, jonka jälkeen vesi hajaantuu aineen matriisiin. Sen jälkeen diffuusion vaikutuksesta vesi siirtyy pintakäsittelypolymeerin läpi konsentraatiogradientin määrittelemää reittiä. Pintakäsittelyn ulkopinnalla tapahtuu desorptio. Tutkimus lähtee usein siitä olettamuksesta, että kalvo on täysin yhtenäinen, eikä siis sisällä esimerkiksi halkeamia, reikiä tai kuplia. Tällöin tärkeimmät muuttujat vesihöyryn läpäisykykyyn liittyen ovat: polymeerin luonne, veden vaikutus polymeeriin, lämpötila, kalvon paksuus sekä pigmentointi ja muut maalikomponentit. (Graystone 2001)

4.5.2 Polymeerin vaikutus permeabiliteettiin

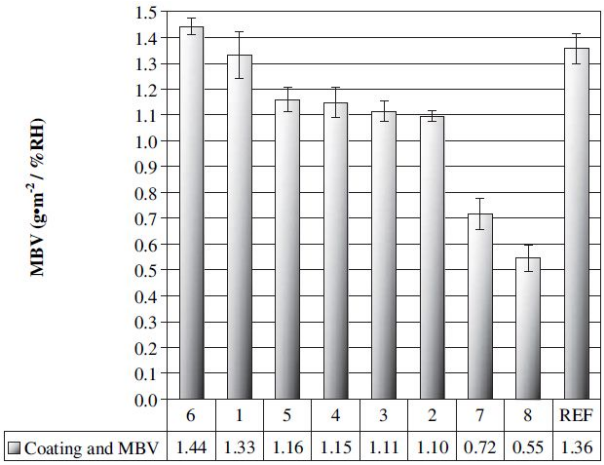
Yleisesti ottaen, vesipohjaisten (akryyli) pintakäsittelyjen yleistyminen on saanut aikaan suuremman vesihöyrynläpäisykyvyn pintakäsittelyissä. (De Meijer, Militz 2001) Näkökulmasta riippuen tämä on ongelma ja mahdollisuus. Halkeilun kannalta lisääntynyt kosteussisällön vaihtelu puussa on ongelmallista, mutta sisäilmavaikutusten kannalta kosteuden parempi siirtyminen on edullista.

Liuotinpohjaisten alkydikäsittelyjen on todettu useassa tutkimuksessa hidastavan merkittävästi kosteuden liikettä kalvon yli. Tämä johtuu siitä, että liuotinpohjaiset polymeerit kiinnittyvät toisiinsa tiheämmin ja tiukemmin silloittumalla. Tästä seuraa, että molekyyliketjut ovat jäykempiä ja kristallisoituneita, haitaten näin veden etenemistä kalvon läpi. Taas akryylien tapauksessa polymeerit kiinnittyvät koalesenssin vaikutuksesta veden haihtuessa, jolloin veden on helpompi kiertää tai läpäistä dispergoituneet sideainehiukkaset. (Graystone 2001)

Kuusella akryylimaalien havaittiin pienentävän vedenläpäisykykyä merkittävästi ja syyksi epäiltiin kuusisolukossa olevien pienien huokosten sulkeutumista polymeerin ja pigmentin ansiosta. Ilmiötä vahvistaa kuivaus ennen pintakäsittelyä, joka sulkee huokosia, jotka polymeeri pintakäsittelyn yhteydessä lukitsee. Männyllä vastaavaa ilmiötä ei havaita, ja pintakäsittely imeytyykin paljon syvemmälle (1000µm) kuin kuusen tapauksessa, jossa vain ensimmäiset yksi tai kaksi solukerrosta kostuu maalista. Syy tähän on männyn huokosten

moninkertainen koko suhteessa kuusisolukon huokosiin. Samassa tutkimuksessa todettiin myös, että alkydipinnoitteet saavat aikaan lähes täysin vedenpitävän kalvon puulajista huolimatta. (van Meel et al. 2011) Tämä on tärkeä seikka suunniteltaessa pintakäsittelyjärjestelmiä CLT:lle, sillä CLT:n raaka-aineena käytetään valmistajasta riippuen usein joko mäntyä tai kuusta. Näiden materiaalien kosteustekninen käytös peittävillä pintakäsittelyillä on huomattavan erilaista.

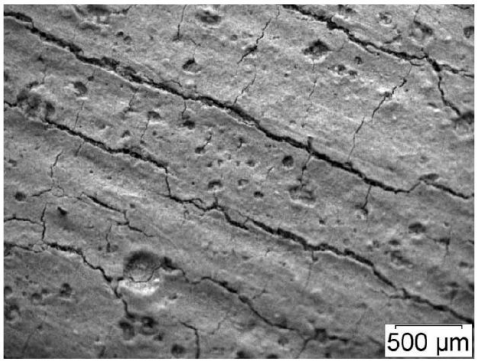
Alkaalisilikaattien toimintaa on tutkittu vähän puupinnoilla. Silikaattien toimintatapa kalvonmuodostuksessa poikkeaa merkittävästi muista sideaineista. Hameury (2007) tutki artikkelissaan eri pintakäsittelyjärjestelmien kosteuspuskurointiominaisuuksia, jotka ovat läheisesti kytkeytyneet pintakäsittelyn kosteustoimintaan ja vesihöyryn läpäisyyn. Kosteuspuskurointiominaisuus käsitteenä kuvataan tarkemmin kappaleessa 5.2, mutta lyhyesti se tarkoittaa materiaalin kykyä varastoida ja luovuttaa kosteutta. Hameuryn (2007) tutkimuksessa vertailtiin silikaattijärjestelmien toimintaa vesipohjaiseen kasviöljykuultomaaliin, vesipohjaiseen pellavaöljymaaliin sekä perinteisiin akryylilatekseihin sekä käsittelemättömään verrokkiin. Koekappaleet olivat mäntyä. Tuloksista mielenkiintoisin liittyy käsittelyjärjestelmään, joka koostui kaksikomponenttisesta vesipohjaisesta piisilikaattimaalista ja vastaavasta pohjamaalista. Tällä järjestelmällä puun kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta ylitti käsittelemättömän verrokin noin kuudella prosentilla. Pellavaöljy ja kasviöljymaalit ylsivät vastaavasti noin 80% kosteuspuskurointikykyyn verrokkiin nähden, kun taas perinteiset akrylaattilateksimaalin tulokset jäivät puoleen tai alle, suhteessa käsittelemättömään verrokkiin. Tulokset on esitetty kuvassa 32



Kuva 32. Eri pintakäsittelyjärjestelmien kosteuspuskurointikyky suhteessa käsittelemättömään verrokkiin. Käsittely nr.6=piipohjainen alkaalisilikaattimaali+pohjamaali, nr.1=pelkkä pohjamaali, nr.5=alkalisilikaattimaali + pellavaöljymaali, nr.4=vesipohjainen kasviöljykäsittely, nr.3 ja 2=vesipohjainen pellavaöljymaali, nr. 7 ja 8=akryylilateksimaali±pohjamaali. (Hameury 2007)

Alkaalisilikaattimaalin hyvä kosteudensitomiskyky perustunee piisilikaatin hydrofiilisyyteen sekä pintakäsittelyn suureen ominaispinta-alaan (ks. Kuva 33). Erityisen mielenkiin-

toista tästä tekee se, että hygroskooppisen pintakäsittelyn toimintaa ei ole kirjallisuudessa juurikaan käsitelty, ja alkaalisilikaattimaalin tapauksessa kosteuden hallitsemattoman lisääntymisen riski pienenee, sillä pintakäsittely on erittäin huokoinen, hengittävä ja kosteutta siirtävä.



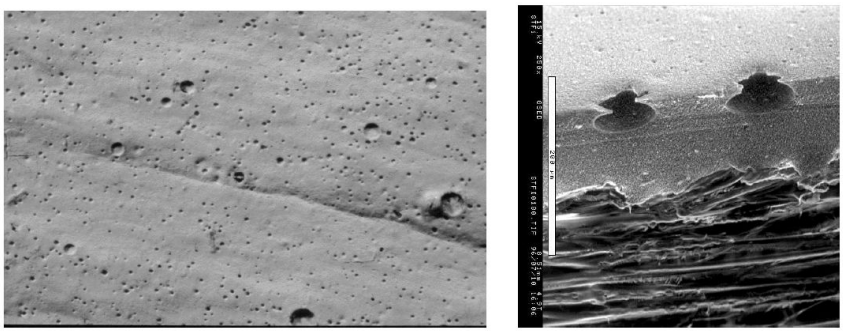
Kuva 33. Valomikroskooppikuva vesipohjaisesta alkalisilikaattimaalipinnasta, jossa näkyy selkeästi pinnan huokoinen ja rakoileva rakenne. (Hameury 2007)

4.5.3 Pigmentoinnin vaikutus permeabiliteettiin

Pigmenttifaasin sisältö vaikuttaa huomattavasti kaikkien sideaineiden toimintaan mekaanisesta, optisesta ja kosteusteknisestä näkökulmasta. Pigmentin tilavuuskonsentraatio (PVC) on yksi tärkeimmistä maalipinnan ominaisuuksien kanssa korreloivista muuttujista ja kriittisessä tilavuuskonsentraatiossa (CPVC) havaitaan ominaisuuksissa käänne vastakkaiseen suuntaan. Vesihöyrynläpäisyä tarkasteltaessa, kun maalin pigmenttipitoisuus nousee kohti kriittistä pistettä, sen läpäisykyky pienenee, koska pigmenttipartikkelit tukkivat kosteuden etenemisreittejä ja tällöin vastaavan kosteusvuon saavuttaminen vaatii suuremman kosteusgradientin. (Graystone 2001)

Edellä kuvattu korrelaatio pätee, jos pigmenttifaasin aineet ovat yhteensopivia sideaineen kanssa siten, että sideaine kykenee kastelemaan pigmenttipartikkelit kauttaaltaan, ja että pigmentit itsessään eivät ole hydrofiilisiä. Muussa tapauksessa pintakäsittelyn vedenläpäisevyys saattaa kasvaa merkittävästi PVC:n mukana, varsinkin jos pigmentit paakkuuntuvat paikallisiksi keskittymiksi. (Graystone 2001)

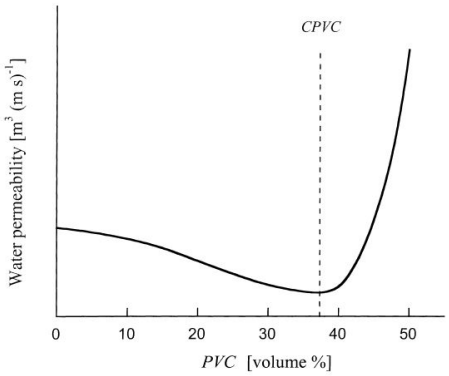
Jos maalin koostumuksessa lähestytään kriittistä pigmentin tilavuuskonsentraatiota, tai ylitetään se, permeabiliteetissa havaitaan jyrkkä kasvu. Tässä tilanteessa voidaan kuvailla, että pintakäsittely muuttuu mikrohuokoiseksi (ks. Kuva 34), sillä sideaine ei kykene enää täyttämään ja kastelemaan kaikkia pigmenttipartikkeleita tai niiden synnyttämiä aukkoja. Toisaalta, kasvaneen permeabiliteetin varjolla menetään monia mekaanisia ominaisuuksia, kuten sitkeys venymää vastaan. Tästä syystä puulle tarkoitetut maalit valmistetaan alle CPVC-pisteen pigmenttikonsentraatiolla. (Graystone 2001)



Kuva 34. Lähikuva peittävästä vesipohjaisesta akryylikäsittelystä. Kuvassa nähdään selkeästi dispersiomaalin huokoinen rakenne. Vasemmalla valomikroskooppikuva ja oikealla elektronimikroskooppikuva. (Ekstedt 2002, s.11)

Kuivunutta akryylimaalipintaa täytyy pitää aina huokoisena. Kosteus siirtyy dispersiolateksikalvossa kokeiden perusteella suurimmaksi osaksi lateksipartikkeleiden ja sideaineen rajapinnassa ja tästä syystä täysin hydrofobinenkaan pigmenttiaine ei tuota läpäisemätöntä kalvoa useimpien akryylimaalien tapauksessa. Koska kosteusaffiniteetti ja vesihöyrynläpäisykyky ovat ominaisuuksia, joita maalin valmistuksessa yritetään usein minimoida, niin maalinvalmistuksessa tavoitellaan usein ns. ideaalipigmentointia. (Van der Wel, Adan 1999, s.10)

Ideaalipigmentointi koostuisi hydrofobisista, tasajakaantuvista partikkeleista. Pigmentit ovat usein tiheitä ja veteen liukenemattomia. Ideaalitapauksessa pigmentit eivät muodostaisi ryppäitä kalvoon ja partikkelit sitoutuisivat tiukasti sideaineeseen, jolloin rajapintaaan ei jäisi tilaa vedelle tai vesihöyrylle. Tällaisessa tapauksessa veden ainoa reitti kalvon läpi, olisi välttää kaikki partikkelit kalvossa, joka kasvattaisi diffuusioreitin pituutta merkittävästi. Ideaalipigmentaatio vesihöyryn läpäisevyyden kannalta tulee asymptoottisesti vastaan lähestyttäessä kriittistä pigmentin tilavuuskonsentraatiota. (Van der Wel, Adan 1999, s.11)

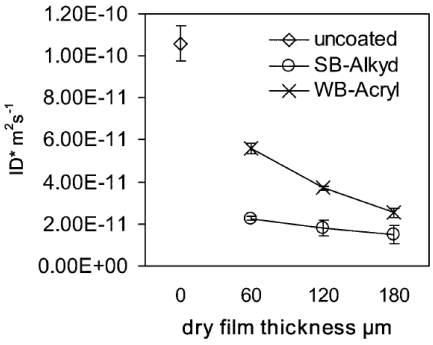


Kuva 35. Tyylitelty kuvaaja kalvon vedenläpäisevyydestä pigmentin tilavuuskonsentraation funktiona. Katkoviiva kuvaa kriittistä tilavuuskonsentraation arvoa. (Van der Wel, Adan 1999)

Yhteenvetona pigmentointia voidaan kuvata monisyisenä optimointina eri ominaisuuksien suhteen, ja usein joistain ominaisuuksista joudutaan tinkimään toisen ominaisuuden nimissä. Pigmentoinnin onnistuminen riippuu pigmentin toiminnasta yhdessä sideaineen kanssa, ja pigmentin konsentraatiosta seoksessa. Vaikka konsentraatio olisi oikea, voidaan kalvossa silti havaita ongelmia, mikäli pigmentti ei ole täysin kastunut sideaineesta tai pigmentti on paakkuuntunut. Paakkuuntumisen seurauksena kalvoon tulee häiriöitä ja reikiä, jotka sallivat vesihöyryn liikkua vapaammin kuin kalvon ominaisuudet ja raaka-aineiden mittasuhteet antaisivat odottaa. Joissain tapauksissa siis pigmentin lisääminen maaliin tuottaakin maalin, jonka kosteudenläpäisevyys on suurempi kuin pigmentoimattoman maalin, vaikka teoriassa ilmiö pitäisi olla lähes aina päinvastainen. (Van der Wel, Adan 1999, s.12)

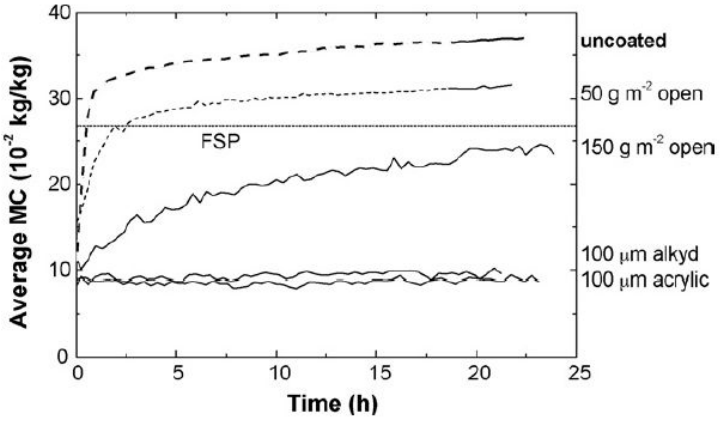
4.5.4 Kalvonpaksuuden vaikutus permeabiliteettiin

Kalvon paksuus vaikuttaa vesihöyrynläpäisykykyyn intuitiivisesti. Paksumpi kalvo sallii diffuusiota huonommin, mikä on selkeästi nähtävissä myös kuvassa 36. Kuvasta voidaan havaita myös selkeä ero alkydi- ja akryylipintakäsittelyjen toiminnassa vesihöyrynläpäisevyyden kannalta.



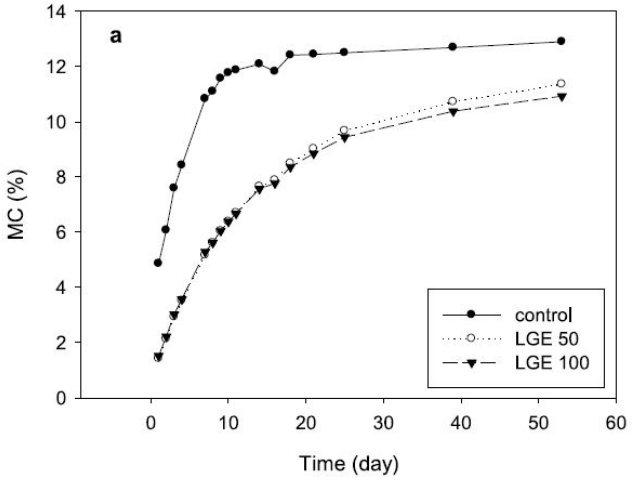
Kuva 36. Kalvonpaksuuden vaikutus diffuusioherkkyyteen kuusikoekappaleilla, jotka on käsitelty eri paksuisilla kerroksilla joko liuotinpohjaista alkydimaalia tai vesipohjaista akryylimaalia. (van Meel et al. 2011)

Erikoistapauksena voidaan tarkastella kalvoa muodostamattomia pintakäsittelyjä. Van Meel et al. (2011) näyttävät kokeissaan, että ns. avoimet pintakäsittelyaineet, kuten heidän tapauksessaan alkydipohjainen petsi, kykenevät hidastamaan puun kosteusdiffuusiotaipumusta. Toisaalta taas, ne sallivat kosteuden liikkua huomattavasti enemmän kuin peittävät pintakäsittelyt. Kuvassa 37 nähdään, että korkeampi levitysmäärä petsiä pystyy hillitsemään veden siirtymistä puusolukkoon upotuskokeessa merkittävästi suhteessa käsittelemättömään verrokkiin. Siitä huolimatta, ero on suuri suhteessa kalvon muodostaviin pintakäsittelyihin. Tämä kuitenkin puhuu niin sanotun aidosti hengittävän pintakäsittelyn olemassaolon puolesta.



Kuva 37. Keskimääräinen kosteussisältö mitattuna pintakäsittelyn alta vesiupotuksessa. Koekappaleet ovat kuusta ja pintakäsittelyinä on alkydipohjainen petsi (open) kahdella eri levitysmäärällä sekä perinteinen alkydi- ja akryylipintakäsittely. (van Meel et al. 2011)

Vahojen osalta, vastaavasti toimii ainakin vesipohjainen montaanivahaemulsio, joka osoitti kokeissa tehokasta vastuskykyä, sekä vesihöyryn että nestemäisen veden diffuusiota vastaan. Kuva 38 esittää havainnollisesti, kuinka vahakäsitelty koekappale ei saavuta käsittelemätöntä verrokkiaan edes kuuden kymmenen päivän tasaannutusjakson aikana. (Lesar, Humar 2011) Valitettavasti kirjallisuudesta ei löytynyt syklistä koejärjestelyä vastaavalla käsittelyllä.



Kuva 38. Vesipohjaisella montaanivahaemulsiolla käsiteltyjen kuusikoekappaleiden kosteuden lisääntyminen suhteessa käsittelemättömään verrokkiin. Tasaannutus tehtiin 82% suhteellisessa kosteudessa. (Lesar, Humar 2011)

4.6 Pintakäsittelyn vaikutus CLT:n halkeiluun

Yhteenvetona todettakoon, että pintakäsittelyllä on teoreettinen mahdollisuus peittää pienimmät puun halkeamat alleen. Käytännössä kuitenkin maalikalvot ja kuultokäsittelyt ovat niin heikkoja, ettei peittävyys usein riitä halkeamien piilottamiseen. Pintakäsittelyllä on

kuitenkin vaikutus maalatun puun kosteuskäyttäytymiseen, esimerkiksi hidastamalla kosteuden luovutusta puusta. Pintakäsittely voidaan valmistaa siten, että sallii kosteuden liikkua kalvon läpi ja näin puu pääsee osallistumaan huoneilman säätelyyn. Toisaalta, tällainen höyrynläpäisevä kalvo ei suojaa puuta niin hyvin, ja lisäksi altistaa pinnan nopeille kosteusmuutoksille, jolloin halkeilu saattaa lisääntyä. On huomattava myös, että niin vahoilla kuin maaleillakin on kyky estää UV-säteilyn haitallista vaikutusta puuhun, joka osaltaan myös auttaa vähentämään halkeilua ja virheitä pinnassa (Lesar, Humar 2011).

Fragiacomo et al. (2011) tutki puukappaleen pinnassa esiintyviä kosteusliikkeiden aiheuttamia jännityksiä, ja toteavat, että jännitykset kasvavat niin suuriksi, että seurauksena on väistämätöntä halkeilua pinnoittamattomilla puupinnoilla. Pinnoituksella voitiin vähentää jännityksiä merkittävästi ja sulkevien pinnoitteiden käyttöä halkeilun estossa suositellaankin. Erityisesti he mainitsevat, että hankalimmat olosuhteet ovat pohjoisimmilla leveyspiireillä, sillä ilmaston kosteudenvaihtelut ovat suurimpia ja tuottivat siten suurimmat kosteusgradientit. Esimerkkinä heidän huomioistaan toimii taulukossa 5 esitetyt tulokset. Tuloksista nähdään selkeästi suojaavan kerroksen edut halkeilun kannalta.

Taulukko 5. Maksimivetojännitys liimapuukappaleen pinnalla eri pintakäsittelyillä. (Fragiacomo et al. 2011)

Paikka	Pintakäsittely	$\sigma_{t,max}$ (MPa)
	Käsittelemätön	6.67
Rovaniemi	Alkydiöljymaali	0.91
	PVC-lakka	0.38

5 PUUNKÄYTÖN VAIKUTUKSET SISÄILMAAN SUOMESSA

Uritetun CLT-pinnan hyödyntäminen kasvattaa puupinta-alan määrää sisätiloissa. Tästä syystä tässä kappaleessa tarkastellaan puunkäytön edellytyksiä parantaa sisäilman laatua Suomen olosuhteissa. CLT on erikoistapaus sisäilmavaikutusten kannalta suhteessa perinteisiin rankarakenteisiin tai kilpaileviin rakennusmateriaaleihin, sillä CLT-elementillä on valtava potentiaali vaikuttaa huoneilman kosteuteen ja huoneilman lämpötilanvaihteluihin. Lopuksi tutkitaan voitaisiinko CLT:n ja talotekniikan yhteisvaikutuksella saavuttaa merkittäviä lämmitysenergiasäästöjä.

5.1 Puun terminen massa ja huoneilman lämpötila

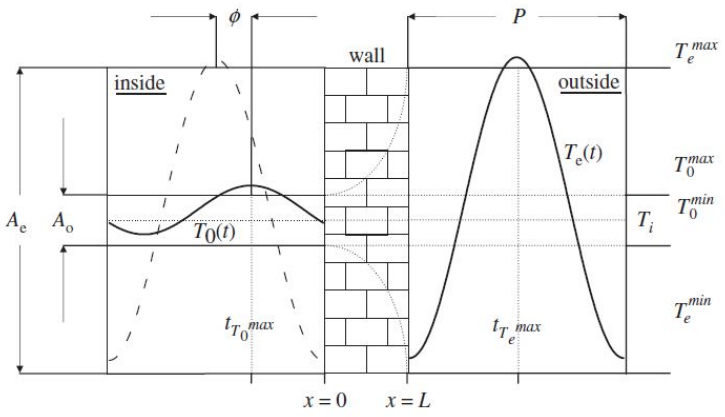
Puun hygroterminen potentiaali tukee puunkäytön suosimista sisätiloissa. Puulla pystytään vaikuttamaan asumismukavuuteen kaikilla aistinvaraisilla havainnoilla mitattuna, sekä lisäksi, sillä on mahdollisuus vaikuttaa rakennuksen energiankulutukseen. Paljaan puupinnan vaikutusta huoneilman kosteuteen on tutkittu verrattain paljon, mutta vähemmälle huomiolle on jäänyt massiivisten puukomponenttien terminen inertia ja sen hyödyntäminen rakennusten energiatehokkuuden ja asumisviihtyvyyden lisääjänä. Termisellä inertialla tarkoitetaan puun kykyä varastoida ja luovuttaa lämpöä, jolloin suuret määrät puuta rakenteessa toimivat puskurivarastona lämpöenergialle, vastaavasti kuin varaavat tulisijatkin toimivat. Ominaisuudet toimivat talvella lämmitysenergian säästönä ja kesällä taas ilmastointi- ja jäähdytystarpeen vähentäjänä passiivisin keinoin. (Hameury, Lundström 2004, s. 1-2; Rafidiarison et al. 2012, s. 1)

Puun terminen diffuusiokyky tarkoittaa sitä, kuinka nopeasti lämpötilaimpulssi etenee aineen tai seinän läpi. Puun terminen diffuusiokyky on riittävän alhainen, joten se kykenee hidastamaan lämpötilanmuutoksen havainnointia rajapinnan yli mitattuna. Puun lämmöneristävyysominaisuus puolestaan aiheuttaa sen, että mitattu lämpötila sisä- ja ulkopinnalla on eri, eli toisin sanoen puu kykenee pienentämään lämpöimpulssin amplitudia. Ilmiötä kuvaavat kaksi muuttujaa, niin sanottu lämpötilan aikaviive ja lämpöalenematekijä (*time lag and decrement factor*). (Rafidiarison et al. 2012, s.2)

Lämpötilan aikaviivettä ja lämpöalenematekijää havainnollistaa kuva 39. Näillä muuttujilla voidaan arvioida ja vertailla eri materiaalien ja rakenteiden toimivuutta lämpötilavaihteluiden suhteen. Lämpötilan aikaviive siis ilmoittaa, kuinka kauan lämpötilamuutoksella kestää edetä rakenteen läpi (ks. kaava 3). Kaavassa on esitetty kaikki lämpötila-asetelmat. Muuttujat on määritelty siten, että $t_{T_0^{max}}$ ja $t_{T_e^{max}}$ vastaavat ajanhetkeä (yksikkö h), jolloin

vastaava lämpötila sisällä tai ulkona on saavuttanut maksiminsa. P on lämpöimpulssin kesto. (Rafidiarison et al. 2012, s.7; Asan 2006)

$$\phi = \begin{cases} t_{T_0^{max}} > t_{T_e^{max}} \Rightarrow t_{T_0^{max}} - t_{T_e^{max}} \\ t_{T_0^{max}} < t_{T_e^{max}} \Rightarrow t_{T_0^{max}} - t_{T_e^{max}} + P \\ t_{T_0^{max}} = t_{T_e^{max}} \Rightarrow P \end{cases} \quad (3)$$



Kuva 39. Havainnekuva lämpöimpulssin läpäisystä ulkoa sisätiloihin. Lämpötilan aikaviivettä kuvaa symboli ϕ ja lämpöalenemaa kuvaa suhde $f=A_0/A_e$ (Asan 2006)

Lämpöalenematekijä on käytännössä lämpöimpulssin maksimi- ja minimiarvojen erotusten suhde tarkastelurajapinnan yli. Mikäli rakenne pystyy vaimentamaan lämpöimpulssin kokonaan, lämpöalenematekijän arvo lähestyy asymptoottisesti nollaa. Vastaavasti, jos rakenne ei vaimenna lämpöimpulssin amplitudia lainkaan, tekijä saa arvon 1. Viitaten kuvan 39 merkintöihin, lämpöalenematekijä f lasketaan kaavalla 4 seuraavasti:

$$f = \frac{A_0}{A_e} = \frac{T_0^{max} - T_0^{min}}{T_e^{max} - T_e^{min}}, \quad (4)$$

jossa termit A_0 ja A_e ovat lämpötilan amplitudi rajapinnan sisä- ja ulkopuolella. T-muuttujat edustavat lämpötilan maksimi ja minimiarvoja vastaavasti rajapinnan eripuolilla. Taulukossa 6 on esitetty joitakin arvoja edellä kuvatuille muuttujille eri aineilla ja ainevahvuuksilla. (Asan 2006)

Taulukko 6. Eri aineiden laskennallisia lämpötilan aikaviive ja lämpöalenematekijän arvoja eri ainevahvuuksilla. (Tiedot koostettu teoksesta: Asan 2006)

Paksuus	1 mm		10 mm		25 mm		50 mm		0,1 m		0,2 m		0,3 m		1,0 m	
Materiaali	$\phi(h)$	f	$\phi(h)$	f	$\phi(h)$	f	$\phi(h)$	f	$\phi(h)$	f	$\phi(h)$	f	$\phi(h)$	f	$\phi(h)$	f
Puu	*0,02*	*0,717*	*0,24*	*0,559*	*0,79*	*0,403*	*2,27*	*0,259*	*5,89*	*0,0103*	*13,31*	*0,014*	*20,28*	*0,000*	*>24*	*≈0*
Tiili	*0,01*	*0,735*	*0,17*	*0,683*	*0,46*	*0,609*	*1,15*	*0,506*	*2,83*	*0,343*	*6,65*	*0,137*	*9,86*	*0,053*	*>24*	*≈0*
Betoni	*0,01*	*0,733*	*0,16*	*0,672*	*0,44*	*0,588*	*1,14*	*0,477*	*2,88*	*0,312*	*6,81*	*0,118*	*10,31*	*0,043*	*>24*	*≈0*
Kevytbetoni	*0,01*	*0,710*	*0,09*	*0,517*	*0,26*	*0,355*	*0,92*	*0,231*	*2,81*	*0,123*	*7,81*	*0,035*	*12,31*	*0,009*	*>24*	*≈0*
Teräs	*0,04*	*0,741*	*0,38*	*0,736*	*0,89*	*0,719*	*1,79*	*0,658*	*3,05*	*0,516*	*4,41*	*0,313*	*5,09*	*0,227*	*8,95*	*0,031*
Alumiini	*0,02*	*0,741*	*0,23*	*0,739*	*0,55*	*0,733*	*1,13*	*0,708*	*2,09*	*0,631*	*3,43*	*0,459*	*4,14*	*0,352*	*5,86*	*0,113*
Lasi	*0,02*	*0,735*	*0,39*	*0,692*	*0,73*	*0,624*	*1,64*	*0,517*	*3,77*	*0,329*	*7,74*	*0,116*	*11,65*	*0,041*	*>24*	*≈0*
Kipsilevy	*0,01*	*0,732*	*0,12*	*0,660*	*0,28*	*0,564*	*0,89*	*0,45*	*2,34*	*0,299*	*5,93*	*0,123*	*9,27*	*0,048*	*>24*	*≈0*
Uretaani	*0,00*	*0,632*	*0,01*	*0,271*	*0,03*	*0,0139*	*0,12*	*0,077*	*0,42*	*0,040*	*1,63*	*0,020*	*3,36*	*0,120*	*17,31*	*≈0*
Lasikuitu	*0,00*	*0,656*	*0,01*	*0,322*	*0,10*	*0,74*	*0,52*	*0,099*	*1,71*	*0,051*	*5,70*	*0,018*	*9,92*	*0,006*	*>24*	*≈0*

Yllä olevasta taulukosta nähdään, että tyypillisillä runkopaksuuksilla, 100-200mm, puun lämpötilan aikaviiveen ja lämpöalenematekijän arvot ovat huomattavan paljon suotuisammat kuin muilla materiaaleilla. Betoniin ja tiileen verrattuna, puun lämpötilan aikaviiveen arvo on kaksinkertainen ja lämpöalenematekijän arvo on noin 1/30 – 1/10 suhteessa vastaaviin. Käytännössä tämä tarkoittaa, että mikäli seinärakenne sisältää paksun kerroksen massiivipuuta, niin esimerkiksi raju ulkolämpötilan muutos välittyy rakenteen sisäpinnalle huomattavan pitkän ajan jälkeen, ja lämpöimpulssin voimakkuus on tippunut lähes sadasosaan alkuperäisestä. Betoni, teräs tai tiilirunko laskisi lämmön huomattavasti nopeammin lävitse. Käytännössä eriste kykenee tasoittamaan eroja eri rakennemateriaalien välillä, mutta esimerkiksi jos rungossa on rakenteellisia kylmäsiltoja, voidaan ne jättää käytännössä huomiotta puurakenteisessa ratkaisussa.

Muita puun termiseen käyttäytymiseen liittyviä muuttujia ovat ominaislämpökapasiteetti c_p, lämmönjohtavuus λ, ja johdannaisyksiköt: materiaalin effuusiokyky (*thermal effusivity*) b ja diffuusiokyky (*thermal diffusivity*) a. (Hameury 2006, s.21) Diffuusiokyky (yksikkö m^2/s) tarkoittaa nopeutta, jolla aine mukautuu ympäröivään lämpötilaan, ja se määritellään materiaalin lämmönjohtokyvyn suhteena aineen tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin tuloon (kaava 5). Effuusiokyky tarkoittaa materiaalin kykyä vaihtaa lämpöenergiaa ympäristönsä kanssa. Sen yksikkö on ($W \cdot s^{½} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) ja määritellään (kaava 6) lämmönjohtavuuden, tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin tulon neliöjuurena.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}. \quad (5)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \ . \quad (6)$$

Näillä tiedoilla voidaan myös tarkastella lämpötilanmuutosten etenemistä kappaleessa. Etäisyys d_p, jolla lämpötilamuutoksen amplitudi on heikentynyt 37% voidaan laskea kaavalla (7). Kaavassa t_p on vaikutusajanjakson pituus.

$$d_p = \sqrt{\frac{a \cdot t_p}{\pi}} \quad . \quad (7)$$

Hameury (2006, s.22) esittää väitöskirjassaan kaavalla 7 laskettuja lämpötilanetenemisarvoja eri materiaaleille. Tuloksia on esitetty taulukossa 7. Arvoista nähdään, että esimerkiksi lämpötilavaihtelun taajuuden ollessa rakennuksille hyvin tyypillinen 24h, lämpötilavaihtelun amplitudin 37% heikkeneminen havaitaan puulla noin seitsemässä senttimetrissä, kun taas betonilla lämpövuo on edennyt noin kaksi kertaa pidemmälle, yli neljäntoista sentin päähän lämpörasitetusta pinnasta.

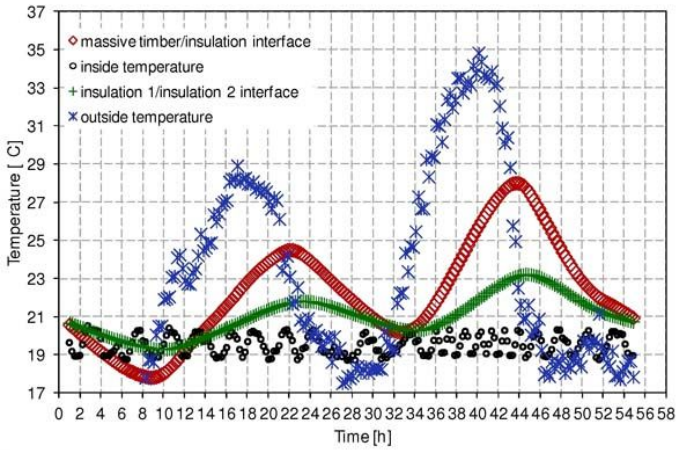
Taulukko 7. Lämpötilan vaikutusetäisyyden arvoja d_p, jossa lämpötilavaihtelun amplitudi on pienentynyt 37%. Taulukossa arvoja eri materiaaleilla ja eri lämpötilavaihtelutaajuuksilla. (Hameury 2006, s.22)

Vaikutusajanjakso t_p	**1 s**	**1 min**	**1 h**	**24 h**	**1kk**	**1 v**
Puu	*0,2 mm*	*1,9 mm*	*1,5 cm*	*7,2 cm*	*0,4m*	*1,4 m*
Tiili	*0,4 mm*	*3,0 mm*	*2,3 cm*	*11,4 cm*	*0,6 m*	*2,2 m*
Betoni	*0,5 mm*	*3,8 mm*	*2,9 cm*	*14,3 cm*	*0,8 m*	*2,7 m*
Kevytbetoni	*0,3 mm*	*2,2 mm*	*1,7 cm*	*8,3 cm*	*0,5 m*	*1,6 m*
Mineraalivilla (80kg/m^3)	*0,4 mm*	*3,3 mm*	*2,5 cm*	*12,4 cm*	*0,7 m*	*2,4 m*

Edellä mainitut erot tarkoittavat, että puulla on kaikista tyypillisistä rakennusaineista melko poikkeava lämpökäyttäytymistaipumus. Se on eräänlainen välimalli kaikista ääripään rakennusaineista, siinä yhdistyy kohtalainen eristyskyky, lämmönvarastointikyky ja lämmönluovutuskyky.

Käytännössä edellä kuvattuja ilmiöitä on tutkittu luonnollisen mittakaavan koeseinällä, joka on sijoitettu kahden olosuhdekammion väliin (Rafidiarison et al. 2012). Mittaamalla lämpötiloja seinän eri ainerajapinnoissa on voitu todentaa massiivipuun, sekä puupohjaisten eristeiden lämmönpuskurointikyky ja lämpöinertia. Kuvassa 40 on esitetty erään koe-

seinän mittaustulokset. Koeseinä oli hirsirunkoinen (70mm) ja sisäpuolelta eristetty (120+40mm puukuitueriste). Kuvasta nähdään selkeästi, että 70mm hirsirunko synnyttää noin 4 tunnin aikaviiveen ennen eristettä. Lämpöalenematekijä on puun osalta noin 0,4. Kokonaisuudessa sisälämpötilan muutos ei enää erotu edes mittauskohinasta, sillä rakenne vaimentaa ulkolämpötilanmuutoksen tehokkaasti. Asuinhuoneistossa vastaava rakenne parantaisi siis asumisviihtyvyyttä merkittävästi (Rafidiarison et al. 2012, s.10).



Kuva 40. Hirsirakenteisen seinän syklinen lämpötilarasituskoe, jossa on mitattu lämpötilan aikaviivettä ja lämpöalenemaa eri ainerajapinnoissa. Rakenne koostui ulkoa sisälle päin lueteltuna 70mm hirsirungosta, jonka jälkeen oli 120mm puukuitueriste, 40mm koolaus+puukuitueriste, höyrynsulku, ilmarako ja paneeliverhoilu.

Hameury ja Lundström (2004) suorittivat kattavan *in situ* mittauskampanjan neljässä puurakenteisessa kerrostalohuoneistossa, ja toteavat johtopäätöksissään, että rakennuksen asuintilan reagointi ulkolämpötilan vaihteluun puskuroituu, kun rakenne koostuu korkean termisen inertian omaavista puumateriaaleista. Käytännössä tämä tarkoittaa, että yön viileät tunnit eivät saa aikaan niin suurta vaikutusta sisäilmastoon kuin tapauksessa, jossa rakenteella on alhainen terminen massa. Lisäksi, yöllä seinät vapauttavat päivällä varastoimaansa lämpöenergiaa sisäilmastoon, jolloin myös lämmitysenergiaa säästyy. Myös VTT:n numeerinen tutkimus (Ojanen 2011, s.16-17) vahvistaa väitteet CLT-elementin kyvystä tasoittaa lyhytaikaisten lämpötilavaihteluiden vaikutuksia rakennusvaipan sisäpuolella:

> *”Puurankarakenteisiin verrattuna CLT-elementillä on huomattavasti paremmat edellytykset tasoittaa sisäilman lyhytaikaisten lämpötila- ja kosteuskuormien vaikutusta sisäilman olosuhteisiin ja siten parantaa termistä viihtyisyyttä. Edellytyksenä on, että elementin puupinta on kosketuksessa sisäilman kanssa, eikä sitä ole käsitelty vesihöyryn diffuusiota liikaa rajoittavalla pinnoitteella.”*.

Seuraavassa kappaleessa tarkastellaan lähemmin edellisessä sitaatissakin mainittua CLT-elementin ominaisuutta tasata kosteusvaihteluita.

5.2 Puun kosteuspuskurointikapasiteetti ja huoneilman kosteus

Puulla on kiistaton ja väistämätön alttius reagoida kosteuden kanssa. Useissa yhteyksissä ilmiö aiheuttaa ongelmia kun puuta hyödynnetään rakennetussa ympäristössä. Onnistuneesti suunnitellussa ja toteutetussa ratkaisussa haitat ovat usein kokonaan vältettävissä tai rajoitettavissa. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi haitallisten muodonmuutosten estämistä, sekä home- tai lahokasvuston esiintymisedellytysten poistamista. Elinkaari- ja käyttötarkoitusajattelun pohjalta tarkasteltuna on tärkeää huomata, että puun kosteusreaktioiden ymmärtäminen voi auttaa kääntämään ongelmalliseksi koetun ilmiön edulliseksi kokonaisuuden kannalta. Tämä voidaan perustella sillä, että valtaosa sisäilman laadun subjektiivisesta aistimuksesta riippuu pelkästään ilmankosteudesta. Monet tutkimukset ovat perehtyneet puun kykyyn vaimentaa ilmankosteuden vaihtelua ja täten lisätä sisäilman kosteusteknistä laatua. (Hameury 2006, s.27-28)

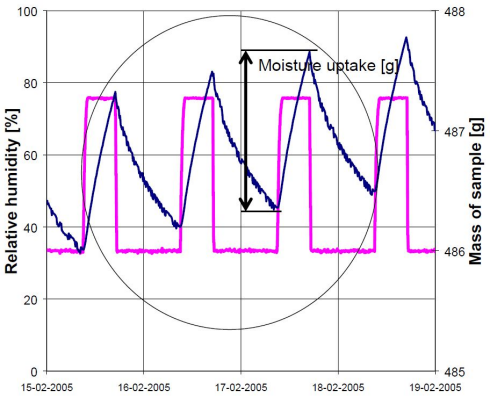
Hygroskooppisilla rakennusmateriaaleilla yleisesti on kyky tasoittaa huoneilmaston kosteusvaihteluita, jotka johtuvat erilaisista rakennuksen käyttö- ja rasitustilanteista. Vesihöyryä sitovat ja luovuttavat aineet rajoittavat maksimi- ja minimiarvojen välistä eroa ja täten edesauttavat sisäilman laatua. Myös terveysnäkökulmasta kosteuspuskuroinnilla on merkittävä rooli, sillä edellä kuvattu kosteusolojen ääriarvojen esiintymistaajuus harvenee, mikäli kosteuspuskuroivia rakennusmateriaaleja suositaan ja hyödynnetään asuinympäristössä. (Salonvaara et al. 2004, s.1; Hameury 2006, s.28)

Kansanomaisesti kuulee usein puhuttavan niin sanotuista hengittävistä materiaaleista ja rakenteista. Erkki Kokko (2002, s.9) määrittelee käsitettä tarkemmin ja täsmentää, että hengittävyydellä usein viitataan aineen ominaisuuteen, joka sallii sen vastaanottaa helposti ympäristössä olevaa vesihöyryä ja sitoa se itseensä hygroskooppisilla prosesseilla ja vuorostaan tarvittaessa kykenee vapauttamaan sen takaisin ympäristöön suhteellisen nopeasti. Ilmiötä kuvataan tieteellisemmin termillä kosteuspuskurointikapasiteetti. Usein käytännönyhteyksissä puhutaan tarkemmin suureesta tehollinen kosteuspuskurointikapasiteetti (*Practical Moisture Buffer Value*). Toisinaan puhutaan myös sorptiokapasiteetista tai pelkästä kosteuskapasiteetista, mutta yleensä näillä tarkoitetaan samaa asiaa.

Nordtest projekti (Rode et al. 2005) asetti tavoitteekseen määritellä tyhjentävästi kosteuspuskurointikapasiteetin ja esittää standardoidut mittaustavat ominaisuuden mittaamiseksi. Koska tämän työn kannalta kiinnostavinta on tarkastella tehollista kosteuspuskurointikapasiteettia, niin materiaalitason tarkat määritelmät ja laskentakaavat ohitetaan. Tehollinen kosteuspuskurointikapasiteetti ($MBV_{practical}$) määritettiin Nordtest (Rode et al. 2005) projektissa seuraavasti:

$$MBV = \frac{\Delta m}{S \cdot \Delta RH}. \quad , \qquad (8)$$

jossa m on kappaleeseen imeytyneen tai kappaleesta poistuneen kosteuden massa, S on altistettu pinta-ala ja ΔRH on suhteellisen kosteuden muutos yhden tarkastelusyklin aikana. Kaavan 8 tuloksena saadaan vertailuluku, jonka yksikkö on kg/(m^2 · %RH). Arvon yhteydessä tulee aina ilmoittaa määrityksessä käytetty tarkasteluajanjakso, sillä tulos tulkitaan siis vesimääränä, joka kulkee pinta-alayksikön yli kappaleen rajapinnassa tietyn tarkasteluajan aikana vaihtuvan suhteellisen kosteuden vaikutuksesta. Esimerkki mittausaineistosta, josta tehollinen kosteuspuskurointikapasiteetti on voitu määrittää, nähdään kuvassa 41.



Kuva 41. Esimerkki mittaustuloksista, joista on määritetty kappaleen tehollinen kosteuspuskurointikapasiteetti. (Rode et al. 2005, s.19)

Kun tarkastellaan kosteuspuskurointikapasiteetin käytännön merkitystä, on hyvä vertailla ominaisuuteen vaikuttavien muuttujien arvoja suhteessa muihin rakennusmateriaaleihin. Materiaalitasolla voidaan verrata aineiden kosteusominaisuuksia tarkastelemalla niiden permeabiliteettia, eli kosteuden läpäisyherkkyyttä tietyn paine-eron yli, tai aineen kosteusdiffusiviteettia, joka kuvaa kosteuden siirtymistä aineen läpi kosteuskonsentraatioerojen vaikutuksesta. Kosteuseffuusiokyky kuvaa nopeutta, jolla kosteustilan muutos etenee kappaleessa, eli toisinsanoen aineen kykyä luovuttaa ja vastaanottaa kosteutta. Se määritellään seuraavasti:

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \xi_v}{p_{sat}}}. \quad , \qquad (9)$$

jossa b_m on kosteuseffusiviteetti, δ_p on vesihöyryn läpäisevyys eli permeabiliteetti, ξ_v on volumetrinen kosteuskapasiteetti, joka määritellään sorptiokäyrän kulmakertoimena tietyllä kosteusalueella, sekä $p_{sat,}$ joka on kylläisen vesihöyryn paine. (Hameury 2006, s.30-31)

Kosteuden tunkeuma voidaan laskea jos oletetaan, että imeytymisominaisuudet pysyvät vakiona. Jos kappaleelle tehdään toistuvaa kosteusrasitusta tietyllä aikaperiodilla, siten, että kappaleeseen vaikuttavan huoneilman kosteus vaihtelee sinikäyrää muistuttavalla ta-

valla, niin syvyys, jolla kosteusvaihtelun amplitudin havaitaan heikenneen 37% voidaan laskea kaavalla 10 seuraavasti:

$$d_p = \sqrt{\frac{D_w \cdot t_p}{\pi}}. \quad , \tag{10}$$

jossa D_w on aineen kosteusdiffusiviteetti ja t_p on rasitusperiodi. Vastaavasti syvyys, jossa kosteusvaihtelun suuruus on ainoastaan 1% voidaan määritellä kaavalla 11:

$$d_{p,1\%} = 4.61 \cdot \sqrt{\frac{D_w \cdot t_p}{\pi}}. \tag{11}$$

(Hameury 2006, s.31)

Vedensidontakyky kuvastaa aineen kosteusinertiaa havainnollisesti, ja kuvaa vesimäärää, jonka 1m^2 ainetta pystyy sitomaan päivässä. Ominaisuus määritellään kaavalla 12 seuraavasti:

$$a_w = d_p \cdot \xi \ . \tag{12}$$

(Hameury 2006, s.31-32)

NORDTEST projektissa määritettiin teoreettinen materiaaliominaisuus, jota kutsutaan ideaaliseksi kosteuspuskurointiarvoksi ja se määritellään seuraavasti:

$$MBV_{ideal} \approx 0{,}00568 \cdot b_m \cdot p_s \cdot \sqrt{t_p} \ , \tag{13}$$

jossa p_s on kylläisen vesihöyryn paine kappaleen pinnassa. MBV_{ideal} kertoo yhden neliömetrin suuruisen alueen sitoman vesimäärän tarkasteluajanjakson aikana, kun kosteus vaihtelee ajanjaksona siten, että 1/3 ajasta suhteellinen kosteus on korkealla tasolla ja 2/3 ajasta kosteus on matalalla tasolla. (Hameury 2006, s.32)

Edellä kuvattuja ominaisuuksia voidaan verrata eri materiaalien kesken. Taulukot 8 ja 9 esittävät vertailun muutaman yleisimmän rakennusmateriaalin kesken. Taulukoista voidaan nähdä jälleen, että puulla on erityinen asema kosteusominaisuuksien suhteen, kuten aikaisemmassa kappaleessa oli myös lämpöominaisuuksien tapauksessa. Puulla on keskitason permeabiliteetti, mutta alhainen tiheys. Se sallii kosteuden läpäisyn diffuusiolla melko huonosti. Kosteutta puu vastaanottaa ja luovuttaa parhaiten suhteessa kaikkiin vertailussa oleviin materiaaleihin. Puu kykenee myös sitomaan itseensä eniten kosteutta päivän aikana ja sen ideaalinen kosteuspuskurointiarvo on vertailun suurin. Merkittävää on myös huomioida, että ainoastaan betonilla kosteuden tunkeumasyvyydet ovat alhaisempia kuin puulla ja siitä huolimatta puun kosteuspuskurointiominaisuudet ovat loistavat.

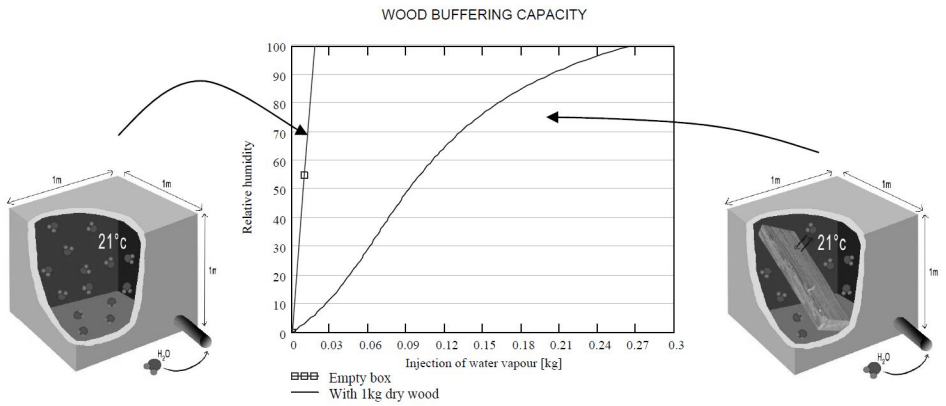
Taulukko 8. Eri rakennusmateriaalien kosteusteknisiä arvoja. (Hameury 2006, s.32)

Materiaali	Perme-abiliteetti	Kosteus-kapasiteetti	Tiheys	Kosteus-diffusiviteetti	Kosteus-effusiviteetti
	$(kg*m^{-1}*Pa^{-1}*s^{-1})*10^{-10}$	$(kg*kg^{-1})$	$(kg*m^{-3})$	$(kg*m^{-3})*10^{-10}$	$(kg*m^{-1}*s^{-1}*Pa^{-1})*10^{-7}$
Puu	*0.15*	*0.19*	*450*	*4*	*7.40*
Betoni	*0.05*	*0.095*	*2300*	*0.55*	*6.84*
Tiili	*0.3*	*0.002*	*1500*	*180*	*1.96*
Kipsilevy	*0.25*	*0.031*	*800*	*19*	*5.15*
Mineraali-villa	*1.9*	*0.057*	*80*	*400*	*6*

Taulukko 9. Eri rakennusmateriaalien kosteusteknisiä laskennallisia ominaisuuksia. (Hameury 2006, s.32)

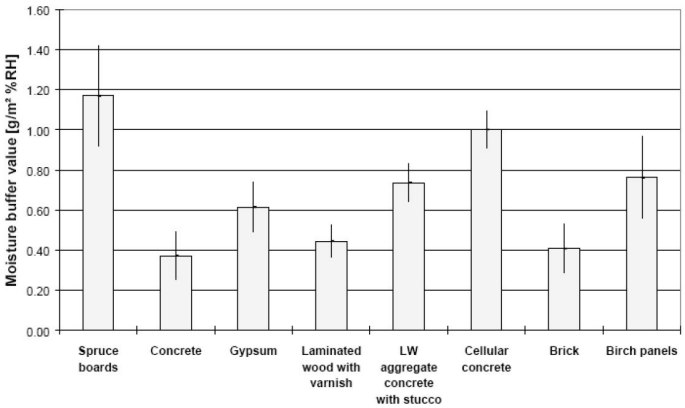
Materiaali	Vedensidon-takyky $(g*m^{-2}/d)$	MBV_{ideal} $(g*m^{-2}*\%RH^{-1})$	Tunkeumasyvyys 24h (mm)		Tunkeumasyvyys 1 vuosi (cm)	
			d_p	$d_{p,1\%}$	d_p	$d_{p,1\%}$
Puu	*256*	*2.9*	*3*	*15*	*6.3*	*29*
Betoni	*218*	*2.7*	*1*	*6*	*2.4*	*11*
Tiili	*66*	*0.8*	*22*	*102*	*42.6*	*196.4*
Kipsilevy	*174*	*2*	*7*	*33*	*13.8*	*63.6*
Mineraali-villa	*150*	*2.3*	*33*	*153*	*63.5*	*292.7*

Kosteuspuskurointikapasiteetin käytännön vaikutusta voidaan havainnollistaa yksinkertaistelulla kokeella (Kuva 42), jossa kuutiometrin kokoiseen ideaalitestiympäristöön johdetaan vesihöyryä. Testiympäristön ilman suhteellista kosteutta mitattaessa havaitaan, että mikäli testiympäristö on tyhjä ja inertti ja lämpötila säilytetään vakiona, sen sisältämän ilman suhteellinen kosteus nousee lineaarisesti ja jyrkästi suhteessa ruiskutettuun vesihöyryyn. Sama koe toistetaan siten, että koeympäristöön on sijoitettu yhden kilogramman painoinen kappale puuta. Nyt havaitaan, että sama vesimäärän joka riitti kyllästämään tyhjän koeympäristön, ei tällä kertaa ole nostanut ilmankosteutta viittä prosenttiakaan. Puu siis kykenee sitomaan itseensä kosteutta tehokkaasti.



Kuva 42. Vertailu, jossa todetaan puun kosteuspuskurointikapasiteetin käytännön merkitys. Teoreettisessa kokeessa kuution kokoiseen ideaaliseen testiympäristöön ruiskutetaan kosteutta ja vertaillaan testiympäristön ilmankosteutta tapauksessa, jossa ympäristössä on puukappale ja tapauksessa jossa testiympäristö on tyhjä. (Hameury 2006, s.34)

Edellä kuvattu testi voidaan toistaa useilla eri rakennusmateriaaleilla, ja NORDTEST projektissa (Rode et al. 2005) selvitettiin usean eri rakennusaineen vertailtava kosteuspuskurointikapasiteetti. Tulokset nähdään kuvassa 43. Voidaan havaita, että kuusilaudan kosteuspuskurointikapasiteetti on ylivoimainen suhteessa muihin rakennusmateriaaleihin. Puun etuna on se, että se voidaan useassa tapauksessa jättää näkyviin ilman pintakäsittelyä, jolloin kosteuspuskurointikapasiteettia voidaan hyödyntää tehokkaasti. Esimerkiksi kipsilevyn tapauksessa pinnoitteet ja tapetit estävät kosteuspuskurointiominaisuudet lähes kokonaan ja toisaalta esimerkiksi paljaat betonipinnat ovat äärimmäisen harvinaisia.

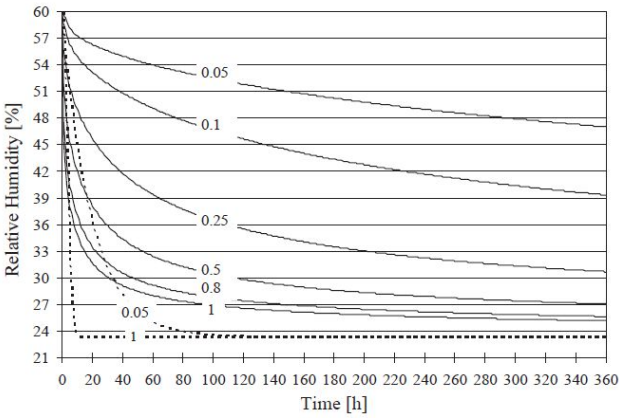


Kuva 43. Eri aineiden keskimääräisen kosteuspuskurointikapasiteeetin vertailu. (Hameury 2006, s.35)

Puun kosteuspuskurointikapasiteetti joutuu kilpailemaan ilmanvaihdon kanssa. Yleisesti ottaen, ilmankosteuden kannalta ilmanvaihto on useimmissa olosuhteissa haitallista, mutta huoneilman epäpuhtauksien poistamiseksi se on välttämätöntä. Hameury ja Lundström (2004) toteavat, että suuretkaan paljaat puupinnat eivät pysty kumoamaan korkean ilmanvaihtoluvun kuivattavaa vaikutusta. Lisäksi puun alhainen diffuusiokyky tarkoittaa sitä,

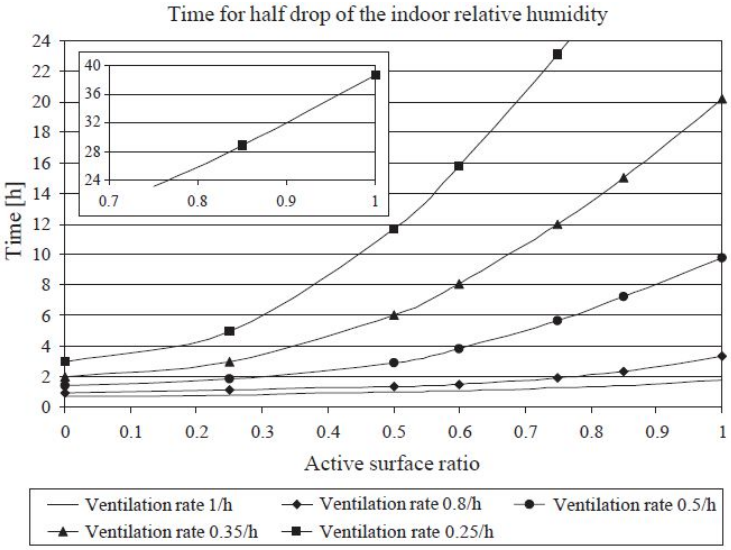
että päivittäiset kosteusvaihtelut eivät synnytä kovin suurta varastointikapasiteettia, kun kosteus tunkeutuu vain muutaman millin syvyyteen puussa. Tällöin pitkään jatkuva tehokas ilmanvaihto poistaa kaiken kerätyn kosteuden puusta. Samalla he kuitenkin toteavat, että lyhyen aikavälin vaihteluissa puulla on kuitenkin merkittävä vaikutus, esimerkiksi voimakkaasti vaihtelevassa ilmastossa, jossa ilmankosteus saattaa vaihdella rajusti päivätasolla, tai jos huonetilassa tapahtuu merkittäviä kosteusrasituksia käytön ansiosta. Lisäksi tutkimukset osoittavat, että suosimalla puuta sisätiloissa, voitaisiin kenties pienentää ilmanvaihtoa asuintiloissa ehdottomaan minimiarvoon, jolla olisi myös vaikutusta energiansäästöön.

Hameury (2005) toteutti numeerisen tutkimuksen ilmankosteuden, kosteuspuskuroivan puun ja ilmanvaihtoluvun yhteydestä. Kuvassa 44 nähdään kuinka ilmanvaihtoluku vaikuttaa ilmankosteuden vähenemiseen. Kokeessa on määritetty 5x3m kokoinen puinen koehuone, jonka ilmankosteus on alkutilassa asetettu 60% RH, lämpötilan ollessa 25°C. Simulaation käynnistyessä huoneen ilmanvaihto käynnistetään ja huoneeseen johdetaan ulkoa otettua lämmitettyä korvausilmaa, jonka lämpötila on 20°C ja kosteus 25% RH. Kuvassa olevat katkoviivat edustavat tilannetta, jossa seinät ovat diffuusiotiiviit. On selkeästi havaittavissa, että ilmanvaihtoluvun kasvaessa puun kosteuspuskurointikyvyn merkitys vähenee voimakkaasti. Ilmanvaihtoluku 1 1/h vastaa poikkeuksellisen tehokasta ilmanvaihtoa esimerkiksi julkisessa tilassa tai kylpyhuoneessa, jossa on hetkellisesti tehostettu ilmanvaihtoa. Normaalisti asuintiloissa ilmanvaihtoluku on noin 0,5 1/h, eli tilan ilma vaihtuu täysin kahdessa tunnissa. Kuvaajasta voi todeta, että mikäli ilmanvaihtoa voitaisiin alhaisen käytön aikana laskea alle 0.25 1/h arvoon asti, niin sillä olisi merkittävä vaikutus puun kosteuspuskurointivaikutukseen ja tällöin huoneiston ilmankosteus säilyisi tasaisempana.



Kuva 44. Laskennallinen selvitys ilmanvaihtoluvun vaikutuksesta huoneilman kosteuteen. Simuloinnissa on tarkkailtu puupintaista huonetta, johon johdetaan kuivaa korvausilmaa eri ilmanvaihtolukua vastaavilla tasoilla. Katkoviivat edustavat tuloksia huoneesta, jossa kaikki pinnat ovat suljettuja. (Hameury 2005, s.8)

Hameury (2005) toteutti samassa tutkimuksessa tarkastelun, jossa seurataan kuinka vaikutuspinta-alan muuttaminen muuttaa tuloksia. Kuvasta 45 havaitaan, että yhteys ei ole lineaarinen. Mittauksessa seurattiin aikaa, joka kuluu että alkutilan ilmankosteus on pudonnut puoleen. Muuttujina oli ilmanvaihtoluku ja paljaan puupinta-alan määrä. Jos ajatellaan asumisen syklien esiintyvän noin 8 tunnin periodeina, nähdään kuvaajasta, että ilmanvaihtoluvulla 0.8 1/h paljasta puupintaa täytyisi huoneesta olla yli 90%. Tällöin suhteellinen kosteus huoneilmassa ei pääsisi laskemaan rajusti silloin kun huoneilmaan ei tule asukkaiden läsnäolon tuottamaa kosteuslisää. Vastaavasti, ilmanvaihtoluvulla 0.35 1/h vastaava tilanne saavutettaisiin jo yli 60% puupinta-alaosuudella ja 0.25 1/h ilmanvaihdolla jo vajaalla 40% osuudella huoneen pinnoista. Paljaaksi jätetyllä CLT:llä kyseiset pinta-alaosuudet eivät olisi ongelmallisia toteuttaa, varsinkin kun verrataan muihin rakennustapoihin.

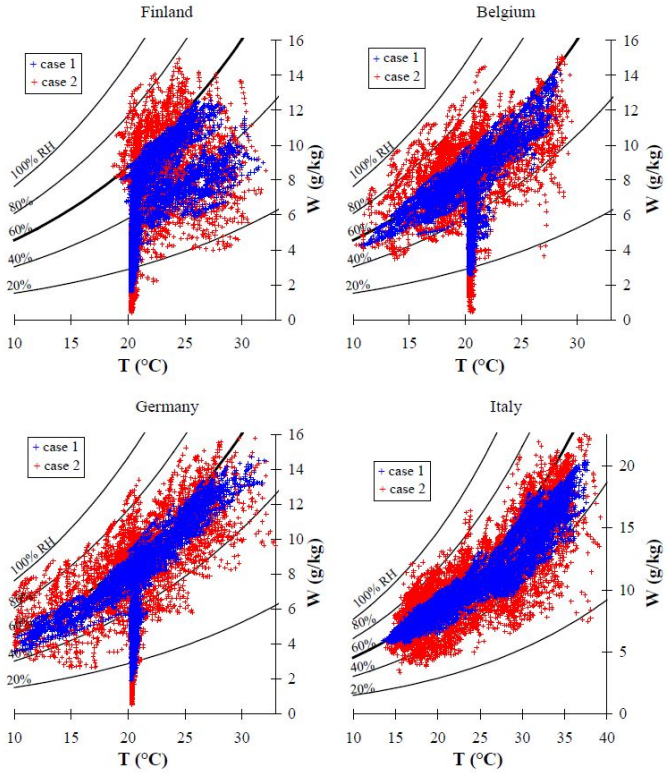


Kuva 45. Aktiivisen puupinta-alan ja ilmanvaihtoluvun vaikutus ilmankosteuden puolittumisaikaan. (Hameury 2005, s.8)

Padfield (1998) toteaa väitöstutkimuksessaan tiivistäen, että puulla on yksi merkittävimmistä, ellei merkittävin kyky puskuroida kosteutta suhteessa muihin yleisiin rakennusmateriaaleihin. Vaikka kosteus ei kykene tunkeutumaan kovinkaan syvälle puuhun, jättäen varsinaisen sidotun vesimäärän rakennetun ympäristön tapauksessa melko pieneksi, voidaan vaikutus silti havaita kokeellisissa tutkimuksissa. Tärkeintä olisi perehtyä huoneilman laatuun ja talotekniikkaan ja huolehtia ettei tarpeettoman suurta ilmanvaihtoa esiinny, mikäli puun kosteustekniset ominaisuudet halutaan hyödyntää terveellisemmän huoneilman aikaansaamiseksi. Puun jättäminen käsittelemättä ei sovi välttämättä kaikkiin kohteisiin, mutta tutkimusta on kohdistettava läpäisevien ja kuultavien pintakäsittelyaineiden toimintaan, sillä puulla itsessään on kuitenkin etua sen esteettisestä ulkonäöstään verrattuna moniin muihin käsittelemättömiin rakennusmateriaaleihin.

5.3 Arvio CLT-rakenteen vaikutusmahdollisuuksista sisäilman laatuun

Suuremmassa mittakaavassa tarkasteltuna, CLT:n potentiaali sisäilmanlaatua parantavana rakennekomponenttina on todettavissa Simonsonin et al. (2001) tutkimuksesta. Kyseessä on numeerinen tutkimus paljaan puupinnan vaikutuksista sisäilman kosteuteen, ja tulokset nähdään kuvassa 46. Tutkimus toistettiin neljässä eri sijainnissa ja erilaisissa simuloiduissa ilmastoissa perustuen historialliseen säädataan. Suomen tapauksessa sijainniksi valittiin Helsinki. Numeerisessa tarkastelussa simuloitiin kahden aikuisen käyttämää makuuhuonetta, jossa nukuttiin 9h vuorokaudessa ja ilmanvaihtoluku oli 0.5 1/h. Tärkeimmät havainnot kiteytyvät kuvaajassa siihen, että hygroskooppisessa tapauksessa (kuvassa sininen case1) simuloidut mittaushavainnot asettuvat kapeammalle sektorille kosteusakseleiden väliin ja haitallinen >60% RH rajatilanne ylittyy merkittävästi harvemmin. Vastaavasti haitallisen kuiva ilmankosteus (<20% RH) esiintyy jossain määrin harvemmin, jos puun annetaan reagoida sisäilman kanssa.



Kuva 46. Hygroskooppisen pinta-alan vaikutus asuintilan sisäilman kosteuteen. Case1 kuvaa tilannetta, jossa seinäpintoja ei ole peitetty diffuusiotiiviillä maalilla, ja case2 kuvaa tilannetta jossa pinnat on suljettu tiiviillä maalilla. (Simonson et al. 2001, s.69)

Jos tarkastellaan urituksen vaikutusta kokonaisuuteen, voidaan pohtia tarjoaisiko uritus ensinnäkin enemmän vaikutuspinta-alaa kosteuden vaihtumiselle, sekä tarjoaisiko uritus kosteudelle reitin edetä nopeammin syvemmälle puuhun, jolloin kosteuspuskurointikapa-

siteetti kasvaisi. Hameury (2007) todisti mittauksissaan, että suurin osa kosteusdynaamisista ilmiöistä rajoittuu noin kolmen millimetrin syvyyteen puu-huoneilmarajapinnassa. Uritus tuottaa reitin syvemmälle puuhun, jolloin urituksen ns. otsapinta-ala tuottaa moninkertaisen määrän uutta pinta-alaa, johon kosteus pääsee käsiksi. Lisäksi jos CLT-levyn pinta on maalattu ennen uritusta, toimivat uran seinät ja pohja tehokkaimpana reittinä kosteuden vaihtumiselle.

5.4 CLT:n hygrotermisten ominaisuuksien hyödyntäminen ja älykkäällä talotekniikalla saavutettavat energiansäästöt

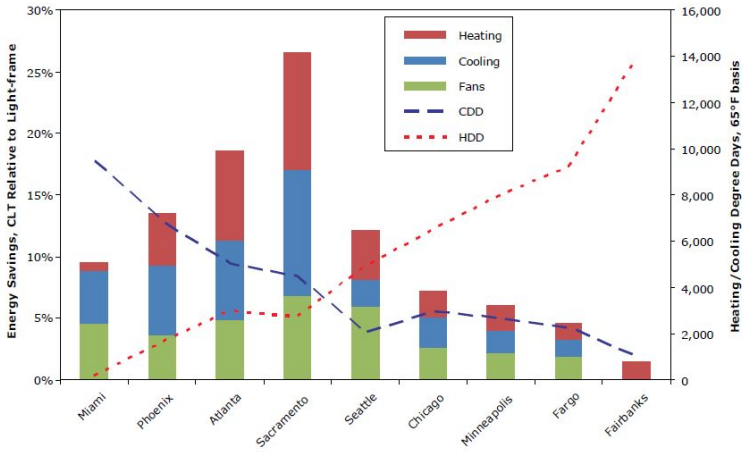
CLT:n hyödyntäminen rakenteen sisäilman ja lämmityksen passiivisena muokkaajana edellyttää, että eriste sijoitetaan rakenteen ulkopuolelle. Toisin kuin hirsirakentamisessa, CLT:n tapauksessa harvoin harkitaan seinien sisäpuolista eristämistä. CLT itsessään tuo ulkoseinärakenteeseen huomattavan lisäeristyksen, mutta ennen kaikkea sisäilman kanssa yhteydessä oleva massiivinen CLT-komponentti mahdollistaa termisen massan hyödyntämisen sisäilman lämpötilan säätelyssä sekä kosteuspuskurointiominaisuuksien hyväksikäytön.

Glass et al. (2013, s.19) mukaan rakennuksen ulkovaippaan, sekä väliseiniin että lattiaan ja kattoon sijoitetut puumassat kykenevät toimivaan merkittävänä lämmönvaraajina. Lämmön varaaminen on seurausta puun termisestä inertiasta, jolloin lämpöenergiaa varastoituu CLT-komponentteihin. Tämä lämpö voidaan hyödyntää rakennuksen kokonaisenergiantarpeen pienentämisessä siten, että esimerkiksi sähköllä lämpiävässä rakennuksessa lämmitysajankohdat valitaan alhaisimman sähkönhinnan mukaan. Lisäksi termisen massan ja lämpöviiveen tarjoama puskurivaikutus vähentää huippukuormien suuruutta ja esiintymistaajuutta niin lämmityksen kuin jäähdytyksenkin osalta. Energiansäästön lisäksi CLT:n lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet kykenevät lisäämään asumisviihtyvyyttä.

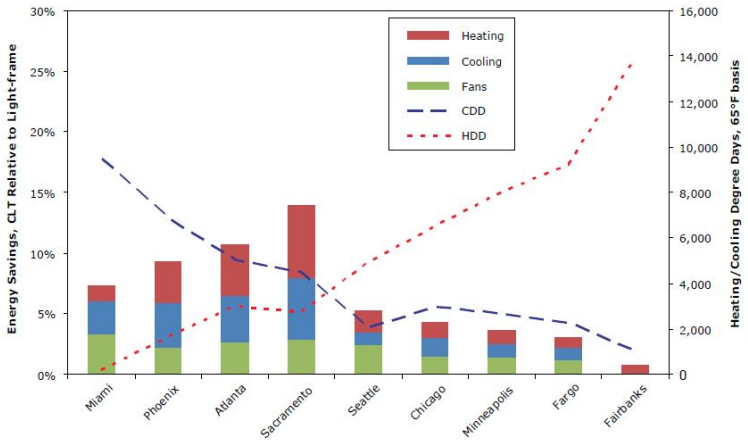
Termisen massan hyödyntämisen tehokkuus riippuu monista muuttujista, joista osa on hallittavissa esimerkiksi suunnittelun ja teknologian avulla ja osa on ympäristön asettamia rasitteita, joihin ei voida vaikuttaa. Tehokkuuteen vaikuttaa luonnollisesti myös CLT:n materiaalitekniset ja fysikaaliset ominaisuudet, jotka muuttuvat suhteessa materiaalin valmistustapaan ja viimeistelyyn. Suunnittelulla voidaan tehostaa termisen massan hyödyntämistä esimerkiksi vaikuttamalla rakennuksen ja rakenteiden geometriaan. Materiaaliominaisuuksista ja -valinnoista merkittävimpiä ovat paljaan puupinnan määrä ja sijainti asuintilassa, sekä materiaalin tiheys ja lämpöominaisuudet. (Glass et al. 2013, s.19)

Glass et al. (2013, s.19-20) tutkivat numeriisella menetelmällä CLT:n termisen massan hyödyntämistä energiansäästössä Pohjois-Amerikkalaisissa oloissa. Vertailua suoritettiin vastaavilla ominaisuuksilla valmistettuun rankarakenteiseen taloon. Vertailutapauksina

olivat kaksikerroksinen omakotitalo (asuinpinta-ala 172m^2) ja nelikerroksinen kerrostalo (40 asuntoa, yht. 2880m^2). Laskentamallissa vakioitiin kaikki rakennusvaipan ja rakennuksen ominaisuudet (kuten tiiveys, ilmanvaihto, käyttöaste, lämmitystapa ym.) kummassakin rakennetyypissä siten, että tuloksena saatiin ainoastaan termisen massan tuottama ero. Tulokset nähdään kuvissa 47 ja 48. Tulokset eivät ole suoraan verrannollisia Suomen oloihin, sillä Suomessa tyypillisesti jäähdytystarvelukuja ei edes ilmoiteta niiden vähäisyyden takia, joten vertailtavuus on jäähdytysenergiansäästön suhteen huono. Lämmitystarveluku on Helsingissä yleisesti ottaen noin 4500 (Gynther et al. 2005, s.31), joka antaa suuntaa arviolle lämmitys- ja ilmanvaihtokulujen säästöstä suhteessa esitettyyn laskelmaan. Lämmitystarveluvun perusteella Suomen olot vertaantuvat melko hyvin taulukossa nähtävään Seattlen arvoon. Jos taulukossa esiintyvä jäähdytysenergiansäästö jätetään huomiotta, on tuloksena silti noin 10% energiansäästö. Kerrostalon tapauksessa (Kuva 48) laskentamalli ennustaa pienempiä säästöjä, ja Glass et al. (2013, s.20) arvioi syyksi rakennusvaipan ja asuinpinta-alan pienempää suhdetta ja asumisen synnyttämän lämpökuorman suurempaa määrää. Lisäksi ilmanvaihdon suhteellinen osuus kokonaisenergiantarpeesta on suurempi.



Kuva 47. Lämmitys-/jäähdytysenergian säästö kaksikerroksisen CLT omakotitalon tapauksessa suhteessa rankarakenteiseen taloon. Laskennallinen arvio Pohjois-Amerikkalaisissa olosuhteissa. Katkoviivat kuvaavat lämmitys- (HDD) ja jäähdytystarvelukujen (CDD) suuruutta kohteessa.



Kuva 48. Lämmitys-/jäähdytysenergiansäästö nelikerroksisen CLT kerrostalon tapauksessa suhteessa rankarakenteiseen taloon. Laskennallinen arvio Pohjois-Amerikan olosuhteissa. Katkoviivat kuvaavat lämmitys- (HDD) ja jäähdytystarvelukujen (CDD) suuruutta kohteessa.

Hameury ja Lundström (2004, s.8-9) toteavat että massiivipuun käyttö rakennuksen vaipassa lisää rakenteen termistä inertiaa ja kykenee pienentämään rakennuksen ominaisenergiantarvetta. Ominaisenergiantarve tarkoittaa rakennuksen lämmittämiseen tarvitun energian määrää suhteessa rakennuksen nettopinta-alaan. Edellä mainittuun teokseen liittyi kattava mittauskampanja puurakenteisessa kerrostalossa Tukholmassa (Vetenskapstaden), jossa seinät olivat tarkoitukseen valmistettuja massiivipuuelementtejä (ei CLT), ominaisenergiantarve oli verrattain alhainen 59kWh/m^2. Suomessa vastaava lämmön ominaiskulutus vakituisissa asuinrakennuksissa on Motivan (2014, s.23-24) tietojen mukaan noin 220kWh/m^2 vanhasta rakennuskannasta johtuen. Uudemmissa rakennuksissa (2003 eteenpäin) lämmitysenergiantarve on noin 80-120kWh/m^2 ja erittäin tehokkaissa taloissa 40-60 kWh/m^2 (Tuomaala 2008, s.8).

Osanyintola ja Simonson (2006) perehtyivät kosteuspuskurointikapasiteetin, ilmastoinnin ja energiankulutuksen väliseen yhteyteen. Heidän tutkimusten perusteella lämmitysenergian tarvetta voidaan pienentää noin viidellä prosentilla, ja jäähdytysenergian tarvetta jopa 30 prosentilla, jos rakennuksessa hyödynnetään hygroskooppisia materiaaleja riittävällä tasolla. Säästöt kuitenkin edellyttävät ilmanvaihdon hallintastrategian muodostamista ja hyödyntämistä. Sellainen strategia voisi perustua esimerkiksi lämpötila- ja ilmanvaihtoohjaukseen, joka reagoi asunnon käyttöasteeseen. Tällöin ohjaus voisi, joko ajastinperusteisesti, tai muilla keinoilla, pienentää rakennuksen energiankulutusta, silloin kun rakennuksessa ei oleilla. Myös oleskelun aikaista ilmanvaihtoa voisi hygroskooppisten rakennusmateriaalien hyödyntämisen yhteydessä laskea noin 15%, vaikuttamatta aistittuun ilmanlaatuun (PAQ). Tutkimus oli numeerinen, eikä siinä mainita otettiinko laskelmissa huomioon rakenteen lämpöinertiaa.

Edellä kuvattua ilmastoinnin ohjausstrategiaa on tutkittu simuloimalla säädatan perusteella kosteusolosuhteita testihuoneissa (Woloszyn et al. 2009). Testihuoneiden käyttöä simuloitiin periodisen kaavan mukaan, syöttämällä huoneilmaan kosteutta ja hiilidioksidia. Tutkimuksessa vertailtiin tuloksia erityyppisillä rakenteilla, joiden verrokkina toimi alumiinifoliolla vuorattu huone, jossa ilmastoinnin ohjaus perustui perinteiseen vakioilmastointistrategiaan. Vertailuna oli kipsilevyllä verhottu huone ja puukuitulevyllä verhottu huone. Näissä huoneissa testattiin suhteelliseen kosteuteen reagoivaa ilmanvaihtoa (*Relative Humidity Sensitive, RHS*) ja hiilidioksidipitoisuuteen reagoivaan järjestelmään (*CO_2 controlled*). Oleellisimmat tulokset nähdään taulukossa 10.

Tuloksista nähdään, että kumpikin ilmanvaihdon ohjausstrategia kykenee vähentämään energiankulutusta. Kummallakin ohjaustavalla hygroskooppinen puukuitulevy auttoi säilyttämään tasaisemman ilmankosteuden testiympäristössä suhteessa kipsilevyyn. Lisäksi voidaan sanoa, että kumpikaan ohjausstrategia ei tuota yksinään tyydyttävää ilmanlaatua, vaan todellisuudessa tarvittaisiin niiden yhdistelmä, jolloin estettäisiin erityisesti haitallisen korkean hiilidioksidipitoisuuden esiintymistä. Testien perusteella kokonaisenergiansäästö on noin 14-17%, jos ilmastointia ohjataan dynaamisesti. On kuitenkin huomattava, että hetkellinen maksimikulutus saattoi nousta 8% suhteessa tasaiseen ilmanvaihtoon, johtuen nopeasti muuttuvista olosuhteista. Kokonaisenergiansäästö on tässä tapauksessa hiukan epärealistinen, sillä älykäs ohjaus ei tässä tapauksessa optimoinut ilmanlaatua, mikä olisi välttämätöntä todellisessa kohteessa.

Taulukko 10. Prosentuaalinen osuus ajasta, jonka tarkkailtavat sisäilmaparametrit olivat pois tavoiterajoista (RH 40-50%, CO_2>1200ppm). Lisäksi taulukossa on mainittu testikonfiguraation energiankulutus. Vaiheet (Step1, Step2 ja Step3) ovat osioita simuloinnissa käytetystä säädatasta, joista Step3 oli kaikkein lämpimin, ja Step2 oli ns. siirtymävaihe.

Ventilation flow Indoor surfaces	Run A Constant Aluminium foil	Run B RH controlled Gypsum board	Run C CO_2 controlled Gypsum board	Run D RH controlled Wood fibreboard	Run E CO_2 controlled Wood fibreboard
Step 1 (17.01–2.02)					
CO_2 >1200 ppm	0	33	0	33	0
RH out of [40–50%]	84	79	80	79	80
Average power demand (W)	674	571	589	571	589
Step 2 (14.02–19.03)					
CO_2 >1200 ppm	0	35	0	45	0
RH out of [40–50%]	83	65	67	57	72
Average power demand (W)	650	562	570	550	558
Step 3 (28.03–21.04)					
CO_2 >1200 ppm	0	1	0	0	0
RH out of [40–50%]	62	49	79	35	69
Average power demand (W)	392	388	351	390	348

6 MATERIAALIT JA TUTKIMUSMENETELMÄT

Diplomityön kokeellisessa osuudessa perehdytään CLT:n halkeilutaipumukseen koekappaleiden avulla. Koska kirjallisuudesta ei löytynyt valmiita metodeja tarkoitusta palvelevien kokeiden toteuttamiseksi, kokeellisessa osuudessa suoritettiin ensin sekalaisia esikokeita, joiden avulla pyrittiin määrittelemään soveltuvat metodit koekäytännöille, parametreille ja tulosten tulkinnalle. Esikokeiden perusteella arvioitiin parhaat keinot varsinaisen koesarjan toteuttamiseksi, ja saatiin lisätietoa koetuloksiin vaikuttavista muuttujista. Esikokeiden luonteen ollessa ns. metatutkimusta, niiden tuloksia ja metodeja ei esitellä vastaavalla laajuudella kuin varsinaisen koesarjan tapauksessa.

Tässä kappaleessa käydään läpi tiedot mittaustavoista, koejärjestelyistä ja määritelmistä. Lisäksi täsmennetään tulosten käsittelyä ja mitattavia suureita.

6.1 Halkeaman määrittely ja halkeamamittausten suoritus

Standardissa SFS-EN 844-9 (9.11) halkeama määritellään kuitujen pituussuuntaisena irtoamisena toisistaan. Mittauksissa halkeaman alku- ja päätepiste määriteltiin paljaalla silmällä mahdollisimman tarkasti ja kaikki halkeamat, mukaan lukien urien pohjalla olevat, mitattiin. Halkeamaksi katsottiin kaikki vähintään 0,05mm leveät poikkeamat. Syysuuntaa vastaan esiintyvät halkeamat, esimerkiksi oksien kohdalla, jätettiin huomiotta. Loivasti vinoista halkeamista mitattiin todellinen pituus ja jyrkästi vinoista halkeamista mitattiin halkeaman pituuden koekappaleen sivun suuntainen projektio pintalamellin syysuunnassa. Halkeaman pituusmittaus suoritettiin muovisella laadukkaalla viivaimella, jonka tarkkuus oli ±0,5mm ja halkeaman leveys mitattiin rakotulkilla (0,05mm … 1,00mm). Yli millimetrin levyiset halkeamat kirjattiin tuloksiin yhden millimetrin levyisinä, sillä muuten niiden painoarvo kasvaisi liian suureksi tulosten vertailun kannalta.

Standardissa SFS-EN 1310:1997 (4.9.3) määritellään sahatavaran kuivaushalkeaman mittaustavaksi yhteenlaskettu halkeillut pinta-ala tarkastellulla sivulla. Mittaus suoritetaan standardissa siten, että halkeaman ympärille muodostetaan suorakulmio, joka sulkee sisäänsä alueen, jolla halkeama esiintyy. Täten halkeama-ala A(mm^2) määritellään kaavalla 14 seuraavasti:

$$A = x_1 * y_1 + \ldots x_n * y_n \quad , \tag{14}$$

jossa x_n ja y_n ovat halkeaman sisäänsä sulkevan suorakulmion leveys ja pituus.

CLT:n kuivumishalkeilu eroaa yksittäisen sahatavarakappaleen halkeilukäyttäytymisestä. Näin ollen on perusteltua muokata mittaustapaa siten, että halkeilupinta-ala vastaa tulosten laskennassa määritettyä halkeilulukua, joka on käytännössä summa kunkin halkeaman pituudesta kerrottuna halkeaman leveimmän kohdan leveydellä. Halkeaman leveyden mit-

taus toteutettiin teoksen ‘Pohjoismainen puualan laatukieli – havupuu’ (Casselbrant et al. 2000, s.86) perusteella, jossa yksittäisen halkeaman leveys suositellaan mittaamaan vähintään 1/10mm tarkkuudella halkeaman leveimmästä kohdasta. Tarkimmillaan mittaukset suoritettiin 1/20 mm tarkkuudella, jos soveltuva liuska löytyi rakotulkista.

6.2 Esikokeet

Esikoevaihe toteutettiin diplomityöhankkeen alussa. Tarkoituksena oli hankkia lisätietoa halkeiluilmiöstä ja tarkentaa koejärjestelyä ennen kuin varsinainen koemateriaali saadaan toimitetuksi. Esikokeet toteutettiin hukkamateriaaleilla, joita löytyi koululta ja yhteistyökumppaneiden hallusta. Tästä syystä esikokeiden tulosten tieteellinen arvo on heikko, mutta ilmiön ymmärtämisen ja koejärjestelyjen kehittämisen kannalta kokeet olivat hyödyllisiä.

Esikokeissa selvitettiin urien työstöparametreja, kuten uran leveyttä, sijaintia ja taajuutta, suuntaa ja syvyyttä, sekä urituksen visuaalista ilmettä. Lisäksi testattiin peittävän pintakäsittelyn vaikutusta uritetun pinnan ilmeeseen. Lisäksi selvitettiin koemateriaalin tasapainokosteutta ja kosteuskäyttäymistä yleisesti. Alustavissa testeissä pyrittiin selvittämään sopivat kuivauslämpötilat ja –ajat, sekä sopivan mittaiset tasaannutusajat. Lisäksi kehitettiin menetelmä varsinaisen koesarjan halkeamamittauksiin.

6.3 Varsinaisen koesarjan käsittelyt

Varsinaisessa koesarjassa tutkittiin 300mm x 300mm x 100mm CLT-koekappaleiden halkeilutaipumusta kolmen tasaannutus-kuivaussyklin aikana. Muuttujina olivat pintalamellityyppi, uritus, pintakäsittely ja alkukosteus.

Varsinaisessa koesarjassa toteutettiin esikokeiden havaintojen perusteella muokattu tasaannutus-kuivaussykli. Syklin kunkin vaiheen jälkeen suoritettiin halkeamamittaukset kappaleen 6.1 kuvailemalla tavalla. Lisäksi koekappaleiden massa punnittiin, jonka perusteella voitiin laskea arvio koekappaleen keskimääräisestä kosteudesta. Koetapa ei huomioi kappaleen sisäistä kosteusjakaumaa, sillä kokeiden toteutusaikataulu ei mahdollistanut täysimittaista tasaannuttamista kussakin koevaiheessa. Tästä puutteesta huolimatta koejärjestely tuotti vertailtavia mittaustuloksia suhteessa eri käsittelyihin. Lisäksi voidaan ajatella, että kosteusvaihteluiden rajoittuminen kappaleen pintakerroksiin simuloi CLT-komponentteihin kohdistuvia lyhytaikaisia kosteusmuutoksia ja rasituksia sen lopullisessa toimintaympäristössä.

Koesarjan kuivaussyklit toteutettiin hyödyntämällä tieteellistä lämpökaappia, jonka ilmankierto oli tehokas ja lämpötilaa sekä ilmanpoistoa voitiin säätää. Koekappaleiden kuivaus tapahtui kokeellisesti määritetyillä koesuunnitelman mukaisilla lämpötiloilla, joilla

saavutettiin ns. kvasistaattinen kosteussisältö koekappaleelle. Kvasistaattinen kosteustila tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, että koekappaleen punnitusmenetelmällä määritetty keskimääräinen kosteus vaihteli harmonisesti kuvitteellisen keskitasapainokosteuden molemmin puolin suhteessa koesykliin. Erillistä kuivausuuniin yhdistettyä kosteusmittausta ei toteutettu, sillä kuivaustulokset olivat esikokeiden perusteella tasaisia ja lisäksi laskennallista koekappalekosteutta voidaan käyttää selittäjänä halkeamamittauksissa. Tasaannutusvaiheet toteutettiin kontrolloiduissa olosuhdehuoneissa koesuunnitelman mukaan.

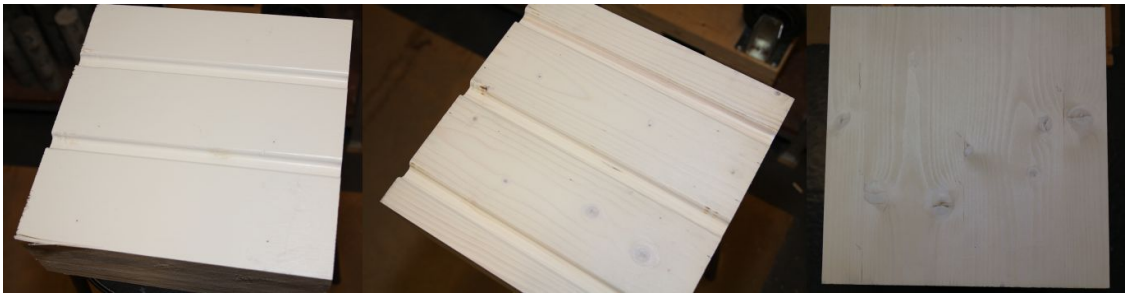
Koemateriaali oli Stora Enson toimittamaa CLT100-levyä (lamelleja viisi kappaletta, lamellipaksuus 20mm). Kuvasta 49 nähdään kuinka levyn toinen pintalamelli oli korvattu yhtiön Effex-tuotteella (paksuus n.19mm), joka on erityistä sisä- ja kalustekäyttöön tarkoitettua liimalevyä. Materiaalitoimittajan toivomuksesta Effex-tuotteen halkeilukäyttäytymistä haluttiin verrata uritettuun CLT-pintalamelliin. Muutoksen vaikutusta kokeen tuloksiin on vaikea arvioida ja lisäksi muutos aiheutti poikkeamia alkuperäiseen koesuunnitelmaan, jolloin täydelliset verrokit uritetuille kappaleille jäi puuttumaan. Aihetta käsitellään lisää tulosten tarkastelun yhteydessä.

Kuva 49. Effex-pintakerros.

Uritetuista koekappaleista osa pintakäsiteltiin, koska kokeissa haluttiin arvioida pintakäsittelyn ja urituksen esteettistä yhteisvaikutusta, urituksen vaikutusta pintakäsittelyn suorittamiseen ja pintakäsittelyn mahdollisia vaikutuksia koekappaleen halkeilutaipumukseen. Pintakäsittelyn päätyypeiksi valittiin kolme varianttia (Kuva 50). Vaihtoehdot olivat karkeasti: peittävä pintakäsittely, vahakäsittely ja lakkakäsittely. Alun perin lakkakäsittely ei ollut koesuunnitelmassa, mutta materiaalitoimittajan toiveesta se sisällytettiin testeihin. Koska muutos käsittelyjen lukumäärään tuli myöhässä, jäi lakkakäsitellyn sarjan koko puutteelliseksi ja siksi tulosten verrannollisuus on heikompi. Lakkakäsitely yhdistettiin tulostenkäsittelyssä vahakäsittelyn kanssa ryhmään: kuultokäsittely. Kaikkien käsittelyjen peruspigmentiksi valittiin valkoinen ja tuotteet olivat vesiohenteisia ja teolliseen pintakä-

sittelyyn soveltuvia tuotteita. Pintakäsittelytuotteet olivat seuraavat:

- Peittävä: Akvi TOP 30FD (vesiohenteinen akrylaattimaali)
- Kuultava: AkviWax Satin (vesiohenteinen puolisynteettinen vaha)
- Lakka: Akvi LAC FD-J 10 (vesiohenteinen akrylaattilakka)



Kuva 50. Pintakäsittelyt. Vasemmalta lukien: peittävä, vaha ja lakka.

Pintakäsittelyaineet olivat Tikkurila Oy:n puuteollisuuteen tarkoitettuja tuotteita ja pintakäsittelyt suoritettiin Tikkurila Oy:n tiloissa ja laitteilla yhtiön laboratoriossa Vantaalla. Koekappaleet olivat tasaantuneet yrityksen olosuhdehuoneessa (RH54% 25°C) kuukauden ajan ennen pintakäsittelyä. Pintakäsittely suoritettiin AIRMIX® suurtilavuusmatalapaineruiskutustekniikalla varustetulla käsikäyttöisellä maaliruiskulla harjaantuneen pintakäsittelijän toimesta. Suuttimen koko oli 11 ja suuttimen viuhkakulma 40 astetta. Käsittely ruiskutettiin kappaleen pintaan kahtena ristikkäisenä kerroksena ja urien käsittelyyn ei kiinnitetty erityistä huomiota, vaan kappaleet käsiteltiin ikään kuin ne olisivat olleet urittamattomia.

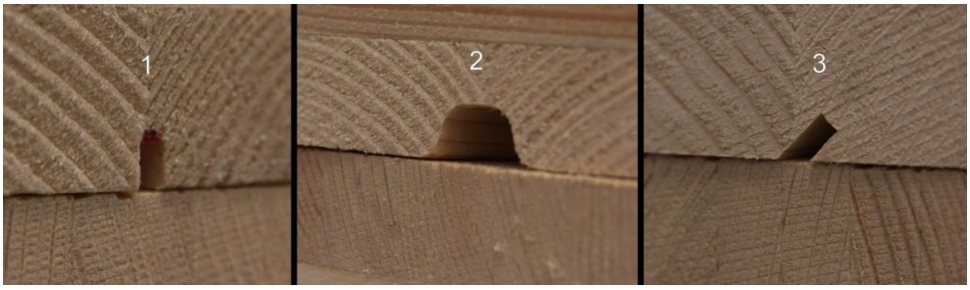
Kappaleet jätettiin ilman reunasuojauskäsittelyä koeohjelman läpimenoajan lyhentämiseksi. Koekappaleet painavat noin 3-4kg, joten tasaannutus ja kuivaussyklien kesto olisi venynyt kohtuuttomaksi suhteessa päättötyön resursseihin. Lisäksi kokeissa tarkastellaan CLT:tä materiaaliominaisuuksiltaan, eikä varsinaisena osana rakennetta. Reunasulun puuttumisesta huolimatta halkeamataipumus esiintyy todellisena vaikkakin sen mittakaava saattaa olla jossain tapauksissa karrikoitu.

Aineen märkälevitysmäärä selvitettiin otantana kustakin pintakäsittelytyypistä punnitsemalla koekappale ruiskutuksen jälkeen. Maalin ja lakan osalta levitysmäärä oli 120g/m^2 ja vahan osalta n. 100-110g/m^2. Pintakäsittelyt kuivattiin 50 asteisessa kuivausuunissa nopeasti. Lopuksi pintakäsittelyn annettiin kovettua huoneilmassa vajaan vuorokauden ajan, ettei kuljetuksessa syntyisi vaurioita vastakäsiteltyyn pintaan.

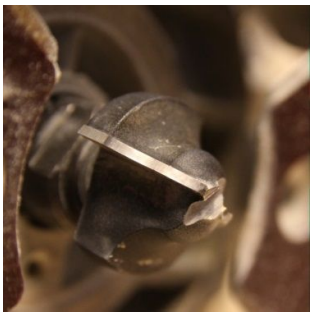
Koekappaleiden työstö toimitetuista CLT-aihioista ja CLT-tyyppisen pintalamellin uritus toteutettiin Aalto-yliopiston rakennetekniikan laboratorion puuntyöstölaitteilla. Uritusvariantteja oli kolme (Kuva 51):

- Kapea, matala ja teräväreunainen suora ura (syvyys n. 4,9mm, leveys n. 3,1mm)
- Leveä, pyöreäpohjainen ja –reunainen ura (syvyys n. 6mm, leveys n. 8mm)
- Vino ura (kohtisuora syvyys n. 5,5mm, leveys n. 3,1mm)

Kaikki urat olivat koekappaleen pintalamellin syysuunnan suuntaisia ja sijoitettiin esikokeiden perusteella optimisijaintiin, suoraan lamellien yhtymäkohdan/liimasauman kohdalle. Kapea suora ura ja vino ura työstettiin pyörösahalla ja leveä pyöreä ura työstettiin käsijyrsimellä ja tarkoitukseen muokatulla jyrsinterällä (Kuva 52).



Kuva 51. Työstetyt uramuodot.



Kuva 52. Muokattu jyrsinterä pyöreän uran jyrsimiseksi.

Koekappaleita tasaannutettiin noin kuukausi pintakäsittelyjen suorittamisen jälkeen. Puolet koekappaleista (B-sarja) sijoitettiin tasaantumaan kuivempaan olosuhdehuoneeseen (RH40% 20°C) ja puolet (A-sarja) kosteampaan olosuhdehuoneeseen (RH60% 20°C). Myös käsittelemättömät verrokkikappaleet oli tasaannutettu samoissa olosuhteissa. Koesarjan alussa tasaannutettujen koekappaleiden halkeamat mitattiin ja tulokset kirjattiin vastaamaan alkutilannetta ja lähtökosteutta. Seuraavaksi koekappaleet sijoitettiin kuivausuuniin, jonka lämpötila oli ensimmäisellä kuivauskerralla 35°C ja tulevilla kerroilla 30°C kappaleiden liiallisen kuivumisen välttämiseksi. Koekappaleita kuivattiin 72h jaksoissa yhteensä kolme kertaa, ja jokaisen kuivausjakson välissä koekappaletta tasaannutettiin 96h ajan olosuhdehuoneessa. Koesarjan aikana kummankin sarjan koekappaleet tasaannutettiin kosteammassa (RH60% 20°C) olosuhdehuoneessa, jotta kuivauksen aikana poistunut kosteus saataisiin mahdollisimman nopeasti korvattua. Jokaisen vaiheen jälkeen suoritettiin halkeamamittaukset, jotka yksilöitiin vastaamaan kutakin syklin vaihetta ja laskennallista kosteussisältöä.

6.4 Koekappalesarjat ja –merkinnät

Koekappaleet jaettiin kahteen pääsarjaan, A1 ja B1. A-sarjan koekappaleet tasaannutettiin 60% suhteellisessa kosteudessa ja 20 asteen lämpötilassa ennen koesyklien aloitusta. B-sarjan koekappaleet tasaannutettiin 40% suhteellisessa kosteudessa ja 20 asteen lämpötilassa ennen koesyklien alkua. Koesarjojen sisällä oli yhteensä yhdeksän varianttia siten, että kummassakin sarjassa oli kolme eri uritustyyppiä ja kaksi pintakäsittelyvaihtoehtoa sekä käsittelemätön verrokki.

Koekappaleet merkittiin yleisessä muodossa seuraavasti: X1.YZ, jossa X-muuttuja vastaa pääsarjaa (A/B), Y-muuttuja vastaa urituksen tunnusta (1= suora ura/ 2= pyöristetty ura / 3= vino ura) ja Z-muuttuja vastaa pintakäsittelymenetelmää (P=peittävä / V=vaha / K=käsittelemätön). Esimerkiksi RH60% tasaannutettu koekappale, jossa on vinoon sahattu ura ja joka on käsitelty peittävällä pintakäsittelyllä merkitään tunnuksella A1.3P. Lisäksi koetuloksissa tunnukseen liitetään tarkenne YP tai AP, joka tarkoittaa koekappaleen ylä- tai alalapetta. Ylälape on Effex-ratkaisulla toteutettu ja alalape on tavallinen CLT-pinta uritettuna.

Urittamattomana verrokkina toimii C-sarja, jossa edellä kuvattu merkintälogiikka ei päde. C-sarjan koekappaleet on listattu ja kuvattu alla olevassa taulukossa.

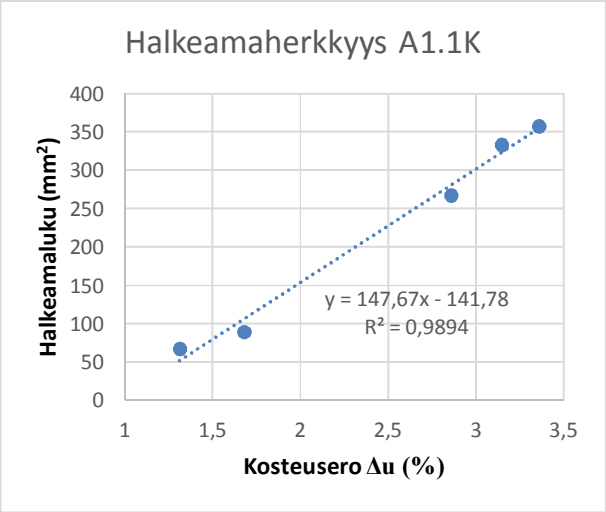
Taulukko 11. C-sarjan koekappaleiden merkinnät, käsittelyt ja tasaannutuskosteudet.

Tunnus	Tasaannutuskosteus	Käsittely
C1.1PK	RH 40%	-
C1.2PV	RH 40%	Lakka
C1.3PP	RH 40%	Peittävä
C1.1VK	RH 60%	-
C1.2VV	RH 60%	Lakka
C1.3VP	RH 60%	Peittävä

6.5 Tulosten käsittely

Halkeamamittausten tulosten vertailuun ja tulkintaan ei ole valmista täysin soveltuvaa standardia. Näin ollen, tuloksista lasketaan kaksi tunnuslukua, jotka kuvaavat kappaleen halkeilutaipumusta suhteessa kokeen muuttujiin. Tärkein vertailuluku on suhteellinen halkeama pinta-ala, jossa kaavaa 14 vastaavaa halkeamalukujen (=halkeaman leveys kertaa pituus) summaa kolmannen kuivaussyklin jälkeen verrataan koekappaleen lappeen alkutilan pinta-alaan. Tuloksena saadaan siis halkeamapinta-alan suhteellinen osuus tarkastelupinnalla ja sen yksikkö on promille (‰).

Toinen vertailuluku on niin sanottu halkeamaherkkyys. Se on kaavassa 14 esitetyn halkeamaluvun johdannainen ja se muodostetaan sovittamalla kuivaussyklien tuloksiin lineaarinen regressiosuora siten, että vaaka-akselilla on kosteuden muutos suhteessa lähtökosteuteen (yksikkö: prosentti) ja pystyakselilla on lähtötilan ja koejakson jälkeisen halkeamaluvun erotus. Kuvassa 53 on esitetty esimerkki halkeamaluvun määrityksestä koekappaleen A1.1K tapauksessa. Halkeamaherkkyyden tunnusluku on pisteisiin sovitetun regressiosuoran kulmakerroin. Halkeamaherkkyys kuvaa siis kosteusmuutoksen synnyttämää halkeamaluvun kasvua ja sen yksikkö on neliömillimetriä per kosteuden muutos prosentteina (mm^2/ Δu [%]), missä u on kappaleen kosteussisältö. Erona suhteellisen halkeamapinta-alan tunnuslukuun on se, että halkeamaherkkyys ottaa huomioon useamman mittaustuloksen yhteisvaikutuksen, jolloin esimerkiksi herkästi jo varhaisessa vaiheessa halkeilevan kappaleen painoarvo korostuu.



Kuva 53. Halkeamaherkkyyden määritys koekappaleesta A1.1K kosteuseron ja halkeamaluvun regression avulla.

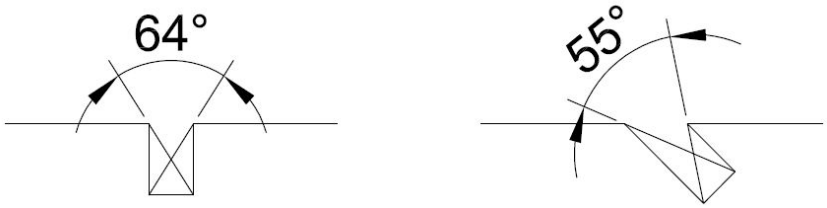
Koska koekappaleiden absoluuttista kosteutta ei voida mitata tarkasti eri vaiheissa, hyödynnetään tulosten käsittelyssä laskennallista keskimääräistä kosteussisältöä, joka perustuu koe-erästä tehtyyn alkutilanteen otantaan. Otannassa käytettiin satunnaisia kappaleita toimitetusta koemateriaalista, joiden kosteus määritettiin punnitus-kuivausmenetelmällä. Näin saatuja keskimääräisiä kosteusarvoja käytettiin edustamaan kunkin koekappale-erän alkutilanteen kosteutta. Kokeen edetessä kappaleiden kosteus määritetään siis suhteessa tähän laskennalliseen kosteuteen, mikä aiheuttaa satunnaista virhettä tuloksiin.

Vertailulukujen soveltuvuutta testataan tulosten käsittelyn yhteydessä, ja kukin vertailuluku on herkempi erityyppiselle halkeilukäyttäytymiselle ja painottaa tuloksia eri tavoin. Tulosten käsittelyssä pyritään löytämään yhteys eri vertailu- ja tunnusluvuille ja halkeilun subjektiiviselle arviolle.

Tulosten käsittelyn apuna hyödynnetään jokaisesta koekappaleesta ja koevaiheesta otettuja valokuvia koekappaleiden lappeista. Kuvien avulla voidaan mahdollisesti selventää poikkeavia koetuloksia ja arvioida käsittelyjen vaikutusta esteettisesti.

Halkeamalukutuloksista muodostettiin kaksi eri olettamaa. Ensimmäisen mukaan uran pohjalle syntyvän halkeaman painoarvo määritetään uran geometriasta, laskemalla niin sanottu näköestekerroin. Näköestekerroin perustuu oletukseen, että tasaiselta pinnalta halkeama voidaan havaita 180 asteen sektorilta suhteessa koekappaleen lappeeseen, tällöin näköestekerroin saa arvon 1. Ura muodostaa näköesteen, jolloin halkeamaa ei voida havaita joka suunnasta, vaan näköestekerroin lasketaan havaintokulman suhteena tasaisen pinnan halkeaman havaintokulmaan. Uritetun pinnan havaintokulma lasketaan piirtämällä kuvitteelliset suorat uran pohjan reunoista vastakkaisen puolen yläreunaan. Näiden kahden kuvitteellisen suoran väliin muodostuu kulma, joka suhteutetaan 180 asteeseen, jolloin sen arvo on]0..1,0[. Tässä tapauksessa uritustyypin 1 (suora ura) näköestekertoimeksi saatiin 0,356 ja uritustyypin 3 (vino ura) kertoimeksi puolestaan 0,306. Poikkeuksena on pyöristetty ura, sillä sen geometria on ongelmallinen kiistattoman määrityksen kannalta, ja siksi sen näköestekertoimeksi asetetaan arvio: 0,7. Suoran ja vinon uran näköestekertoimen havaintokulman määritys havainnollistetaan kuvassa 54.

Toinen olettama halkeamaluvuista mitätöi uran pohjaan syntyneiden halkeamien merkityksen täysin, jolloin käytännössä niiden näköestekerroin olisi 0. Poikkeuksena tässäkin tapauksessa on pyöreä ura, sillä se on liian laakea kyseisen oletuksen sallimiseksi. Pyöreän uran halkeamalukujen kertoimena käytetään tässäkin tapauksessa arvoa 0,7. Nollaolettama on perusteltu, sillä uran pohja on harvoin näkyvissä siinä määrin, että siellä esiintyvät halkeamat muodostaisivat vakavan esteettisen haitan.



Kuva 54. Näköestekertoimen havaintokulman määritys uritustyypeille 1 ja 3.

6.6 Tilastollinen analyysi

Ennen tulosten esittämistä, tehdään katsaus tulosten tilastolliseen analyysiin, jolloin tulosten käsittelyssä voidaan keskittyä niihin kokeisiin, jotka tilastollisen testauksen perusteella ovat tilastollisesti merkittäviä. Tilastollinen analyysi suoritettiin IBM SPSS Statistics 22 – ohjelmistolla.

Kokeiden luonteen, käytännön järjestelyjen, logististen syiden ja päättötyön mittakaavan takia otoskoot olivat rajoitettuja. Tilastollinen analyysi pienillä otoksilla on riskialtista ja varsinkin puun tapauksessa tilastollinen vaihtelu on suurta. On mahdollista, että osa todellisista tilastollisista yhteyksistä jää havaitsematta pienen otoskoon takia.

Pienille otoksille ($n<30$) suositellaan käytettäväksi yksisuuntaista varianssianalyysia ja erittäin pienille otoksille ($n<12$) niin sanottua Mann-Whitneyn U-testiä. U-testillä selvitetään, onko kaksi koetulosryhmää peräisin samasta jakaumasta, eli toisinsanoin onko koetulosryhmät käytännössä yhtäläisiä vai onko otosten keskiarvoero mahdollisesti seurausta sattumasta. Mann-Whitneyn U-testi voidaan laajentaa koskemaan useamman ryhmän vertailua, jolloin puhutaan niin sanotusta Kruskal-Wallisin H-testistä. Sen avulla voidaan tutkia ryhmän sisäisten erojen merkitsevyyttä vertailemalla ryhmien tulosjakaumaa. Huomattakoon, että testit toistettiin kiistattomuuden vuoksi myös yksisuuntaisella varianssianalyysillä, jotka antoivat tulkinnaltaan yhdenmukaiset, mutta arvoiltaan erilaiset tulokset, joten niitä ei tarkastelussa nähdä tarpeelliseksi esittää.

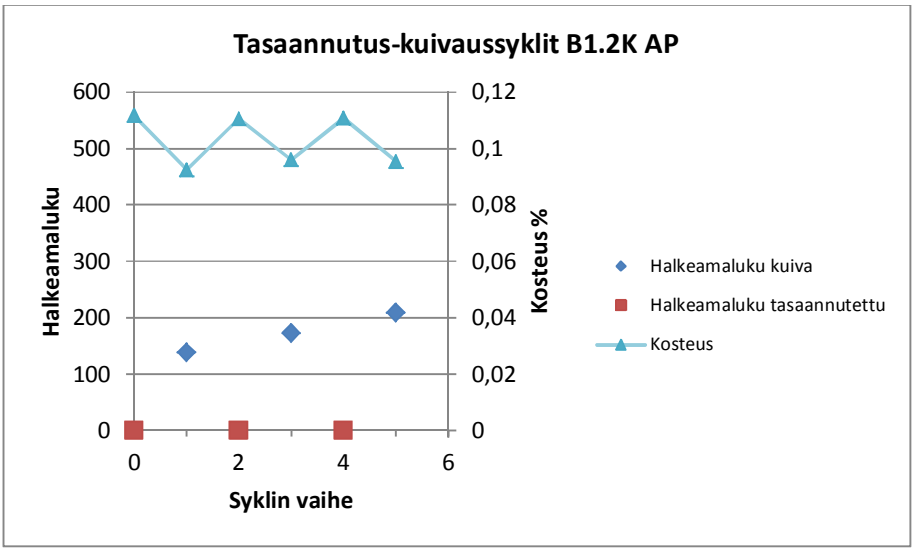
7 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Kappaleessa esitetään kokeiden tulokset ja tulosten tilastollinen katsaus.

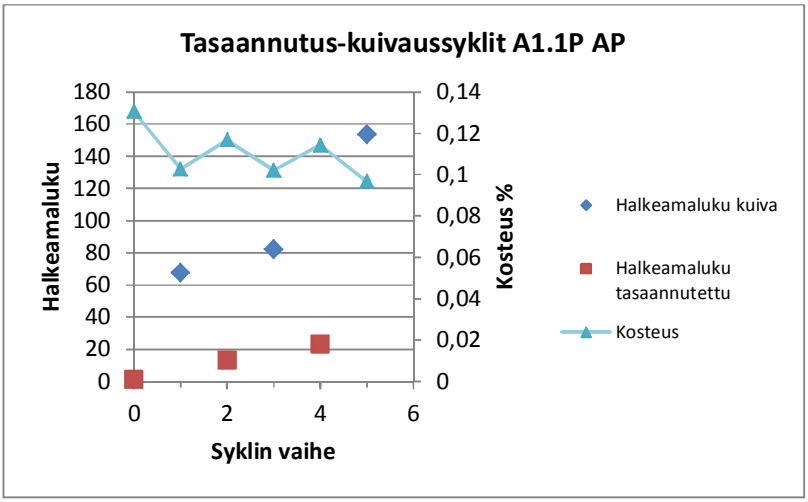
7.1 Koesyklit

Kokeellisen osion aikana tasaannutus-kuivaussyklien tulokset tallennettiin tulostaulukkoon ja kunkin koekappaleen ja lappeen halkeamamittaukset ja laskennallinen kosteus sijoitettiin kuvaajaan. Esimerkit kahden kappaleen kuvaajista on esitetty kuvissa 55 ja 56.

Kuvaajista voidaan nähdä, että halkeama riippuu koekappaleen historiasta, ja että osa muutoksista on peruuttamattomia. Halkeamien peruuttamattomuus korostuu joissain koekappaleissa erityisesti siten, että tasaannutetun vaiheen halkeamaluku kasvaa, eli toisinsanoen halkemat eivät kuroudu kiinni kosteutuksen myötä. Halkeilu on jatkuvasti kasvavaa CLT-lamellien osalta johtuen siitä, että edellisen syklin lopputila on seuraavan syklin alkutila. Olemassa olevat halkeamat jatkavat kasvamistaan, ja joissain tapauksissa kappaleeseen syntyy myös uusia halkeamia syklien edetessä. Effex-lamellilla halkeamataipumus tasaantui hiukan kohti kokeen loppua. Käytännössä testien perusteella uusien halkeamien synty on kuitenkin verrattain harvinaista ja useimmissa tapauksissa ensimmäisen kuivauksen aikana syntyneet halkeamat jatkoivat kasvamistaan kokeen edetessä.



Kuva 55. Koekappaleen B1.2K koesyklien eteneminen ja halkeamalukumittaukset.



Kuva 56. Koekappaleen A1.1P koesyklien eteneminen ja halkeamalukumittaukset.

Koekappaleiden kosteussisällön vaihtelu oli noin yhdestä kolmeen prosenttia koko kokeen aikana. Tasaannutus-kuivaussyklin välillä kosteusvaihtelu oli noin prosentin, joka vastaa käytännössä rakennetussa ympäristössä viikko tai kuukausitason kosteusvaihtelua rakenteessa. Taulukko 12 esittää koesarjojen keskimääräiset kosteudet koko sarjan osalta sekä poislukien lähtötilanteen kosteuden. Noin 10% tasapainokosteus puussa tarkoittaisi rakennuksessa noin 50% suhteellista kosteutta huoneilmassa, jos huoneilman lämpötila on noin 20 astetta. Kosteammat A-sarjan koekappaleet olivat noin 0,5-1 prosenttia kosteampia kuin kuivemmat B-sarjan koekappaleet. C-sarja asettuu keskiarvojen osalta näiden kahden ryhmän väliin, sillä se sisälsi molemmissa kosteusolosuhteissa tasaannutettuja kappaleita.

Taulukko 12. Keskikosteudet ja –hajonnat koekappalesarjoissa. Yksikkö on prosenttia (%)

Sarja	Keskikosteus	Keskihajonta	Pl. Lähtökosteus	Keskihajonta
A	11,42	0,29	11,02	0,29
B	10,49	0,29	10,58	0,37
C	10,89	0,47	10,29	0,28
Kaikki sarjat	10,94	0,53	10,64	0,44

7.2 Halkeilukokeiden tulokset

Koetulosten perusteella koekappaleiden halkeiluun voitiin vaikuttaa urittamalla. Tilastollisesti merkitsevä ja tehokas keino oli pintaan työstetty vino ura. Halkeilutaipumus oli heikoimmassakin tapauksessa (tapaus 3, ks. taulukot 14 ja 15 sekä kuva 57) noin 22% urittamattoman verrokin tuloksesta. Parhaassa tapauksessa (tapaus 4) vinouritetun pinnan halkeilutaipumus oli noin 1,3% urittamattoman pinnan halkeilusta. Muilla urituskeinoilla ei saatu tilastollisesti merkittäviä tuloksia halkeilun vähenemisen suhteen verrattuna urittamattomaan pintaan. Tarkemmat tulostarkastelut esitetään kappaleessa 7.4.

Tämän työn koejärjestelyt eivät tuottaneet tilastollisesti merkittävää eroa eri pintakäsittelyaineiden halkeamakäyttäytymisen välille. Myöskään lähtökosteudella ei havaittu olevan tilastollisesti merkittävää vaikutusta halkeamataipumukseen. On todennäköistä, että syy tähän on alhainen koekappaleiden lukumäärä.

7.3 Käsittelyryhmien tilastollinen vertailu

Kappaleessa vertaillaan käsittelyryhmien eroja toisiinsa tilastollisen testauksen avulla. Tulosten kannalta mielenkiintoisin tapaus, urituksen vaikutus halkeilukäyttäytymiseen tarkastellaan tässä osiossa. Tilastollisesti merkitsemättömät tapaukset, kuten tasaannutuskosteus ja pintakäsittely esitetään liitteissä 2 ja 2.

Tulokset ryhmiteltiin uritusten perusteella ja ryhmien tuloksia vertailtiin Kruskal-Wallisin H-testillä. Testin perusteella saatiin näyttöä, että uritusryhmien jakaumat eroavat oleellisesti toisistaan. Kruskal-Wallisin testi ei ilmoita, minkä ryhmien välillä ero havaittiin, ja varsinaiset parivertailut esitetään kappaleessa 7.4. Urituksen vaikutus kokonaisuudessaan vahvistettiin selkeästi kaikilla vertailuluvuilla ja painotuksilla, kuten taulukosta 13 havaitaan.

Taulukko 13. Koonti urituskäsittelyiden tilastollisesta testauksesta.

Vertailuluku ja painotus (uritus)	Testi	Nollahypoteesi	p-arvo	α	Tulos
Halkeamapinta-ala (painotettu)	Kruskal-Wallis	Tulokset samasta jakaumasta	0,028	0,05	H_0 hylätään
Halkeamapinta-ala (uran pohja 0)	Kruskal-Wallis	Tulokset samasta jakaumasta	0,006	0,05	H_0 hylätään
Halkeamaherkkyys (painotettu)	Kruskal-Wallis	Tulokset samasta jakaumasta	0,027	0,05	H_0 hylätään
Halkeamaherkkyys (uran pohja 0)	Kruskal-Wallis	Tulokset samasta jakaumasta	0,006	0,05	H_0 hylätään

Esimerkkinä testien tulkinnasta tarkastellaan tapaus: ”Halkeamapinta-ala (painotettu). 95% merkitsevyystasolla (α=0,05) uritusvaihtoehtojen ryhmien välisen testauksen p-arvo oli 0,028, jolloin nollahypoteesi hylätään. Tulos voidaan tulkita siis siten, että urituskäsittelyjen jakaumat eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi.

7.4 Uritustapojen vertailu

Urituksen toiminnan lähempi tilastollinen tarkastelu osoittaa eri uritustapojen keskinäiset erot tilastollisella luotettavuudella. IBM SPSS Statistics 22 –ohjelmistolla suoritetut Kruskal-Wallis parivertailut antavat havainnollistavat tulosteet eri käsittelyparien keskinäisistä suhteista ja tulosten merkitsevyydestä. Tulosten tarkastelussa keskitytään tilastollisesti merkittäviin vertailuihin, mutta myös muiden tulosryhmien tiedot esitetään siitä syystä,

että otoksen pieni koko on saattanut aiheuttaa tilastollisen harhan tuloksiin (väärä hylkäys). Paritestien tulosteet on esitetty merkitsevyyslukuineen liitteissä 3,4,5, ja 6.

Tulokset esitellään vertailuluku- ja painotuskohtaisesti neljänä eri tapauksena (ks. Taulukko 14). Tapaukset eroavat toisistaan vertailuluvun muodostuksen osalta, ja menetelmä selostettiin kappaleessa 6.5 sivulla 81.

Parivertailujen perusteella vinolla uralla uritetut pinnat poikkeavat käytökseltään muista pinnoista. Kuten taulukon 14 oikeanpuolimmaisista sarakkeesta nähdään, tilastollisesti merkitsevät erot havaittiin vinon uran ja suoran uran, sekä vinon uran ja pyöreän uran välillä useassa tapauksessa. Urittamattomaan pintaan verrattuna tilastollinen merkitsevyys havaittiin tapauksessa, jossa koetuloksista oli mitätöity urien pohjalle syntyneet halkeamat ja mittarina käytettiin halkeamaherkkyyttä. Selvennyksenä mainittakoon, että mikäli tilastollinen merkitsevyys puuttuu, tarkoittaa se sitä, että havaittu ero tulosten välillä saattaa olla puhdasta sattumaa.

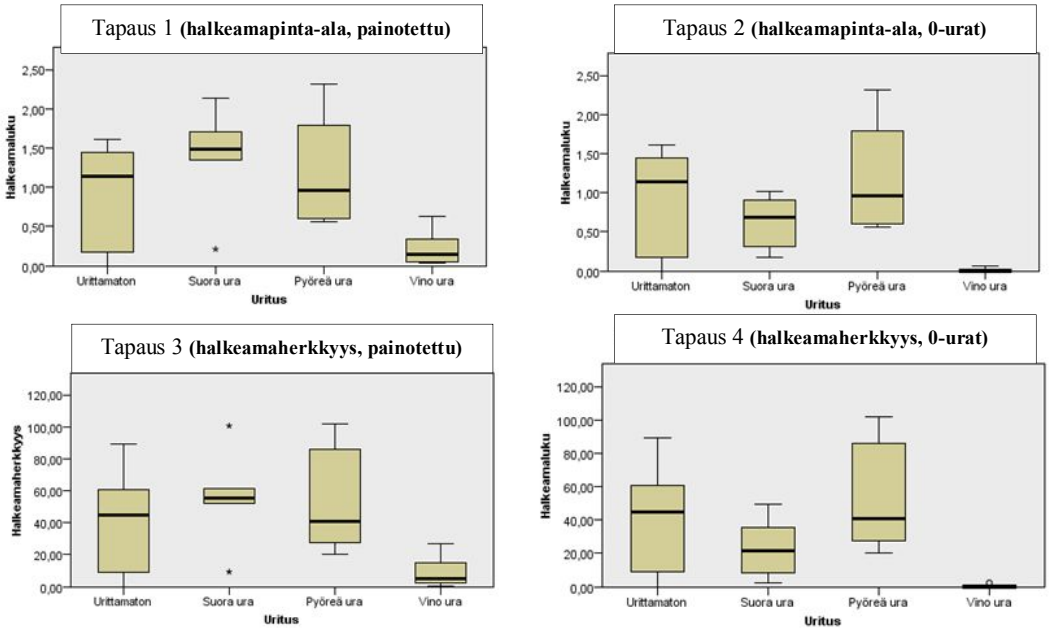
Taulukko 14. Tarkastelutapaukset ja tilastollisen parivertailun tulokset.

Tapaus nro.	VERTAILULUKU JA KUVAUS	Tilastollisesti merkitsevät parivertailut
1	Painotettu suhteellinen halkeamapinta-ala	Vino ura – Suora ura *(Vino ura – Pyöreä ura)**
2	Uran pohjan osalta mitätöity suhteellinen halkeamapinta-ala	Vino ura – Pyöreä ura *(Vino ura – Urittamaton)** *(Vino ura – Suora ura)**
3	Painotettu halkeamaherkkyys	Vino ura – Suora ura *(Vino ura – Pyöreä ura)**
4	Uran pohjan osalta mitätöity halkeamaherkkyys	Vino ura – Pyöreä ura Vino ura - Urittamaton *(Vino ura – Suora ura)**
**korjaamaton merkitsevyysluku*		

Taulukossa 14 mainittu alahuomautus korjaamattomasta merkitsevyysluvusta tarkoittaa sitä, että tuloksen painoarvo on pienempi, mutta silti merkittävä. Korjattu merkitsevyysluku ottaa huomioon väärän hyväksynnän riskin (*false positive*), kun samaa testiä suoritetaan sarjassa. Korjaamattoman merkitsevyysluvun perusteella esitetyt päätelmät eivät ole yhtä luotettavia.

Edellä kuvattuja tuloksia voidaan havainnollistaa laatikkokaaviolla (Kuva 57) sekä ryhmien sisäisillä keskiarvoilla ja –hajonnoilla (Taulukko 15). Laatikkokaavio on tehokas työkalu tulosjakaumien havainnollistamiseen. Kuviossa nelikulmion keskelle piirretty viiva kuvaa tulosjoukon mediaania, nelikulmion ylä- ja alareuna kuvaavat ylempää ja alempaa kvartiilia tuloksista ja nelikulmion päädyistä erkanevat janat kuvaavat suurinta ja

pienintä arvoa tulosjoukossa. Arvot, joiden etäisyys on puolitoista tai kolminkertainen suhteessa ylemmän ja alimman kvartiilin väliseen etäisyyteen merkitään kuviossa poikkeustuloksiksi pallolla tai tähdellä. Näiden pisteiden voidaan olettaa olevan mittausvirheitä tai muita tilastollisia häiriöitä.



Kuva 57. Tulosjakaumia kuvaavat laatikkokaaviot neljässä eri tarkastelutapauksessa. Huom. vinon uran poikkeava toiminta kaikissa tarkasteluissa.

Kuvasta 57 ilmenee selkeästi, että urittamattoman pinnan halkeamatulosten jakauma on laakea, sillä kvartiilit ovat suuria. Tämä osaltaan saattaa selittää, miksi tilastolliselta kannalta katsottuna urittamalla saadut tulokset ovat monessa tapauksessa tilastollisesti katsoen peräisin samasta jakaumasta. Kuva kuitenkin osoittaa, että vinon uran toiminta poikkeaa huomattavasti muista urista, sillä sen mediaani on poikkeuksellisen alhainen kaikissa tapauksissa. Suoran uran voidaan ajatella pienentävän hajontaa halkeilutaipumuksessa, eli toisinsanoen yhdenmukaistavan levyn ilmettä. Pyöreän ura helpottaa halkeaman syntyä ja havaitsemista levyn pinnassa.

Samankaltaista tulkintaa tukee myös taulukko 15, jossa on esitetty tapausten sisäiset keskiarvot ja hajonnat. Keskiarvoista havaitaan, että urittamaton pinta sekä suoralla ja pyöreällä uralla uritetut pinnat ovat keskiarvojen ja hajontojen osalta lähellä toisiaan. Vinon uran tunnusluvut poikkeavat muista ryhmistä huomattavasti kaikissa tapauksissa. Taulukon avulla on myös helppo havaita ero näköestekertoimilla painotettujen tulosten (merkintä: painotettu) ja uran pohjan osalta mitätöityjen (merkintä: 0-ura) tulosten välillä. 0-ura tapaukset tuovat toisin sanoen ilmi ne halkeamat, jotka ovat syntyneet urituksen ulkopuolelle, kun taas painotettu tapaus ottaa huomioon kaikki halkeamat.

Taulukko 15. Vertailutapauksien taulukoidut keskiarvot ja keskihajonnat uritusryhmien sisällä.

TAPAUS 1 (halkeamapinta-ala, painotettu)		
Uritukset	**Keskiarvo (‰)**	**Keskihajonta (‰)**
Urittamaton	0,917	0,694
Suora ura	1,394	0,643
Pyöreä ura	1,199	0,704
Vino ura	0,224	0,226

TAPAUS 2(halkeamapinta-ala, 0-urat)		
Uritukset	**Keskiarvo (‰)**	**Keskihajonta (‰)**
Urittamaton	0,917	0,694
Suora ura	0,630	0,347
Pyöreä ura	1,199	0,704
Vino ura	0,015	0,025

TAPAUS 3 (halkeamaherkkyys, painotettu)		
Uritukset	**Keskiarvo ($mm^2/\Delta u\%$)**	**Keskihajonta ($mm^2/\Delta u\%$)**
Urittamaton	41,417	33,123
Suora ura	55,717	29,041
Pyöreä ura	52,888	33,003
Vino ura	9,183	9,948

TAPAUS 4 (halkeamaherkkyys, 0-urat)		
Uritukset	**Keskiarvo (mm2/Δu%)**	**Keskihajonta (mm2/Δu%)**
Urittamaton	41,417	33,123
Suora ura	23,175	17,766
Pyöreä ura	52,888	33,003
Vino ura	0,544	0,983

Vinon uran tapauksessa keskihajonta on suuri suhteessa keskiarvoon, mikä voi osaltaan selittää tilastollisen analyysin kykenemättömyyttä erottaa tuloksia muista ryhmistä osassa tapauksista. Taulukon 15 vinon uran tuloksia (tapaus 4) voidaan esimerkiksi tulkita sanallisesti siten, että kappaleen kosteuden alentuessa yhden prosentin, syntyy kappaleeseen keskimäärin halkeamalukua 0,544mm^2 vastaava halkeama (tai joukko halkeamia) urien ulkopuolelle. Suoran uran tapauksessa vastaava luku olisi teoriassa noin 40 kertaa suurempi (23,175mm^2). Tilastollisen epävarmuuden vuoksi tämänkaltaiset mallit eivät ole täysin yleistettävissä.

7.5 Effex-pintalamellin toiminta

Effex-paneelin toiminta eroaa niin merkittävästi ja selkeästi CLT-pinnan toiminnasta, että erillistä tilastollista vertailua näiden kahden ratkaisun välillä on tarpeetonta esittää. Tuloksia vertaillaan suoraan keskiarvoilla. Effex-paneeli katsottiin materiaalitoimittajan kannalta vaihtoehtoiseksi ratkaisuksi urittamiselle, joten siitä syystä vertailua voidaan suorittaa kaikkien uritustyyppien yli lasketun keskiarvon ja Effex-pintalamelliratkaisun tuloskeskiarvon välillä. Lisäksi tulosten tarkastelussa nähdään tarpeelliseksi esittää vertailu ainoastaan näköestekertoimella painotettuihin CLT-halkeilutuloksiin, sillä vertailu uran pohjan osalta mitätöityihin tuloksiin ei tuota mitään merkittävää uutta tietoa, havaittujen erojen ainoastaan moninkertaistuessa jälkimmäisessä tapauksessa.

Kuva 58. Esimerkki halkeilleesta Effex-pinnasta kolmannen kuivaussyklin jälkeen.

Testien perusteella voidaan todeta, että Effex-paneeli ei toiminut halkeilun kannalta edullisesti. Halkeilutaipumus oli erittäin voimakas (ks. Kuva 58) ja esteettisesti arvioituna haasteellinen. Effex-paneelin halkeilutaipumus oli erilainen kuin CLT:llä yleisesti, sillä halkeilukuvio oli erittäin satunnainen. Halkeamat eivät edenneet aina syykuvion suuntaisesti, vaan halkeama saattoi mutkitella. Halkeamat eivät keskittyneet liimasaumojen kohdalle, kuten CLT-pintalamellissa. Taulukot 16 ja 17 esittävät vertailun CLT- ja Effex-pintojen välillä kahdella eri tunnusluvulla mitattuna. Tuloksista voidaan johtaa päätelmä, että Effexin halkeilutaipumus on noin nelinkertainen suhteessa CLT-pintaan.

Taulukko 16. Suhteellisen halkeamapinta-alan vertailu CLT- ja Effex-pintalamellin välillä. Suhdeluku-sarake vertaa keskiarvojen suhdetta toisiinsa.

Suhteellinen halkeamapinta-ala (‰)

	CLT-pinta		**Effex-pinta**		
	Keskiarvo	Keskihajonta	**Keskiarvo**	Keskihajonta	**Suhdeluku:**
Käsittelemätön	0,87	0,78	3,64	1,67	4,21
Peittävä käsittely	0,95	0,58	3,55	0,94	3,76
Vahakäsittely	0,99	0,73	4,34	2,30	4,39
Keskiarvo:	**0,93**	**0,71**	**3,85**	**1,76**	**4,12**

Taulukko 17. Halkeamaherkkyyden vertailu CLT- ja Effex-pintalamellin välillä. Suhdeluku-sarake vertaa keskiarvojen suhdetta toisiinsa.

Halkeamaherkkyys ($mm^2/\Delta u\%$)

	CLT-pinta		Effex-pinta		
	Keskiarvo	Keskihajonta	**Keskiarvo**	Keskihajonta	**Suhdeluku:**
Käsittelemätön	35,49	33,01	152,76	61,65	4,30
Peittävä käsittely	41,42	26,90	122,00	56,06	2,95
Vahakäsittely	42,50	33,72	172,39	85,42	4,06
Keskiarvo:	**39,80**	**31,51**	**149,05**	**71,95**	**3,74**

7.6 Urituksen toteutettavuus ja esteettinen arvio

Urituksen toteuttaminen pienessä mittakaavassa oli helppoa. Haastavinta oli terän säätäminen haluttuihin asetuksiin, sillä sirkkeli oli käsisäätöinen vailla minkäänlaista asteikkoa. Ongelma poistuisi modernilla numeerisesti ohjatulla sirkkelillä. Pyöreän uran työstäminen oli hankalaa, sillä työstössä piti käyttää käsijyrsintä. Työstönopeuden tarkka säätely oli haastavaa, ja seurauksena työstöpinnasta saattoi tulla karhea tai ura saattoi palaa paikoitellen. Lisäksi jyrsimen sijoittaminen haluttuun kohtaan vaati ohjauspuun kiinnittämistä pintalamelliin, joka jätti naulanreikiä pintaan.

Laskennallisesti uritus ei tuota mittavaa materiaalihukkaa, sillä esimerkiksi suoran uran tapauksessa pintalamellikerroksesta poistetaan noin 0,8% CLT100-tuotteella (yksittäisen lamellin dimensiot 100x20mm). Koko kappaleen kannalta tämä tarkoittaa noin 0,15% materiaalihukkaa.

Esteettisesti arvioiden, vino ura tuottaa mielenkiintoisimman tuloksen, sillä vinon uran synnyttämä ”lippa” aiheuttaa uraan pehmeät varjot ja vaikutelma on miellyttävä. Suora ura luo teräviä varjoja ja kontrasteja materiaalin pintaan, joka sekin saattaa olla jossain tapauksissa tavoiteltava ominaisuus. Pyöreä ura tekee subjektiivisesti arvioiden pinnasta levottoman. Työn aikana nostettiin usein esiin toivomus mahdollisimman kapean uran toteuttamisesta. Kapeassa urassa on riski, että uritus saa pinnan näyttämään tavalliselta paneloinnilta. Lisäksi, kapea ura saattaa näyttää periaatteessa halkeamalta ja kosteuselämisen seurauksena ura saattaa turvota umpeen vuodenaikojen vaihdellessa.

7.7 Pintakäsittelyn ja tasaannutuskosteuden vaikutukset

Pintakäsittelykokeiden tarkoituksena oli antaa alustavaa tietoa siitä, kuinka uritus ja pintakäsittely toimivat yhdessä. Pintojen estetiikkaa arvioitaessa voidaan todeta, ettei uritus aiheuta erityisiä vaatimuksia pintakäsittelyaineen suhteen.

Peittävä valkoinen pintakäsittely korostaa halkeamia. Toisaalta, pelkästään keskiarvoja tarkastelemalla, voidaan ehkä päätellä, että peittävä pintakäsittely kykenee hillitsemään halkeilutaipumusta Effex-paneelin tapauksessa, sillä tulosryhmistä peittävän pintakäsittelyn keskiarvot ovat kaikissa tapauksissa pienimmät. Ero on pieni, ja sen tilastollinen merkitsevyys ei anna aihetta suoran johtopäätöksen tekemiseen. Ilmiön vahvistamiseksi pitäisi suorittaa tarkemmat kokeet pintakäsittelyn vaikutuksista suuremmilla koekappalemäärillä.

Kuultokäsittelyt sallivat kosteuden läpäisyä enemmän, jolloin halkeilutaipumuksen voidaan olettaa lisääntyvän, mutta esteettisesti arvioiden halkeamien havaitseminen on vaikeampaa valkoiseksi sävytetyllä kuultokäsittelyllä. Esteettisten mieltymysten perusteella kuultokäsittelyiden peittävyys on säädettävissä, jolloin saatetaan joissain tapauksissa saavuttaa kuultokäsittelylläkin sellainen rajakohta, jossa halkeamat alkavat korostua jälleen voimakkaasti, kuten peittävän pintakäsittelyn tapauksessa.

Tasaannutuskosteudella ja pintakäsittelyllä ei havaittu voimakasta yhteisvaikutusta halkeiluun. Vaikka koetulosten perusteella tasaannutuskosteudella ei saatu tilastollisesti merkitseviä eroja halkeilukäyttäytymiseen, voidaan kuitenkin kirjallisuusosiossa esitettyjen seikkojen perusteella väittää, että toimituskosteus ja käyttöönottokosteus CLT:ssä ovat tärkeimmät tekijät CLT:n halkeilun suhteen rakennuksen käyttöönoton jälkeen.

7.8 Urituksen vaikutus pintakäsittelyn suorittamiseen

Suoran uran ei todettu vaikuttavan merkittävästi pintakäsittelyn onnistumiseen. AIRMIX matalapainesuurtilavuusruiskutuksella pintakäsittelypartikkelit onnistuivat kulkeutumaan uran kaikille pinnoille kahdella ristikkäisellä pyyhkäisyllä. Vinon uran tapauksessa uran pohjan käsittely jäi ohueksi ja kappaleen pinnan puoleinen uran syrjä jäi lähes käsittelemättä. Tällä ei kuitenkaan ole suurta merkitystä, sillä kyseiset pinnat näkyvät harvoin käyttäjälle. Pyöreä ura ei vaikuttanut käsittelyyn millään lailla, mutta pyöreän uran työstössä syntyneet karheat ja palaneet kohdat korostuivat rumasti kaikilla käsittelytyypeillä.

Eri pintakäsittelyaineilla ei havaittu muita merkittäviä eroja uritusten käsittelyn suhteen, muuta kuin että vaha saattoi jossain tapauksessa synnyttää epätasaista ja laikukasta jälkeä. Tästä syystä vahan levityksen jälkeen vaadittaisiin kenties harja- tai kaavarikäsittely. Vaha aiheutti myös lievää kuitujen pystyyn nousemista puupinnassa, mutta ilmiö lieveni pinnan kuivumisen jälkeen. Harjaus saattaisi myös auttaa varmistamaan urien täydellisen käsittelyn kaikissa tapauksissa.

8 CASE: VILLA LYCKA

Helsingin Maunulaan rakennettiin diplomityön aikana CLT-rakenteinen omakotitalo (kuva 59), jossa CLT-pinnat haluttiin jättää asuintiloissa näkyviin. Halkeiluongelman ratkaisemiseksi osassa pinnoista kokeiltiin urittamista, jotta halkeilu ei korostuisi näissä pinnoissa. Talon suunnitteli arkkitehti Heikki Viiri. Rakennuttajana oli perhe Lundqvist ja urakoitsijana toimi Vivola Oy. Kohteessa käytetty CLT oli Stora Enson valmistamaa.

Kuva 59. Villa Lycka viimeistelyvaiheessa.

Asiakas oli tyytyväinen urituksen tuloksiin ja ilmeeseen (kuva 60). Kohteen urat olivat 2,5mm leveitä ja 12mm syviä. Levyt pintakäsiteltiin urituksen jälkeen kuultavalla valkoisella pintakäsittelyllä. Uritus ei onnistunut poistamaan halkeilua paneeleista täysin, mutta yleisesti arvioiden halkeamien korostuminen seinäpinnoissa vähenee urituksen ansiosta. Uritus lisää seinäpintoihin ilmettä, samaan tapaan kuin ryhdikäs tapetti.

Kuva 60. Uritettua seinää talon pystytysvaiheessa.

Urakoitsija arvioi, että uritusten tekeminen käsisirkkelillä on varteenotettava vaihtoehto. Joitakin uria jouduttiin käsin jatkamaan työmaalla (kuva 61), koska urituksen suorittaneella yrityksellä ei ollut yksityiskohtaista tietoa urituksen toteuttamisesta. Suunnittelun tärkeys korostuu ja uritus on otettava huomioon elementoinnissa, jotta vastaavilta ongelmilta vältytään.

Kuva 61. Kesken jäänyt ura.

Tiedon kulku urituksen suorittajan, asiakkaan ja urakoitsijan välillä oli haasteellista, ja urituksen suunnittelu vaatii harjaantumista kaikilta osapuolilta. Urituksen jatkuvuuden varmistaminen eri rakenneosien välillä on merkittävä haaste, kuten kuvasta 62 nähdään.

Kuva 62. Urituksen lievä epäjatkuvuus katto ja seinäelementtien välillä.

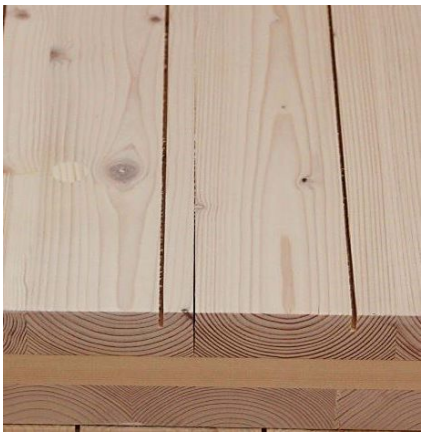
Uritus työstettiin suurehkolla pyörösahanterällä, jolloin uraa ei voinut siististi katkaista kesken elementin. Tästä johtuen joissain yksityiskohdissa uritus näkyy sellaisista kohdista, joista sen ei alun perin suunniteltu näkyvän. Tällaisia kohtia on esitetty kuvissa 63 ja 64.

Kuva 63. Uran päätepisteen huomioonottaminen korostuu yksityiskohdissa.

Kuva 64. Urituksen näkyminen väärissä kohdissa.

Koska uritus toteutettiin erillisellä CNC-työstöllä vakioetenemällä (100mm), urat eivät osuneet optimisijaintiin lamellien väliseen liimasaumaan siitä syystä, että pintalamellien

leveys vaihtelee. Tämän takia uritus ei toiminut parhaalla mahdollisella tavalla ja joissain tapauksissa halkeamia esiintyi näkyvillä paikoilla. Kuvassa 65 nähdään kahden pintalamellin väliseen saumaan syntynyt halkeama.



Kuva 65. Liimasauman kohdalle syntynyt halkeama.

Case-kohteessa ei tulla toteuttamaan kattavaa seurantatutkimusta urituksen vaikutuksista, mutta pilottihanke tuotti arvokasta tietoa ja kokemusta kaikille hankkeen osapuolille. Vaikka uritus lisäsi työmäärää, voidaan sen todeta silti olleen vaivan ja lisääntyneiden kustannusten arvoinen lisäys talon arkkitehtuuriin ja toiminnallisuuteen. Kokemusten perusteella urituskokeiluja kohteissa voidaan jatkaa, jolloin logistinen ketju, tiedonkulku ja urituksen työstö tehostuu ja käytännöt vakiintuvat.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä kappaleessa esitetään tulosten pohjalta johdetut päätelmät työn tuloksista. Johtopäätökset on ryhmitelty eri näkökulmien perusteella, ja päätelmissä hyödynnetään ja yhdistellään kokeellisen osuuden tuloksia kirjallisuusosion tutkimustiedon kanssa. Lopussa johdetaan suositukset urituksen suhteen koetulosten perusteella ja esitetään jatkotutkimuskohteita.

9.1 Huomiot urituskokeiden tuloksista ja onnistumisesta

Diplomityön kokeellisessa osiossa testattiin pinnan urittamista kolmella uramuodolla: suora ura, vino ura ja pyöristetty laakea ura. Havaintoina CLT-pinnan halkeilusta voidaan todeta, että vinoon uritettujen kappaleiden tapauksessa halkeilu näyttäisi rajoittuvan erittäin tehokkaasti uran pohjalle näkymättömiin. Hyvin harvassa tapauksessa halkeilua esiintyi lamellien keskellä, ja siinäkin tapauksessa halkeamat olivat mitättömiä.

Tuloksista huomattiin, että suoran uran tapauksessa halkeamatunnusluvun keskiarvo suurin piirtein puolittuu, kun uran pohjalle syntyvien halkeamien vaikutus mitätöidään. Vinon uran tapauksessa vaikutus on paljon voimakkaampi, jopa kymmenkertainen. Kääntäen tämä tarkoittaa sitä, että suora ura ei pysty estämään halkeamien syntyä urien ulkopuolelle yhtä tehokkaasti.

Suorien urien tapauksessa tulokset viittaavat siihen, että joko pintalamellin kuivuminen kiihtyy urituksen ansiosta tai uritus heikentää liimasaumaa niin paljon, että halkeiluilmiö itsessään kiihtyy. Näköestevaikutuksen ansiosta voidaan kuitenkin todeta, että uritettu pinta on esteettiseltä ilmeeltään aina urittamatonta parempi vaihtoehto.

Kokeet suoritettiin esikokeiden perusteella hyväksi havaituilla koejärjestelyillä. Esikokeissa hyödynnetty koemateriaali oli hankittu koulun ja Vivola Oy:n ylijäämistä. Todettakoon, että esikokeissa hyödynnetty materiaali halkeili huomattavasti enemmän verrattuna varsinaiseen koemateriaaliin, jota tutkittiin lopullisissa mittauksissa. Kuvassa 66 on vertailua kahdesta edustavasta koekappaleesta kummastakin koesarjasta, ja kuvasta nähdään selkeästi että esikoekappaleisiin syntyi voimakkaampaa halkeilua urittamattomiin pintoihin. Lopullisiin mittauksiin saatu CLT ei vaikuttanut halkeilevan yhtä aggressiivisesti kuivauskokeiden aikana, eikä koejärjestelyä enää voitu muokata.

Syy koemateriaalin alhaiseen halkeilutaipumukseen saattaa selittyä sillä, että varsinaiseen koemateriaaliin oli koeluontoisesti ladottu Effex-liimalevytausta toisen puolen pintakerrokseksi, jolloin koekappaleet eivät olleet enää keskikerroksen suhteen symmetrisiä ja jännitysjakauma kappaleessa muuttui. Tämä on merkittävä tulos, sillä jo ennestään on tiedetty, että liimalaminaattien tulisi olla symmetrisiä keskikerroksensa suhteen. Effex-

pintakerros halkeili erittäin voimakkaasti, mikä viittaa siihen, että halkeilun synnyttävät poikittaiset vetojännitykset purkautuivat Effex-lamellin puoleisella lappeella, ennen kuin jännitykset kasvoivat riittävän suuriksi perinteisellä CLT-lappeella.

Kuva 66. Kuvia koekappaleista. Ylävasemmalta myötäpäivään lukien: varsinaisen koesarjan urittamaton kappale CLT-pintalamellilla kuivaussyklin jälkeen, esikoesarjan urittamaton kappale CLT-pintalamellila kuivaussyklin jälkeen, varsinaisen koesarjan suoraurainen koekappale kuivauksen jälkeen, varsinaisen koesarjan vinourainen koekappale kuivauksen jälkeen. Huom. esikoesarjan ja varsinaisen koesarjan kappaleiden eroava halkeilutaipumus.

Suoralla uralla uritettujen koekappaleiden halkeamakäyttäytyminen muistutti läheisesti esikoesarjassa tutkittuja uritettuja koekappaleita. Kenties syynä oli se, että heikentynyt liimasauma oli lujuudeltaan yhdenvertaisempi suhteessa Effex-pintakerrokseen, jolloin halkeamataipumus muuttui. Tämä viittaisi siihen, että epäsymmetrinen pintalamellirakenne koekappaleissa (Effex-CLT) saattaisi olla todennäköinen syy sille, miksi urittamattomat kontrollikappaleet varsinaisessa koesarjassa eivät halkeilleet CLT-pinnaltaan niin paljon kuin esikokeiden perusteella oli odotettavissa.

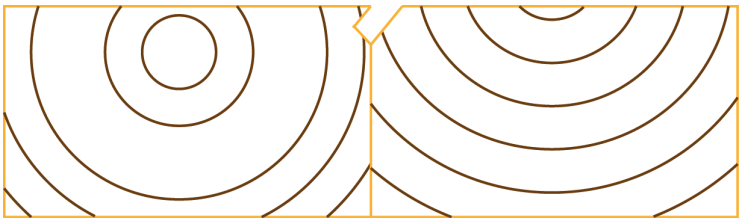
Kokeiden perusteella pyöristettyjä ja laakeita uria olisi vältettävä, sillä ne eivät tarjoa suoran uran kaltaista näköestettä halkeilulle, mutta halkeilutaipumus niillä on vähintään yhtä voimakas kuin urittamattomalla pinnalla. Tulokset itse asiassa viittaisivat siihen, että pyöreällä uralla toteutettu pinta saattaisi halkeilla jopa enemmän kuin urittamaton pinta. Tämä on kuitenkin vielä tilastollisesti epävarma päätelmä, mutta riski on olemassa.

Tämän työn koejärjestelyistä voidaan mainita, että jatkossa voitaisiin varmistaa pintakäsittelyn vaikutus halkeiluun sulkemalla koekappaleiden päädyt. Tässä tapauksessa on kuitenkin varauduttava erittäin pitkiin koesykleihin. Lisäksi, mikäli koesyklejä on mahdollista venyttää, voitaisiin syklin aikana tapahtuvaa kosteusvaihtelua kasvattaa merkittävästi ja tasaannutusjaksot toteuttaa täydellisinä. Tällainen ratkaisu olisi toteutettavissa esimerkiksi automatisoidulla sääkaapilla.

9.2 Urituksen hyödyt ja toiminta CLT:n halkeilun hallinnassa

Työn kokeellisessa osiossa tutkittiin kolme yksinkertaista perusratkaisua uritukseen. Mielenkiintoisimpana tuloksena nostettakoon esille pinnan suhteen vinon uran toiminta, sillä koetulosten perusteella se kykeni estämään CLT:n halkeilua merkittävästi. Mittakaavavaikutusten vuoksi tulos tulisi vahvistaa suurella otoskoolla ja suurilla koekappaleilla, mutta alustavat tulokset ovat lupaavia.

Tulokselle ei löydy yksittäistä tyhjentävää selitystä. Voidaan esittää, että vino ura poistaa lamellien välistä jännitettä, siten että syykuvioiden yhtymäkohtaan ei synny yhtä jyrkkää syysuuntamuutosta kuin muissa tapauksissa. Kiistatta vino ura hyötyy myös terävästä uran alareunasta ja vinon uritustavan synnyttämästä ”lipasta”, joka peittää osan halkeamailmiöstä alleen (Kuva 67). Tulokset viittaisivat siihen, että myös optisen vaikutuksen lisäksi, vinolla uralla pystytään vaikuttamaan pintalamellin vetojännitysjakaumaan. Ilmiön syvempi ymmärtäminen edellyttäisi tarkoitukseen erityisesti muokattua koejärjestelyä, jossa uran toimintaa seurattaisiin jatkuvalla mittaus- ja kuvantamistekniikalla. Toistaiseksi voidaan vain esittää hypoteesi syysuuntaerojen lievenemisen aiheuttamasta jännitysten uudelleenjakaantumisesta lamellisaumassa.



Kuva 67. Vino ura lamellien saumassa.

Suoran uran toiminta ei ollut itse halkeilutaipumuksen kannalta tehokasta. Johtuen koekappaleiden epäsymmetrisestä lamellirakenteesta, ei voida olla täysin varmoja suoran uran

todellisesta toiminnasta suhteessa urittamattomaan pintaan. Näyttäisi siltä, että liimasauman kohdalta poistettu materiaali yhdessä lisääntyneen haihdutuspinta-alan kanssa saavat aikaan absoluuttisesti tarkasteltuna suurempaa halkeilutaipumusta pinnassa. On kuitenkin todettava, että halkeamat keskittyivät suurella todennäköisyydellä uran pohjalle, jolloin uran geometrian ansiosta halkeamien havaitseminen käyttöympäristössä olisi vaikeampaa. Voidaan todeta, että uritetun pinnan ilme on kaikissa tapauksissa parempi kuin urittamattoman pinnan.

Urituksen hyödyt CLT:n tapauksessa ovat jakautuneet. Toisaalta uritus voidaan nähdä pelkkänä pintakäsittelyvaihtoehtona, joka tuo rakenteille ilmettä ja struktuuria, ja toisaalta taas urituksella voidaan nähdä useita funktionaalisia tarkoituksia, kuten halkeilun hillitseminen, akustiikan parantaminen ja ilmankosteuden ja puun välisen reagointipinta-alan kasvattaminen. Kaikissa tapauksissa on huomio kiinnitettävä pintaan, sillä pinnan tuoma arvonlisäys ja asiakkaan maksama hinta rakenneratkaisusta voidaan perustella usein pelkästään pinnan ulkonäöllä ja ominaisuuksilla. Mikäli uritetun pinnan kustannusrakenne saadaan kannattavaksi, tuottaa se myös asiakkaalle etuja lyhentyneenä rakennusaikana ja pintakäsittelytarpeen vähentymisenä. Uritettu pinta näyttää arvokkaalta ja erilaiselta kuin muut pintamateriaalit, ja sen monipuolinen integroitunut toiminnallisuus on helppo hyödyntää tuotteen markkinoinnissa asiakkaalle. Tuotannollisesti katsoen pinnan tuottamisen materiaalikustannus on erittäin pieni, mutta urittamisen työstökustannus tulisi arvioida vielä erikseen tuotannonsuunnittelussa.

9.3 Halkeilun alkuperä ja muut keinot halkeilun vähentämiseksi

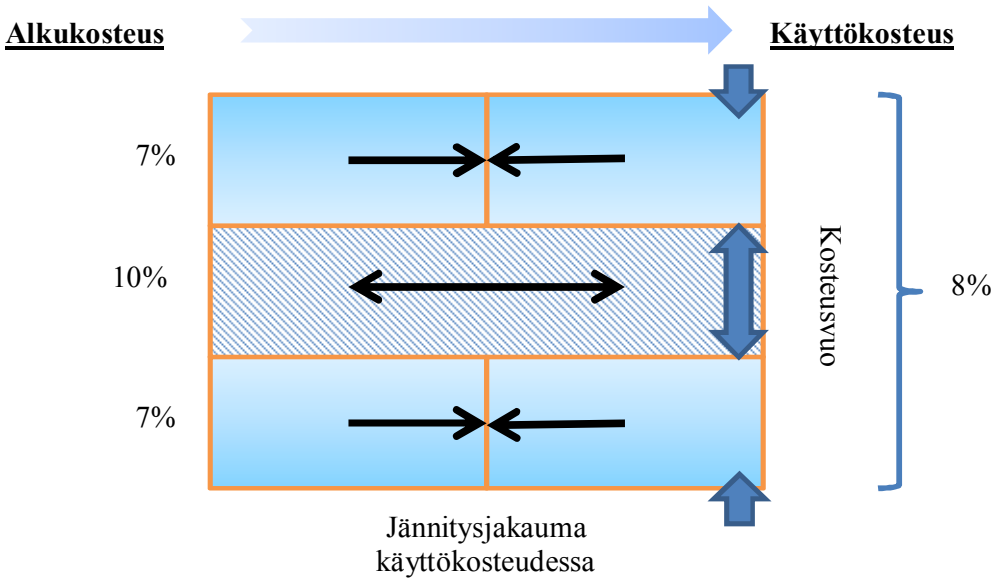
CLT:n tapauksessa monimutkainen halkeiluilmiö voidaan kiteyttää yksinkertaistettuun halkeamatapaukseen. Perimmillään halkeilun esiintymisessä on kyse siitä, että lamellin sisäisen tai lamellien välisen poikittaisen vetolujuuden arvo ylittyy. Tämä ilmiö korostuu erityisesti kahden vierekkäisen lamellin välisessä rajapinnassa, jossa syysuuntakuvio muuttuu voimakkaasti pienellä alueella (ks. Kuva 69) ja josta syntyy jännityskeskittymä. Lamellin keskelle syntyvät halkeamat ovat harvinaisempia, ja niitä havaitaan kun poikittainen vetolujuus on ylittynyt lamellisauman sijaan lamellin keskellä. Halkeaman synty johtuu kuitujen pituussuuntaisesta erottumisesta koko levyn jännitysten myötävaikutuksesta. Näiden jännitysten alkuperä on summa useammasta tekijästä.

CLT-aihiossa olevat jännitykset pyrkivät vapautumaan levyn puristamisen jälkeen ja levyn käyttökohteessa. Jännitysten purkautuminen aiheuttaa pahimmassa tapauksessa muodonmuutoksia koko levyyn, mutta usein jännitysten tasaantuminen havaitaan halkeiluna levyn pinnassa. Jännitysjakauma levyn sisällä muuttuu jatkuvasti johtuen rakennuksen muuttuvasta kuormituksesta, sekä puun hygroskooppisesta luonteesta yhdistettynä rakennuksen alati vaihteleviin kosteusolosuhteisiin.

Kun ajatellaan CLT-levyyn syntyviä jännityksiä, voidaan esittää, että osittain halkeamakäyttäytymisen liipaisimena toimii valmistuksen ja puristuksen aikana syntyneet jäännösjännitykset, kun epätäydelliset sahatavarakappaleet on puristuksen aikana pakotettu CLT-levyaihion muotoon. Myöhemmin levyssä olevat jäännösjännitykset purkaantuvat jännityskeskittymien kohdalla, jotka toimivat otollisena kohtana halkeilun käynnistymiselle kosteusrasitusten myötä. Jotta valmistuksen jäännösjännityksiä voitaisiin vähentää, tulisi valmistuksessa kiinnittää huomiota lamellien laatuun ja niiden esikäsittelyvaiheiden sekä lajittelun toteutukseen. Lamellien muotovirheet, kuten vinosyisyys ja sahatavaravääristymät kuten lenkous ja vääryys, kertaantuvat liimalaminaattirakenteessa, jolloin levyn halkeilutaipumus lisääntyy.

Toisaalta on pohdittava, voidaanko lamellien kuivausrutiinia muokkaamalla saavuttaa kustannustehokkaita keinoja lamellien muotovääristymien ja sisäisten kosteusjakaumien loiventamiseksi, jolloin myös levyyn päätyvät jäännösjännitykset olisivat vähäisempiä. Myös aihion jälkikäsittelyllä voitaisiin vaikuttaa levyn jännitysjakaumaan välittömästi puristamisen jälkeen, joko hyödyntämällä puristuksen aikaista lämmitystä/höyrytystä tai suorittamalla aihion höyrytys/lämmitys puristuksen jälkeen esimerkiksi mikroaalloilla. CLT-valmistuksessa yleisesti käytössä olevat yksikomponenttiset polyuretaaniliimat ovat jäännösjännitysten takia ongelmallisia, sillä kuivuminen ei edellytä lämpöä, toisin kuin esimerkiksi ureahartsit. Kuumapuristuksella voisi saavuttaa etua jännitysten tasaantumisen kannalta.

Kuivaustekniikkaa säätämällä voitaisiin myös vähentää CLT:n pintahalkeilua siten, että levyn ladontavaiheessa levyyn synnytetään keinotekoinen kosteusgradientti. Tällöin pintalamellit ladottaisiin kuivemmasta sahatavarasta kuin keskilamellit. Näin ollen, puristuksen jälkeinen kuivuminen ja tasaantuminen saisivat aikaan puristavia jännityksiä levyn pinnassa, kun taas keskikerrosten puristusjännitykset hellittävät. Kuva 68 selventää esimerkillä kyseisen ratkaisun toimintaa. Puristetut pintalamellit eivät pääse halkeamaan, kunhan levyyn ei synny mittavia vetojännityksiä käytön aikana. Vastaavaa ratkaisua on kokeiltu kirjallisuudessa onnistuneesti.



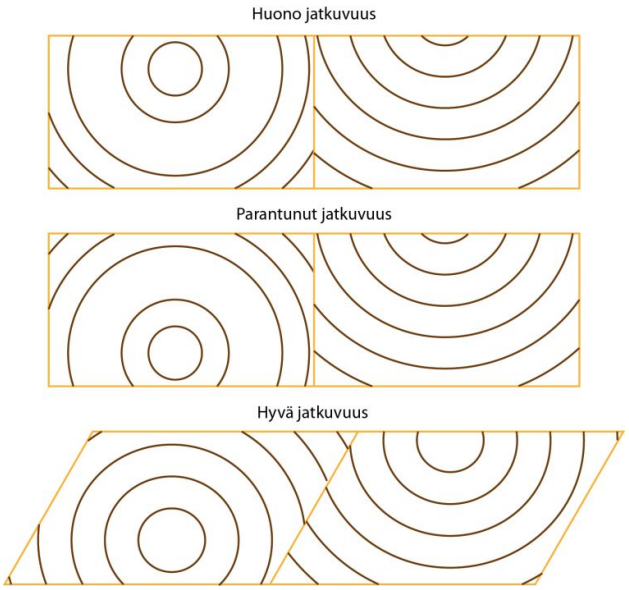
Kuva 68. Ladonnassa synnytetyn kosteusgradientin toiminta jännitysjakauman muokkaamisessa.

Yhtälailla vastaavaa ratkaisua voitaisiin hyödyntää siinä määrin, että pintalamellien kuivausta jatkettaisiin kuusiraaka-aineella niin kauan, että solukko aspiroituu merkittävästi. Tällöin sahatavaran kosteusaffiniteetti pienenee verrattuna tavalliseen sahatavaraan, joka puolestaan edistäisi pintalamellin mittapysyvyyttä, vaikkakin puun hengittävyyden kustannuksella.

Kosteustarkastelu täytyy ulottaa myös logistiikkaan ja työmaakosteudenhallintaan, sillä halkeilun kannalta on äärimmäisen tärkeää asentaa CLT mahdollisimman nopeasti lopulliseen kohteeseensa, ja suojata säältä ja kosteudelta. Mitä pidempään rakennusvaipan sulkeminen kestää, sitä pahemmaksi halkeilutaipumus CLT-rakenteissa kasvaa.

CLT:tä voidaan valmistaa siten, että lamellit liimataan toisiinsa myös syrjältään, jolloin halkeamakuviosta tulee satunnainen. Toisaalta tämä edellyttää täydellistä onnistumista syrjäliimauksessa ja koemateriaalissakin halkeamat esiintyivät usein lamellien välisessä saumassa, vaikka materiaali oli syrjäliimattua. Syrjäliimauksen tarpeellisuutta tulee arvioida, sillä syrjäliimaamaton CLT synnyttää lähes uritusta muistuttavan halkeamakuvion, kun lamellien välinen sauma aukeaa. Ajatusta voidaan viedä myös eteenpäin siten, että tulisi tutkia voidaanko toista pintalapetta käyttää ns. uhrautuvana lamellikerroksena halkeilun suhteen. Tällöin toisen puolen pintalamellit toteutettaisiin ilman syrjäliimausta ja teoriassa halkeilu keskittyisi sinne. Ajatusta tukee koekappaleissa käytetty epäsymmetrinen pintalamellirakenne, jonka myötä saatiin viitteitä keskimääräistä alhaisemmasta halkeilutaipumuksesta tavallisella CLT-pinnalla, kun taustapuoli oli toteutettu herkästi halkeilevalla Effex-paneelilla. Toistaiseksi koetulokset eivät tue menettelyä, jossa CLT-levyn pintakerros korvattaisiin liimalevytyyppisellä sauvarakenteella, jonka poikkileikkauksen syysuunta on pääosin lappeen normaalin suuntainen, kuten Effexin tapauksessa.

Ladonnassa olisi mahdollisuus vaikuttaa pinnan halkeilu- ja muodonmuutoskäyttäytymiseen valmistamalla pintakerros vuorottelevalla sydänpuusuunnalla, kuten liimalevyteollisuudessa on tapana. Tämä tuotantotavan muutos saattaisi olla erittäin kustannustehokas tapa pintahalkeilun vähentämiseksi. Lisäksi olisi mielenkiintoista kokeilla erimuotoisia lamelleja, kuten esimerkiksi vinoneliön muotoista lamellia. Vierekkäin ladottujen vinoneliölamellien liimasauman kohdalle syntyvä syysuunnan vaihtuminen olisi loivempaa kuin suoraan sahatuilla (Kuva 69).



Kuva 69. Ladonnan ja lamellimuodon vaikutus syysuunnan jatkuvuuteen lamellisaumassa.

CLT rakenteen muokkaus halkeilutaipumuksen kannalta saattaisi synnyttää mielenkiintoisia tuotevariaatioita. Työn kirjallisuusosiossa esitettiin tutkimustuloksia, joissa todettiin, että keskilamellien rakenteella on merkittävä vaikutus pinnan halkeiluun. Leikkauskestävyydeltään heikot ja pehmeät keskilamellirakenteet saivat aikaan leikkausmurtumia keskilamellissa kosteuselämisen myötä, mutta samalla pintojen halkeilun havaittiin vähenevän. Vastaavaa ilmiötä voitaisiin kenties hyödyntää kokeilemalla keskilamellien urittamista, kuten joissakin CLT-tuotteissa on tehty. Näiden niin sanottujen tappourien (*stress relieves*) voidaan kuvitella toimivan levyn jännitysjakauman tasaajana. Samalla tutkimustieto tukee ajatusta, että muokattujen lamellien synnyttämät raot rakenteessa edistäisivät materiaalin lämmöneristävyyttä. Muokatun keskilamellin vaikutus levyn mekaaninen toimintaan tulisi kuitenkin varmistaa koestuksin.

9.4 CLT materiaaliominaisuuksien ja halkeiluilmiön tutkimuksen merkittävyys

CLT:n halkeilukäyttäytymisen tunteminen ja halkeilutaipumuksen estäminen on ensiarvoisen tärkeää, jotta CLT:tä voidaan hyödyntää näkyvänä rakenneosana rakennetussa ym-

päristössä. Toistaiseksi CLT voidaan jättää vain rajoitetusti näkyviin paloturvallisuussäädösten vuoksi, mutta jatkossa käytäntö tullee yleistymään. Halkeiluilmiön syvällinen tutkimus ja tuntemus ovat vielä vähäisiä, ja tähän työhön verrattavia tutkimuksia ei löydy kirjallisuudesta. Suurin osa tutkimuksesta keskittyy CLT-komponenttien rakenteelliseen toimintaan ja liitostekniikkaan, ei niinkään materiaalitekniikkaan. Tuotteen luonteesta johtuen, muiden puurakenteisten rakennekomponenttien kosteusteknisestä tutkimuksesta osa voidaan yleistää koskemaan myös CLT:tä, mutta myös kohdennettua tutkimusta kiintopuun tapauksessa on suoritettu. Tutkimukset ovat vahvistaneet CLT:n toimivan turvallisesti rakennusfysiikan kannalta, mutta jatkossa rakennusfysikaalinen toiminta täytyy yhdistää rakennekomponenttien käytönaikaisen ja koko elinkaaren yli yltävään toimintaan mm. halkeilun ja pintakäsittelyn osalta.

CLT:n etu muihin rakennejärjestelmiin on korkea esivalmistus- ja integraatioaste. Rakenteellisten ongelmien ylikorostuminen tutkimuksessa voi johtaa siihen, että uuden rakennustuotteen markkinat kuihtuvat, ennen kuin rakenneratkaisuja päästään edes käytännössä toteuttamaan. Useimmiten tilaajan, asiakkaan tai arkkitehdin mielenkiintona ei ole niinkään rakenteen rakennustekninen toimivuus vaan esteettinen tai terveydellinen tai muu funktionaalinen arvonlisäys. Rakenneratkaisujen tulisi ainoastaan tukea näiden ominaisuuksien mahdollistamista erilaisissa rakennuksissa, sillä pinnanlaadut ja toiminnalliset ominaisuudet viimekädessä oikeuttavat kustannusvaikutukset asiakkaan kannalta.

9.5 CLT:n pintakäsittely ja urituksen vaikutus

Tutkimusnäyttö osoittaa vahvasti, että puunkäytön ja hengittävän pintakäsittelyn hyödyntäminen sisätiloissa pystyy tuottamaan aistittavia ja konkreettisia hyötyjä sisäilmanlaatuun. Tästä syystä tutkimuspanoksia olisi kannattavaa lisätä erityisesti CLT:lle tarkoitettujen pintakäsittelyaineiden ja -järjestelmien kehittämiseen, jolloin voidaan osoittaa, että CLT:n mukanaan tuomat terveydelliset hyödyt voidaan myös toteuttaa kohteeseen erityisesti kehitetyllä pintakäsittelyratkaisulla. Tuotteen funktionaalisuuden mahdollistava pintakäsittelyaine olisi vahva markkinointiargumentti yhdessä esteettisten perusteiden rinnalla, sillä kuluttajat haluavat hyödyntää uuden rakennusmateriaalin kaikki edut. Tiedostavat kuluttajat omaksuisivat nopeasti pintakäsittelyn ja massiivipuupinta-alan mahdollisuudet edistää asunnon ja asumisen terveellisyyttä.

Mikäli CLT:n yhteydessä halutaan käyttää peittävää pintakäsittelyä, on työn tulosten perusteella suositeltavaa joko peittää CLT erillisellä rakennuslevyllä tai käyttää tehokasta urituskeinoa (esimerkiksi työssä tutkittu vino ura). Peittävällä pintakäsittelyllä on tutkimusten mukaan mahdollisuus vähentää puun kosteuselämistä, mikä toisaalta vähentää pinnan halkeilutaipumusta, vaikkei tätä vaikutusta tämän työn koejärjestelyllä voitukaan vahvistaa. Usein kuitenkin asiakas on halukas jättämään puun luontaisen syykuvion näky-

viin, jolloin kuultokäsittelyt ovat yleisin ratkaisu. Tässä tapauksessa halkeilun erottuminen pinnasta vähenee ja samalla pintakäsittelyn hengittävyydelle on olemassa paremmat edellytykset.

CLT edellyttää massiivisena puutuotteena suurta kapasiteettia pintakäsittelylaitteistolta, mikäli pintakäsittely halutaan suorittaa teollisesti valvotuissa oloissa, eikä perinteisesti työmaalla. Tasaisen pinnan käsittely onnistuu perinteisin menetelmin ilman lisäkustannuksia, mutta uritetun pinnan tapauksessa voidaan tarvita monimutkaisempaa pintakäsittelylinjaa. Täydellinen ja kattava pintakäsittely uritetulla pinnalla saattaisi edellyttää yhdistelmän useammasta käsittelytavasta, jossa esimerkiksi urat käsitellään ensin ruiskuilla ja urittamaton osuus levyn pinnasta maalataan telakoneella. Työn kokeellisessa osuudessa testattiin maaliruiskun soveltuvuutta uritettujen testikappaleiden pintakäsittelyssä, eikä ruiskumaalaukselle havaittu esteitä.

Keittiökalusteteollisuudessa kappaleet ovat yhtälailla levymäisiä ja uritettuja, vaikkakin pienempiä. Tikkurilan (2008, s.26) mukaan ruiskuautomaatti on paras vaihtoehto niiden käsittelyssä, mutta on otettava huomioon CLT:n tuotantovolyymin tapauksessa, että ruiskumaalauksessa on suuri hävikki ja siksi se on kustannustehotonta. Valukoneen käyttö saattaisi tulla kysymykseen, mutta urasyvyydet ja reunojen profiilit eivät yleensä ole yhteensopivia valukonekäsittelyn kanssa. Telakone ja ruiskuautomaattikäsittelyn yhdistelmä aiheuttaa myös haasteensa, sillä telakone pyrkisi pursottamaan maalia urien reunoille.

9.6 CLT:n toiminta sisäilmastossa

CLT:llä on erityinen asema rakennustuotteiden joukossa siksi, että sen sisältämä puun määrä on niin suuri. Puun lämpötekniset ominaisuudet ovat erittäin poikkeavat suhteessa muihin rakennusmateriaaleihin ja –ratkaisuihin, ja työn kirjallisuusosiossa osoitettiin, että näitä ominaisuuksia hyödyntämällä voidaan saavuttaa energiansäästöjä. Säästöt kuitenkin edellyttävät yhteistoimintaa talotekniikan kanssa, jonka jälkeen ominaisuutta voitaisiin markkinoida CLT-talojen etuna. Myös puun huoneilman kosteutta tasaavat ja terveyttä edistävät vaikutukset mahdollistuvat mikäli CLT rakenteet voidaan jättää näkyviin ilman sulkevaa pintakäsittelyä.

Energiansäästö CLT:n lämmönvarastointia hyödyntämällä ja ilmanvaihtoa älykkäästi ohjaamalla mahdollistaa sen, että kun asunnossa ei oleilla, voidaan ilmanvaihtoa ja lämmitystä automaattisesti vähentää. Tällöin CLT-rakenteisiin varautunut lämpö ja kosteus pyrkivät tasaamaan huoneilman lämpötilaa siinä määrin, ettei rakennuksen sisäilman lämpötila laske epämiellyttävän alhaiseksi. Myös kesällä voidaan hyödyntää termistä massaa siten, että huoneiston lämpötilaa pyritään laskemaan ennen nukkumaanmenoa ja nukkumisen aikana, jolloin sisäilma pysyy ulkoilmaa viileämpänä pidempään kuuman päivän aikana. Ongelman tässä aiheuttaa sisäilman laadun tarkkailu, sillä se tulisi toteuttaa siten, ettei

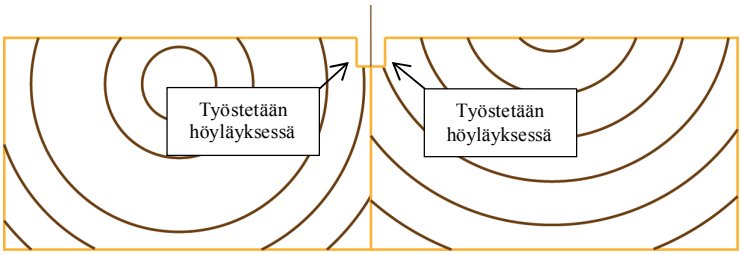
esimerkiksi huoneilman hiilidioksidipitoisuus pääse kasvamaan liian suureksi tai huoneilman kosteus pääse laskemaan liian alas toistuvasti. Myös huoneilman lisäkostutusta voitaisiin harkita, mikäli anturoinnin tuottama mittaustieto on riittävän luotettavaa.

9.7 Suositukset ja ehdotukset urituksen suhteen

Suora ura ei kokeiden perusteella vaikuttaisi vähentävän halkeilua, mutta tulokset osoittivat, että mikäli uran geometrian synnyttämä näköeste huomioidaan, on tuloksena esteettisesti parempaa pintaa verrattuna urittamattomaan verrokkiin. Vinon uran toteuttamista voidaan suositella koetulosten perusteella lähes varauksetta, sillä sen katsottiin vähentävän halkeilua merkittävissä määrin kaikilla mittareilla arvioituna.

Suoran uran toteutus tehdasmittakaavassa voitaisiin ainakin L-paneelin (pintalamellit pitkittäisuuntaan) tapauksessa työstää puristuksen jälkeisellä rispasahalla, jolloin urituksen kustannusvaikutus olisi erittäin pieni. C-paneelilla (pintalamellit poikkisuuntaan) vastaava ratkaisu ei onnistu, ja silloin uritus jouduttaisiin työstämään esimerkiksi CNC:llä ura kerrallaan jolloin kustannusvaikutus suurenee. Myös vinon uran työstäminen täydellisesti lamellien välisen liimasauman kohdalle edellyttää joko CNC-työstöä, tai erityisjyrsintäkalustoa, eivätkä nämä ratkaisut ole helposti toteutettavissa tehokkaasti. Jos uritusratkaisuja aletaan tuotannossa toteuttaa, on otettava huomioon, että urittaminen CNC:llä on työlästä. Urituksen ohjelmointi on tehtävä elementtikohtaisesti, mikäli uritusta ei suoriteta yksinkertaisesti vakioetenemällä. Tällöin kuitenkin uritus ei osu lamellien väliseen liimasaumaan, ja sen vaikutus halkeilun estämiseksi vähenee.

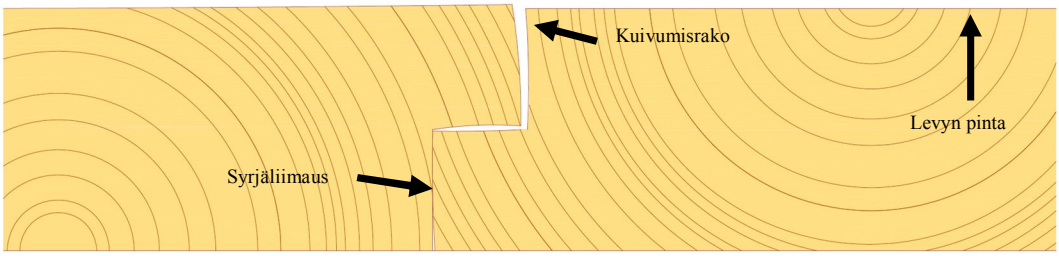
Mikäli olisi mahdollista muokata lamelleja ennen latomista, voitaisiin suora ura toteuttaa tehokkaasti siten, että uran puolikas työstettäisiin muotohöylällä kumpaankin vierekkäiseen lamelliin. Tällöin puristuksen jälkeen lopputulos vastaisi jälkikäteen työstettyä uraa. Muotohöyläys voitaisiin yhdistää esimerkiksi sormijatkosasemaan. Ajatusta havainnollistaa kuva 70.



Kuva 70. Lamelliin höyläyksen yhteydessä työstettävä uran puolikas.

Vaihtoehtoisesti voitaisiin kokeilla myös ratkaisua, jossa lamellit työstetään yksinkertaisiksi L-ponteiksi. Taattua keinoa halkeamien välttämiselle on lähes mahdoton kehittää, mutta halkeaman piilottaminen rakenteessa on varteenotettava ratkaisu. Vastaavista kokeiluista ei löytynyt viitteitä kirjallisuudesta. Lamellimuoto voitaisiin toteuttaa siten, että lii-

masauma jää L-pontin pohjalle ja mahdollinen halkeama jää pontin huulen alle peittoon. Kosteusliikkeet synnyttäisivät kuivumisrakojen ansiosta säännöllisen urakuvion paneelin pintaan. Ajatusta selventää kuva 71. L-pontin huuli voitaisiin myös jättää tarkoituksella lyhyeksi, jolloin myös uritus syntyisi samalla.



Kuva 71. Pintalamellirakenne, jossa lamellin syrjä on L-pontin muotoinen.

Urituksen ei todettu synnyttävän haittaa pintakäsittelyssä, jos pintakäsittely toteutettiin ruiskumaalauksella. On todennäköistä, että mikäli pintakäsittely toteutettaisiin muilla menetelmillä kuten tela- tai valukonepinnoituksella, urat synnyttäisivät virheitä pintakäsittelyyn. Vaikka pintakäsittely on tärkeä osa näkyvän CLT-komponentin funktiota, voidaan myös kyseenalaistaa - onko urien maalaaminen kauttaaltaan edes välttämätöntä? Vaihtoehtoinen toteutustapa on siis se, että pintakäsittely suoritetaan perinteisin menetelmin urittamattomalle CLT-pinnalle, joka uritetaan myöhemmin pintakäsittelyn jälkeen. Tämä kuitenkin edellyttää, että urat ovat verrattain kapeita, jotta pinta säilyisi toimivana esimerkiksi likaantumisen suhteen. Toisekseen, tämä menettelytapa ei tule kysymykseen, mikäli uritus on integroitu pintalamelleihin jo levyn ladontavaiheessa, esimerkiksi aikaisemmin ehdotetulla tavalla, jossa urat on työstetty pintalamellien syrjään höyläyksessä ennen liimausta.

Voidaan myös pohtia, olisiko joissain tapauksissa kannattavaa pinnoittaa pintalamellit ennen ladontaa. Lamelleihin toteutettu valkoinen pohjakäsittely saattaisi toimia kosteussuojana levyjen kuljetuksen ajan sekä pohjamaalina työmaapintakäsittelyssä. Menetelmällä voitaisiin saavuttaa tuotteelle arvonlisäystä.

Mikäli CLT:n valmistukseen on mahdollista kiinnittää kehityspanoksia, olisi urituksen kannalta edullista mikäli elementtisuunnittelu ja tuotanto voitaisiin jatkossa toteuttaa lamellitasolla. Toisinsanoin, elementtitilaus ja tuotanto suoritettaisiin yhden lamellin tarkkuudella, jolloin elementointiin tuotetut kuvat toimisivat tarkkoina pohjina myös urituksen CNC-työstölle. Ajatus ei ole mahdoton, sillä esimerkiksi tiiliseinät suunnitellaan ja toteutetaan jo nyt yhden tiilen tarkkuudella.

Pintakäsittelyaineiden valintaan on paneuduttava CLT:n tapauksessa, mikäli halutaan tarjota suurin mahdollinen hyöty loppukohteessa ja perustella tuotteen hintaa. Yhteistyö pintakäsittelyainevalmistajan kanssa erityisesti CLT:n tarpeisiin kehitetyn maalin kehittämiseksi saattaisi olla hedelmällistä. Kehitys ja tutkimuskohteena voisi olla esimerkiksi

CLT:n kannalta kiinnostavat maalin lisäaineet, jotka lisäävät pinnan kosteudenläpäisyä tai optimoivat kosteusaffiniteettiä.

Lamellin syysuunnan kääntäminen pystyyn, kuten Effex-levyn tapauksessa, ei kokeiden perusteella ole järkevää. Effex-pintalamelli osoitti suurempaa halkeilutaipumusta kuin tavallinen CLT-pinta, ja tästä syystä ratkaisua ei voi suositella sovellettavaksi tuotannossa.

Uran toimivuus perustuu suurilta osin sen näköestevaikutukseen. Jos halutaan maksimoida uran näköestevaikutus, voitaisiin urat työstää lohenpyrstön muotoisiksi, jolloin näköeste-kerroin on suurimmillaan. Hankkeessa mukana ollut arkkitehti Heikki Viiri arvioi lohen-pyrstön muotoisen uran ilmeeltään mielenkiintoisimmaksi.

9.8 Suositukset jatkotutkimuksen suhteen

Jatkotutkimuskohteita ilmeni työn edetessä lukuisia. Varteenotettavia tutkimuskohteita olisi esimerkiksi eri lamelligeometriat ja niiden toteutettavuus. Olisi hyödyllistä tutkia, voitaisiinko esimerkiksi ns. ”salmiakin” muotoisilla pintalamelleilla välttää lamellisauman kohdalla ilmenevää halkeilua. Perustapauksista olisi tutkittava lamellikerrosten määrän vaikutus ja kerrosten paksuuden vaikutus pintahalkeiluun.

Lisäksi muotohöyläyksen tarjoamat mahdollisuudet ja niiden vaikutus pinnanlaatuun ja halkeiluun olisi sopiva kokonaisuus tutkittavaksi. Edellä kuvattuja ponttilamelliratkaisuja voitaisiin kehittää merkittävästi eteenpäin, ja urituksen esityöstöä lamelleihin ennen ladontaa voitaisiin kokeilla käytännössä. Myös keskilamellin urittamisen vaikutusta halkeiluun olisi tärkeää tutkia, sillä useat valmistajat ovat päätyneet tähän ratkaisuun. Välilamellien urittamisella saavutettava levyn lämmöneristävyyden lisäys olisi myös helppo tutkia.

Halkeilukäyttäytymistä voisi tutkia tarkemmin yhdistämällä mittauksiin ns. venymä-ruusumittaukset, jolloin jännityksiä pintakerroksessa voitaisiin mitata suoraan, eikä pel-kästään halkeilun perusteella. Myös mikroskooppitarkastelu pinnasta voisi tuoda lisätietoa halkeiluilmiöstä ja kuitujen erottumisesta.

Urituksen mahdollisuudet tuotteen arvonlisäyksessä tulee tutkia vielä pidemmälle, sillä tässä työssä tehtiin vasta perustutkimusta aiheesta. Uramuotoja, rytmitystä, työstöä, kuvi-oita ja parametreja muokkaamalla voidaan saada aikaan uudenlaisia pintoja. Työstötapojen tarkempi tutkiminen voisi mahdollistaa täysin uudenlaisia pintastruktuureja, jotka on mahdollista toteuttaa moderneilla muotohöylillä jo ennen ladontaa. CLT:n tilausvetoinen tuotanto voisi sallia korkean yksilöinnin pintamuokkauksissa ilman suurta tuotannollista lisäkustannusta, ja ratkaisu voitaisiin toteuttaa niin sanotun vakiouritetun tuotteen rinnalla erikoistuotteena. Valmiiden korkealaatuisten komponenttien valmistaminen olisi mahdol-lista tehokkaana sarjatuotantona, jonka tuloksena on valmista halkeilematonta ja eristettyä seinäpintaa.

Tämän työn tulokset tulisi vielä vahvistaa suuremmalla otoskoolla ja symmetrisellä pintalamelliratkaisulla mikäli tavoitellaan ehdotonta varmuutta tuloksista. Samalla saataisiin vahvistus sille, että voitaisiinko taustapuolen pintalamellia hyödyntää uhrautuvana halkeilupintana, jolloin CLT-pinnan halkeilutaipumus vähenisi. Tämän voisi tutkia helposti vaikkapa toteuttamalla toinen pintalape syrjäliimauksella, ja toinen pintalape ilman syrjäliimausta. Ratkaisu on erittäin toteutuskelpoinen myös tuotannossa. Pintalamellin paksuuden vaikutus halkeiluilmiöön olisi myös yksinkertaista tutkia.

Uritusta voitaisiin tutkia edelleen siten, että kokeiltaisiin saadaanko vastaavat vaikutukset aikaiseksi erittäin kapealla (<1-2mm) uralla. Myös lohenpyrstöuran toiminta tulisi tarkistaa ja vinouran toimintaa tutkia edelleen suuremmassa mittakaavassa. Olisi myös mielenkiintoista kokeilla, voisiko pintalamellin taustapuolen urittaminen vaikuttaa halkeilutaipumukseen, jolloin saataisiin tasaista ja halkeilematonta CLT-pintaa, ilman näkyviä uria.

Mikäli uritettua pintaa tavoitellaan tuotettavan myös suuriin rakennuskohteisiin, olisi tarpeen tutkia urituksen vaikutus CLT-pinnan palokäyttäytymiseen. Tämä olisi tutkittavissa niin sanotulla kartiokalorimetrimittauksella.

Pintakäsittelyistä mielenkiintoisinta olisi tutkia esimerkiksi ylipigmentoinnin vaikutus CLT:n kosteuspuskurointikapasiteettiin yhdistettynä urituksen tuomaan lisättyyn vaikutuspinta-alaan. Ylipigmentointi aiheuttanee pinnassa mikrohalkeilua ja yleistä vetokestävyyden alenemista, mutta toisaalta pinnan hengittävyys ja huokoisuus lisääntyisi. Vastaavasti silikaattimaalien hyödyntäminen CLT:n pintakäsittelyssä tulisi tutkia. Pintakäsittelyn toteuttaminen automatisoidulla pintakäsittelylinjalla olisi testattava, ja pintakäsittelyn toteutettavuus valu- ja telakonepinnoituksella selvitettävä.

Vaihtoehtoina pintakäsittelyille voitaisiin CLT:n pinnassa kokeilla modifioitua sahatavaraa, kuten asetyloitua tai furfuroitua puuta, joiden kosteuseläminen on vähäisempää. Mielenkiintoista olisi myös värjätä pintalamellit ennen ladontaa imeyttämällä niihin väriainetta, jolloin erilliseltä pintakäsittelyltä voitaisiin välttyä kokonaan.

Pintalamellikerroksen esijännittäminen puristamalla olisi tutkittava. Syrjältään puristettuja lamelleja voitaisiin myös latoa vierekkäin, jolloin puun luontainen palautuminen puristetusta tilasta synnyttäisi pintakerroksiin puristusjännityksen ja halkeilu näin ollen vähenisi. Vastaava vaikutus saatiin aikaiseksi kirjallisuudessa kokeella, jossa pintalamellit kuivattiin keskilamelleja kuivemmiksi.

Mikäli CLT:n tai vastaavien liimalaminaattien halkeilua halutaan jatkossa tutkia, osoittautuivat työssä kehitetyt suhteellinen halkeamapinta-ala ja halkeamaherkkyys toimiviksi tunnusluvuiksi halkeiluilmiön kuvaamiseen ja vertailuun.

10 YHTEENVETO

CLT on monikäyttöinen puinen rakennusmateriaali, joka tarjoaa tehokkaan ja nopean tavan valmistaa pitkälle jalostettuja rakennuskomponentteja. Levymäinen ja muunneltava rakenne tarjoaa useita mahdollisuuksia muokata tuotetta eri loppukohteisiin. Keskeinen etu CLT:n hyödyntämisessä on lyhentynyt rakennusaika, helppo asennus ja suunnittelun vapaus. CLT:n haittapuolia on se, että tunnettuus ja saatavuus ovat Suomessa vielä melko heikkoja ja se, että kerrostaloissa näkyville jäävän puun määrää rajoitetaan paloturvallisuussyistä. Pientalorakentamisessa näkyvän puupinnan määrää ei rajoiteta, mutta silloin CLT:n merkittävin haitta on sen taipumus halkeilla. Halkeilu on esteettinen ongelma ja se johtuu liimalaminaattirakenteesta ja puun luontaisesta kosteuselämisestä.

Työn aihepiiri on keskittynyt seinärakenteen ja huoneilman vaikutusrajapintaan. Työssä perehdyttiin huoneilman laatuun ja massiivipuisten rakenteiden energiatehokkuuteen sekä CLT-pintojen pintakäsittelyyn. Näkyvän CLT:n hyödyntäminen rakenteissa edellyttää näiden kaikkien tekijöiden yhteistoimintaa.

Pintakäsittelyaineet toimivat rakenteen ja huoneilman välikätenä. Maalin luonne ja vesihöyrynläpäisyominaisuudet voivat estää kosteuden siirtymisen huoneilman ja CLT:n välillä täysin. Huokoinen ja ns. hengittävä pintakäsittelyaine sallii kosteuden siirtyä vapaasti rajapinnan yli. Peittävä pintakäsittely vähentää puun kosteuselämistä, joka teoriassa vähentää CLT:n pintahalkeilutaipumusta, kun taas hengittävät pintakäsittelyt saavat aikaan suurempia kosteusliikkeitä.

Pintakäsittelytyypeistä silikaattimaalit ovat mielenkiintoisia vesihöyryn läpäisyn suhteen, sillä silikaattimaalilla maalatun pinnan kosteuspuskurointikapasiteetti on havaittu kokeissa olevan suurempi kuin maalamattoman puupinnan. Koska silikaattimaalijärjestelmien hyödyntäminen CLT:n ja sisäkäytön tapauksessa on vielä selvittämättä, suositellaan hengittäväksi pintakäsittelymateriaaliksi kuultavia, kalvoa muodostamattomia pintakäsittelyaineita, kuten vahoja.

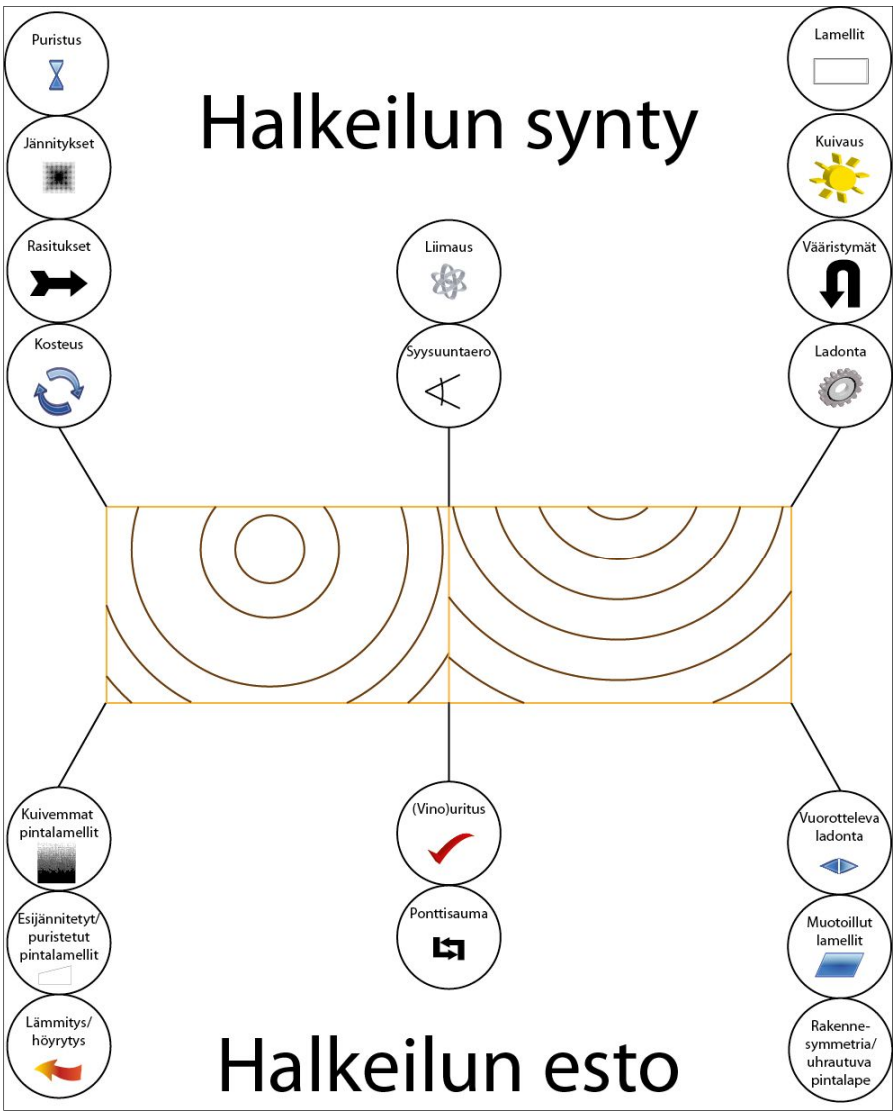
Kirjallisuusosiossa ilmeni, että mikäli asuintiloissa on riittävä määrä vesihöyryn läpäisyä sallivaa puupintaa, aistitaan se parempana huoneilman laatuna. Tämä on seurausta pienemmästä ilmankosteuden vaihtelusta. Puun kosteustekniset ominaisuudet eroavat muista rakennusmateriaaleista merkittävästi, sillä se kykenee varastoimaan ja luovuttamaan kosteutta suuria määriä verrattain nopeasti. Tämä edellyttää kuitenkin, että puupintoja ei peitetä vesihöyryn liikkumista haittaavilla kalvoilla tai muilla rakenteilla.

Sisäilman laatu kytkeytyy läheisesti talotekniikkaan ja erityisesti ilmanvaihtoon ja lämmitykseen. Edellä mainittu hyöty huoneilman kosteuden tasaamisesta vaatii riittävän puupinta-alan lisäksi sen, että asuintilan ilmanvaihtoa säädellään käytön mukaan ja, että huo-

neilman tarpeetonta lämmitystä vältetään. Puulla on kyky varastoida lämpöä itseensä, ja tästä syystä suuret puumäärät, jotka ovat suorassa yhteydessä huoneilmaan, parantavat rakennuksen energiatehokkuutta kesällä ja talvella. Työssä perehdyttiin älykkään ilmanvaihtolaitteiston ja CLT:n yhteistoimintaan ja todettiin, että mikäli ilmanvaihtostrategia voidaan toteuttaa anturitiedon tai asunnon käyttöasteen perusteella, voidaan menettelyllä saavuttaa jopa kymmenen prosentin lämmitysenergian säästö lämmityskaudella. Riskinä ilmanvaihdon säätämisessä on kuitenkin ilmanlaadun hetkittäinen raja-arvojen ylittyminen.

CLT:n hyödyntäminen näkyvänä rakenteena edellyttää sitä, että sen halkeilua voidaan rajoittaa. Suoraan pintaan tehty pintakäsittely ei tuota tyydyttävää tulosta mikäli puu halkeilee. Useissa tapauksissa pinta joudutaan levyttämään erillisellä levykerroksella halkeilun muodostaman visuaalisen haitan vähentämiseksi. Tässä työssä halkeiluun vaikuttavia tekijöitä tarkasteltiin niiden syntyperän ja vaikutustavan perusteella. Halkeilun hallintaa kokeiltiin työstämällä levyn pintaan erilaisia uria. Testatut uritukset olivat, suora ura, vino ura ja pyöreä ura. Ristiinliimatun massiivipuun halkeilukäyttäytymistä on tutkittu vähän ja ilmiön taustoissa on vielä paljon tutkittavaa.

Halkeiluilmiö on monisyinen reaktio, joka on seurausta CLT:n valmistuksen vaiheista ja käytönaikaisista rasituksista. Tiivistettynä työssä esitettyjä halkeiluilmiön vaikuttimia on esitetty kuvassa 72. Tärkeimpinä vaikuttimina mainittakoon valmistuksen jäännösjännitykset, käytön aikaiset kosteusrasitukset ja puumateriaalin mekanosorptinen toiminta, sekä ladonnassa tehdyt valinnat. Kuvan alalaidassa on myös työn perusteella laadittuja ehdotuksia halkeilun hillitsemiseksi.



Kuva 72. Halkeiluilmiön taustatekijät ja keinoja halkeilun estoon.

Uritettu pinta on subjektiivisesti arvioiden aina miellyttävämpi vaihtoehto kuin halkeillut urittamaton pinta. Kokeiden perusteella havaittiin, että halkeamat keskittyvät suurimmaksi osaksi pintalautojen väliseen saumaan, mikä johtuu syysuunnan vaihtumisesta liimasauman molemmin puolin. Uritus saa aikaan halkeiluilmiön lieventymisen optisen näköestevaikutuksen ansiosta. Mikäli pintaan työstettiin suora ura, halkeaman havainnointi uran pohjalta vaikeutui merkittävästi verrattuna urittamattomaan pintaan. Kokeiden perusteella on kuitenkin todettava, että suora ura ei vaikuttanut itse levyn halkeiluun vähentävästi.

Halkeilua pystyttiin vähentämään aidosti, jos ura työstettiin pinnan suhteen vinoon. Näin työstetyistä koekappaleista suuri osa selviytyi halkeilutesteistä täysin halkeilematta, mikä oli poikkeavaa verrattuna muihin ryhmiin. Työn pohdinnassa esitetään, että vino ura vähentää liimasauman alueella olevia vetojännityksiä, joka on seurausta paremmasta syykuvion jatkuvuudesta lamellien välillä. Lisäksi halkeilu keskittyy uran pohjalle, josta halkei-

lun havaitseminen on epätodennäköistä. Kokeiden perusteella pyöreitä ja laakeita uria ei voi suositella, sillä niiden halkeamataipumus oli kokeiden perusteella suurempi kuin urittamattoman pinnan.

Koekappaleissa tutkittiin myös liimapuunkaltaisen Effex-sisustuslevypaneelin hyödyntämistä pintalamellikerroksena. Effex-paneelin odotettiin toimivan halkeilun kannalta paremmin kuin tavallinen CLT-pinta, mutta kokeet osoittivat päinvastoin. Effex halkeilee CLT:n pintakerroksessa voimakkaasti.

Tuotannon näkökulmasta tarkasteltuna uritus on mahdollista integroida nykyisiin työstöihin. Kenties tehokkain tapa tuottaa suoraa uraa lamellisauman kohdalle olisi jyrsiä/höylätä uran puolikas lamellin syrjään sormijatkosasemalla tai lamellien mitallistamisen yhteydessä. Työssä uritus tehtiin CLT-levyn pintaan puristamisen ja viimeistelyn jälkeen. Tämä menettelytapa on kallis ja työläs.

Teollisen pintakäsittelyn kannalta uritettu CLT vaatii lisätutkimusta. Työn perusteella havaittiin, että ruiskumaalaustekniikat soveltuvat uritetun pinnan pintakäsittelyyn. Jatkossa tulisi tutkia kustannustehokkaammat metodit, kuten valukone- ja telakonepinnoitus. Näissä tapauksissa urien tukkeutuminen on todennäköistä ja sitä voitaisiin lieventää erilaisilla kaavareilla tai harjateloilla.

Tiivistäen työn havainnot merkitsevät sitä, että CLT:n mekaaninen muokkaus urittamalla kykenee vähentämään halkeiluilmiön haittoja näkyvien CLT-komponenttien tapauksessa. Mikäli uritusmenetelmää hyödynnetään, voidaan CLT-rakenteita jatkossa jättää enemmän suoraan yhteyteen huoneilman kanssa. Tällöin massiivipuulla on mahdollisuus vaikuttaa vähentävästi rakennusten energiankulutukseen sekä sisäilman kosteuden vaihteluun. Ennen kaikkea, urituksen tuloksena saadaan esteettisesti miellyttävää ja arvokkaan näköistä seinäpintaa (Kuva 73), jonka ilme säilyy virheettömänä pidempään rakennuksen käytön aikana.

Kuva 73. Uritettu ja kuultokäsitelty CLT-elementti.

LÄHDELUETTELO

Asan, H. 2006, "Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials", Building and Environment, vol. 41, no. 5, sivut: 615-620.

Brandner, R. 2013, "Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report", COST Action FP1004: Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber (CLT), Editoinut: R. Harris, A. Ringhofer & G. Schickhofer. The University of Bath, Graz, Itävalta, 21-22.5.2013, pp. 3.

Casselbrant, S., Svensson, B.E.M., Sipi, M., Raknes, E., Müller, M. & Kristensen, K. 2000, Pohjoismainen puualan laatukieli - havupuu, Teknillinen korkeakoulu, Espoo.

De Meijer, M. & Militz, H. 2001, "Moisture transport in coated wood. Part 2: Influence of coating type, film thickness, wood species, temperature and moisture gradient on ki-netics of sorption and dimensional change", Holz als Roh-und Werkstoff, vol. 58, no. 6, sivut: 467-475.

Eckelman, C.A. 1999, Brief survey of wood adhesives. FNR Report 154., Purdue University Cooperative Extension Service, West Lafayette, IN.

Ekstedt, J. 2002, Studies on the barrier properties of exterior wood coatings., KTH- Royal Institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Building Materials.

Fragiacomo, M., Fortino, S., Tononi, D., Usardi, I. & Toratti, T. 2011, "Moisture-induced stresses perpendicular to grain in cross-sections of timber members exposed to differ-ent climates", Engineering Structures, vol. 33, no. 11, sivut: 3071-3078.

Funke, W., Hoppe, L., Hasselkus, J., Curtis, L.G., Hoehne, K., Zech, H., Heiling, P., Yamabe, M., Dören, K., Schupp, H., Küchenmeister, R., Schmitthenner, M., Kremer, W., Wieczorrek, W., Gempeler, H., Schneider, W., White, J.W., Short, A.G., Blank, W.J., Calbo, L.J., Plath, D., Wagner, F., Haller, W. & Rödder, K. 2000, Paints and Coatings, Teoksessa: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Gagnon, S., Bilek, E.M., Podesto, L. & Crespell, P. 2013, Introduction. Teoksessa: CLT Handbook, E. Karacabeyli & B. Douglas, (toim.), U.S Edition. FPInnovations, Pointe-Claire, Quebec, Kanada. Sivut: 1-45

Gereke, T., Hass, P. & Niemz, P. 2010, "Moisture-induced stresses and distortions in spruce cross-laminates and composite laminates", Holzforschung, vol. 64, no. 1, sivut: 127-133.

Gereke, T. & Niemz, P. 2010, "Moisture-induced stresses in spruce cross-laminates", Engineering Structures, vol. 32, no. 2, sivut: 600-606.

Glass, S., Wang, J., Easley, S. & Finch, G. 2013, Chapter 10: Enclosure--Building enclosure design for cross-laminated timber construction. Teoksessa: CLT handbook: cross-laminated timber, E. Karacabeyli & B. Douglas, (toim.), US Edition. FPInnovations, Pointe-Claire, Quebec, Kanada.

Graystone, J. 2001, "Moisture transport through wood coatings: The unanswered questions", Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions, vol. 84, no. 3, sivut: 177-187.

Gynther, L., Elväs, S. & Suomi, U. 2005, Katsaus energian ominaiskulutuksiin ja niitä selittäviin tekijöihin, Motiva Oy.

Hameury, S. 2006, The hygrothermal inertia of massive timber constructions, KTH, Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment, Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Building Materials. Tukholma, Ruotsi.

Hameury, S. 2005, "Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study", Building and Environment, vol. 40, no. 10, sivut: 1400-1412.

Hameury, S. 2007, "Influence of coating system on the moisture buffering capacity of panels of Pinus sylvestris L", Wood Material Science & Engineering, vol. 2, no. 3-4, sivut: 97-105.

Hameury, S. & Lundström, T. 2004, "Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign", Energy and Buildings, vol. 36, no. 3, sivut: 281-292.

Kistler, S.F. & Schweizer, P.M. 1997, Liquid film coating : scientific principles and their technological implications, Chapman & Hall, London.

Kokko, E. 2002, Hengittävä puukuiturakenne: Fysikaalinen toimintaperiaate ja vaikutukset sisäilmaan., Wood Focus Oy, Vammalan Kirjapaino Oy.

Krabbenhoft, K. & Damkilde, L. 2004, "A model for non-Fickian moisture transfer in wood", Materials and Structures, vol. 37, no. 9, sivut: 615-622.

Lambourne, R. & Strivens, T.A. (eds) 1999, Paint and Surface Coatings - Theory and Practice (2nd Edition), Woodhead Publishing, Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England.

Leitinger, S. & Schickhofer, G. 2013, Method for processing raw timber to form finger-jointed wood products, US Patent: US 20130183477 A1.

Lepage, R. 2012, Moisture Response of Wall Assemblies of Cross-Laminated Timber Construction in Cold Canadian Climates, University of Waterloo, Civil Engineering.

Lesar, B. & Humar, M. 2011, "Use of wax emulsions for improvement of wood durability and sorption properties", European Journal of Wood and Wood Products, vol. 69, no. 2, sivut 231-238.

Mestek, P., Werther, N. & Winter, S. 2011, Building with cross laminated timber Load-bearing solid wood components for walls, ceilings and roofs, Toinen painos, Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. (Glued Laminated Timber Research Association inc.), D-42369 Wuppertal, Saksa.

Michael Weinig AG 2014, Weinig Powermat 2400 -tuote-esite, Weinigstrasse 2/4, 97941 Tauberbischofsheim, Saksa.

Motiva Oy 2014, Katsaus energian ominaiskulutuksiin ja niitä selittäviin tekijöihin, päivitys 2012, Motiva Oy.

Ojanen, T. 2011, CLT-rakenteiden rakennusfysikaalinen toimivuus, VTT Expert Services Oy, Espoo.

Osanyintola, O.F. & Simonson, C.J. 2006, "Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: experimental facilities and energy impact", Energy and Buildings, vol. 38, no. 10, sivut: 1270-1282.

Padfield, T. 1998, "The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity", Department of Structural Engineering and Materials, Lyngby, Technical University of Denmark, vol. 150.

Pang, S. & Haslett, A.N. 2002, "Effects of sawing pattern on drying rate and residual drying stresses of pinus radiata lumber", Maderas.Ciencia y tecnología, vol. 4, no. 1, sivut 40-49.

PuuInfo 2011, Tekninen tiedote: Puun kosteuskäyttäytyminen, PuuInfo Oy.

PuuProffa 2012, , Puutieto [Pro Puu Ry kotisivu], [Online]. Saatavilla: http://www.puuproffa.fi/PuuProffa_2012/fi/puutieto/puutieto [viitattu 26.7.2014]

Rafidiarison, H., Mougel, E. & Nicolas, A. 2012, "Laboratory experiments on hygrothermal behaviour of real-scale timber walls", Maderas.Ciencia y tecnología, vol. 14, no. 3, sivut: 389-401.

Rode, C., Peuhkuri, R.H., Hansen, K.K., Time, B., Svennberg, K., Arfvidsson, J. & Ojanen, T. 2005, NORDTEST Project on Moisture Buffer Value of Materials, INIVE.

Ross, L.A., Gagnon, S. & Keith, M.S. 2013, Structural design of cross-laminated timber elements. Teoksessa: CLT Handbook, E. Karacabeyli & B. Douglas, (toim.), U.S Edi-tion. FPInnovations, Pointe-Claire, Quebec, Kanada. Sivut: 93-118

Salonvaara, M., Ojanen, T., Holm, A., Künzel, H.M. & Karagiozis, A.N. 2004, "Moisture buffering effects on indoor air quality - experimental and simulation results", Proceedings of Buildings IX, Clearwater, Florida.

Simonson, C.J., Salonvaara, M. & Ojanen, T. 2001, Improving indoor climate and comfort with wooden structures, VTT, Espoo.

Stora Enso 2012, Building Solutions - CLT-manuaali. [Online] Saatavilla: http://www.clt.info/en/wp-content/uploads/sites/6/2013/08/01-Technical-folder-Stora-Enso-Building-Solutions-CLT.pdf (viitattu 26.7.2014)

Tikkurila, O. 2008, Tikkurila Coatings - Puun Teollinen Pintakäsittely, Toinen painos, Tikkurila Oy, Industrial Coatings, Tikkurila omatarvepaino.

Time, B. 1998, Hygroscopic moisture transport in wood, Norwegian University of Science and Technology, Department of Building and Construction Engineering.

Torgovnikov, G. & Vinden, P. 2010, "Microwave wood modification technology and its applications", Forest Products Journal, vol. 60, no. 2, sivut: 173-180.

Tuomaala, P. 2008, Esitys: Rakennuskannan ja rakennusten energiankäyttö, VTT.

Van der Wel, G.K. & Adan, O.C.G. 1999, "Moisture in organic coatings—a review", Progress in organic coatings, vol. 37, no. 1, sivut:1-14.

van Meel, P.A., Erich, S.J.F., Huinink, H.P., Kopinga, K., de Jong, J. & Adan, O.C.G. 2011, "Moisture transport in coated wood", Progress in Organic Coatings, vol. 72, no. 4, sivut: 686-694.

Welling, J., Salin, J.-., de Corte, J., Sandland, K.-., Nemeth, R., Milic, G. & Knaggs, G. 2010, "Dried Timber - How to specify correctly", COST Action E53 "Quality control for wood and wood products", ed. J. Welling, European Drying Group (EDG) and COST E53 2010, Hampuri, 2010, 19.5.2008.

Wicks, Z.W., Jones, F.N. & Pappas, S.P. 2007, Organic coatings : science and technology, 2nd. ed., Wiley, New York.

Wolfmeier, U., Schmidt, H., Heinrichs, F., Michalczyk, G., Payer, W., Dietsche, W., Boehlke, K., Hohner, G. & Wildgruber, J. 2000, Waxes. Teoksessa: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Woloszyn, M., Kalamees, T., Abadie, M.O., Steeman, M. & Kalagasidis, A.S. 2009, "The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of build-ings", Building and Environment, vol. 44, no. 3, sivut: 515-524.

Yeh, B., Kretschmann, D. & Wang, B. 2013, Cross-laminated Timber Manufacturing. Teoksessa: CLT Handbook, E. Karacabeyli & B. Douglas, (toim.), U.S Edition. FPInnovations, Pointe-Claire, Quebec, Kanada. Sivut: 63-93.

Liiteluettelo

Liite 1. Tilastollinen tarkastelu: Tasaannutuskosteuden vaikutus tuloksiin. 1 sivu.

Liite 2. Tilastollinen tarkastelu: Pintakäsittelyn vaikutus tuloksiin. 1 sivu.

Liite 3. Uritusten parivertailu: Tapaus 1, painotettu suhteellinen halkeamapinta-ala. 1 sivu.

Liite 4. Uritusten parivertailu: Tapaus 2, Uran pohjan osalta mitätöity suhteellinen halkeamapinta-ala. 1 sivu.

Liite 5. Uritusten parivertailu: Tapaus 3, Uran pohjan osalta mitätöity halkeamaherkkyys. 1 sivu.

Liite 6. Uritusten parivertailu: Tapaus 4, Uran pohjan osalta mitätöity halkeamaherkkyys. 1 sivu.

Liite 1. Tilastollinen tarkastelu: Tasaannutuskosteuden vaikutus tuloksiin

Tulokset ryhmiteltiin tasaannutuskosteuden perusteella, ja ryhmien tuloksia vertailtiin Mann-Whitneyn U-testillä. U-testin tuloksena todettiin, että ryhmät ovat peräisin samasta jakaumasta, eli toisin sanoen tasaannutuskosteudella ei ollut tilastollisesti merkittävää vaikutusta suhteutettuun halkeamapinta-alaan tai halkeamaherkkyyteen huolimatta näköestekertoimen implementoinnista tai uran pohjalla olevien halkeamien mitätöinnistä. Kaikki testit on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. Koonti tasaannutuskosteuden vaikutuksen tilastollisesta testauksesta.

Vertailuluku ja painotus (tasaannutuskosteus)	Testi	Nollahypoteesi	p-arvo	α	Tulos
Halkeamapinta-ala (painotettu)	Mann-Whitney	Tulokset samasta jakaumasta	0,932	0,05	H_0 jää voimaan
Halkeamapinta-ala (uran pohja 0)	Mann-Whitney	Tulokset samasta jakaumasta	0,887	0,05	H_0 jää voimaan
Halkeamaherkkyys (painotettu)	Mann-Whitney	Tulokset samasta jakaumasta	0,843	0,05	H_0 jää voimaan
Halkeamaherkkyys (uran pohja 0)	Mann-Whitney	Tulokset samasta jakaumasta	0,977	0,05	H_0 jää voimaan

Esimerkkinä testien tulkinnasta mainittakoon tapaus: ”Halkeamapinta-ala (painotettu)”. 95% merkitsevyystasolla (α=0,05) tasaannutuskosteuden vaikutukselle saatiin p-arvoksi 0,932, jolloin nollahypoteesi (H_0=tulosten jakaumat ovat samat) jää voimaan. Testin tulkintana voidaan esittää, että tasaannutuskosteudella ei ole vaikutusta tuloksiin, ja tarvittaessa eri kosteudessa tasaannutettujen koekappaleiden tulokset voidaan yhdistää samaan ryhmään.

Liite 2. Tilastollinen tarkastelu: Pintakäsittelyn vaikutus tuloksiin

Tulokset ryhmiteltiin pintakäsittelyn perusteella ja ryhmiä testattiin Kruskal-Wallisin testillä. Testin perusteella voitiin todeta, että tulokset olivat peräisin samasta jakaumasta, jolloin pintakäsittelyn vaikutus tuloksiin oli tilastollisesti merkityksetön ja tarvittaessa tuloksia voidaan yhdistellä pintakäsittelykategorioista huolimatta. Pintakäsittelyn tilastolliset testitulokset on koottu taulukkoon 19.

Taulukko 19. Koonti pintakäsittelyn vaikutuksen tilastollisesta testauksesta.

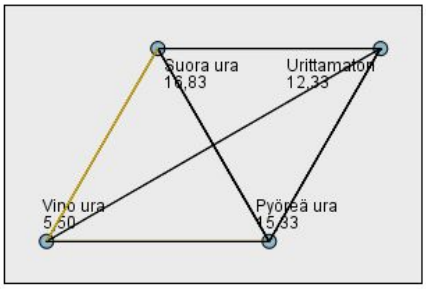
Vertailuluku ja painotus (pintakäsittely)	Testi	Nollahypoteesi	p-arvo	α	Tulos
Halkeamapinta-ala (painotettu)	Kruskal-Wallis	Tulokset samasta jakaumasta	0,797	0,05	H_0 jää voimaan
Halkeamapinta-ala (uran pohja 0)	Kruskal-Wallis	Tulokset samasta jakaumasta	0,853	0,05	H_0 jää voimaan
Halkeamaherkkyys (painotettu)	Kruskal-Wallis	Tulokset samasta jakaumasta	0,793	0,05	H_0 jää voimaan
Halkeamaherkkyys (uran pohja 0)	Kruskal-Wallis	Tulokset samasta jakaumasta	0,795	0,05	H_0 jää voimaan

Esimerkkinä testien tulkinnasta tarkastellaan tapaus: ”Halkeamapinta-ala (painotettu)”. 95% merkitsevyystasolla (α=0,05) pintakäsittelyvaihtoehtojen vertailun p-arvo oli 0,797, jolloin nollahypoteesi jää voimaan. Tulos voidaan tulkita sanallisesti siten, että pintakäsittelyn ei havaittu vaikuttavan halkeamapinta-alan mittaustuloksiin tilastollisesti merkitsevästi, ja että ne ovat todennäköisesti peräisin samasta jakaumasta, jolloin tuloksia voidaan tarvittaessa yhdistellä eri pintakäsittelyjen osalta.

Liite 3. Uritusten parivertailu: Tapaus 1, painotettu suhteellinen halkeamapinta-ala

Kun urien vaikutus suhteelliseen halkeamapinta-alaan painotettiin näköestekertoimilla, parivertailun tuloksista nähtiin, että tilastollisesti merkittävä ero muodostuu ainakin vinoa uraa ja suoraa uraa vertailtaessa. Muut vertailut eivät ylittäneet tilastollista merkitsevyyttä, mutta mahdollista eroa ei voida silti tyhjentävästi sulkea pois pienen otoskoon takia. Kuvassa 74 sarake ”*Adj. Sig.*” tarkoittaa korjattua merkitsevyyslukua. Korjattu luotettavuusluku ottaa huomioon väärän hyväksynnän riskin (*false positive*) kun samaa testiä suoritetaan sarjassa. Korjaamattomalla merkitsevyysluvulla ”*Sig.*” on myös painoarvoa, mutta sen perusteella esitetyt päätelmät eivät ole yhtä luotettavia. Huomioidaan kuitenkin, että myös vinon uran ja pyöreän uran parivertailu antaa korjaamattomaksi merkitsevyystasoksi 0,016, joka tarkoittaa tilastollisesti merkitsevää eroa. Parivertailun perusteella vinon uran ja urittamattoman pinnan ero saattaa olla sattuman aiheuttama harha.

Pairwise Comparisons of Uritus



Each node shows the sample average rank of Uritus.

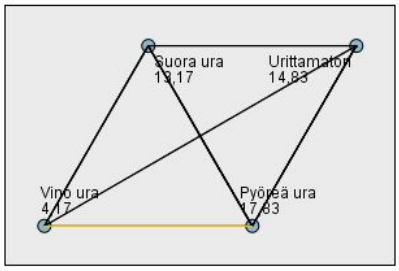
Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
Vino ura-Suora ura	11,333	4,082	2,776	,006	,033
Vino ura-Pyöreä ura	9,833	4,082	2,409	,016	,096
Vino ura-Urittamaton	6,833	4,082	1,674	,094	,565
Urittamaton-Suora ura	-4,500	4,082	-1,102	,270	1,000
Urittamaton-Pyöreä ura	-3,000	4,082	-,735	,462	1,000
Pyöreä ura-Suora ura	1,500	4,082	,367	,713	1,000

Kuva 74. Uritusten parivertailu Kruskal-Wallis testillä painotettujen suhteellisten halkeamapinta-alojen tapauksessa.

Liite 4. Uritusten parivertailu: Tapaus 2, Uran pohjan osalta mitätöity suhteellinen halkeamapinta-ala

Kun halkeamamittauksista mitätöitiin uran pohjalta mitatut tulokset suoran ja vinon uran tapauksessa, halkeamapinta-alan havaittiin eroavan voimakkaimmin vinon uran ja pyöreän uran välillä (Kuva 75). Tämä on luonnollista, sillä pyöreän uran painokerroin on tässä tapauksessa sama (0.7x , ks. kappale 6.5) kuin aikaisemmassa tarkastellussa tapauksessa. Korjattu merkitsevyystaso ylittyy vain vähän urittamattoman ja vinon uran parivertailussa. Korjaamattomalla merkitsevyystasolla tarkasteltuna tilastollinen merkitsevyys havaitaan myös suoran ja vinon uran vertailussa, mutta tämän tuloksen tieteellinen painoarvo on kiistanalainen pienellä otoskoolla.

Pairwise Comparisons of Uritus



Each node shows the sample average rank of Uritus.

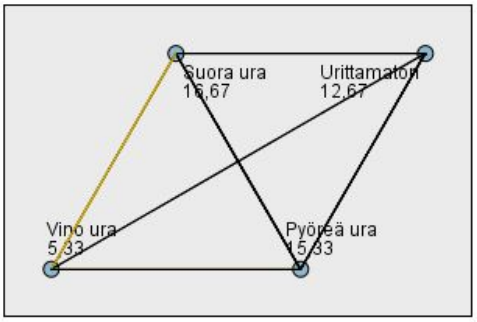
Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
Vino ura-Pyöreä ura	13,667	4,065	3,362	,001	,005
Vino ura-Urittamaton	10,667	4,065	2,624	,009	,052
Vino ura-Suora ura	9,000	4,065	2,214	,027	,161
Suora ura-Urittamaton	1,667	4,065	,410	,682	1,000
Urittamaton-Pyöreä ura	-3,000	4,065	-,738	,460	1,000
Suora ura-Pyöreä ura	-4,667	4,065	-1,148	,251	1,000

Kuva 75. Uritusten parivertailu suhteellisen halkeamapinta-alan suhteen tapauksessa, jossa uran pohjalle syntyvien halkeamien painokerroin on nolla vinolla ja suoralla uralla.

Liite 5. Uritusten parivertailu: Tapaus 3, Uran pohjan osalta mitätöity halkeamaherkkyys

Kun halkeamaherkkyyden määrityksessä käytettiin näköestekertoimia uran pohjalla olevien halkeamien laskennassa (Kuva 76), tilastollisesti merkittävä ero tulosjakaumassa havaittiin vinon ja suoran uran välillä korjatun merkitsevyysluvun perusteella. Jos otetaan huomioon myös korjaamattomat merkitsevyysluvut, nähdään että myös pyöreän ja vinon uran toiminnan välillä saattaa olla eroa.

Pairwise Comparisons of Uritus



Each node shows the sample average rank of Uritus.

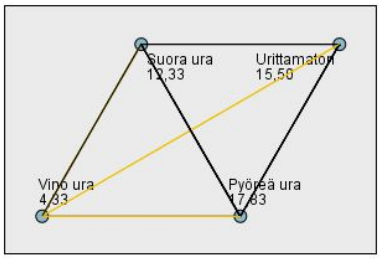
Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
Vino ura-Suora ura	11,333	4,082	2,776	,006	,033
Vino ura-Pyöreä ura	10,000	4,082	2,449	,014	,086
Vino ura-Urittamaton	7,333	4,082	1,796	,072	,435
Urittamaton-Suora ura	-4,000	4,082	-,980	,327	1,000
Urittamaton-Pyöreä ura	-2,667	4,082	-,653	,514	1,000
Pyöreä ura-Suora ura	1,333	4,082	,327	,744	1,000

Kuva 76. Tilastollisen merkitsevyyden selvittäminen parivertailulla, tapauksessa jossa tutkitaan uritusten toimintaa halkeamaherkkyyden osalta aineistolla, jossa uran pohjalle syntyvien halkeamien osuus on mitätöity (suoran ja vinon uran tapauksessa).

Liite 6. Uritusten parivertailu: Tapaus 4, Uran pohjan osalta mitätöity halkeamaherkkyys

Halkeamaherkkyyden parivertailun tarkastelu tapauksessa, jossa uran pohjalle osuneet halkeamat mitätöitiin suoran ja vinon uran osalta (Kuva 77) osoittaa, että tilastollisesti katsoen vino uritetun pinnan halkeamaherkkyys eroaa merkittävästi sekä pyöreän uran, että urittamattoman pinnan toiminnasta. Tämä on poikkeava tulos kaikkien tapausten keskuudessa. Huomionarvoista on myös, että mikäli tarkastelu ulotetaan korjaamattoman merkitsevyysluvun tapaukseen, niin myös vinon ja suoran uran toiminta eroaa toisistaan tilastollisesti merkitsevällä tasolla.

Pairwise Comparisons of Uritus



Each node shows the sample average rank of Uritus.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
Vino ura-Pyöreä ura	13,500	4,065	3,321	,001	,005
Vino ura-Urittamaton	11,167	4,065	2,747	,006	,036
Vino ura-Suora ura	8,000	4,065	1,968	,049	,294
Suora ura-Urittamaton	3,167	4,065	,779	,436	1,000
Urittamaton-Pyöreä ura	-2,333	4,065	-,574	,566	1,000
Suora ura-Pyöreä ura	-5,500	4,065	-1,353	,176	1,000

Kuva 77. Tilastollisen merkitsevyyden selvittäminen parivertailulla, tapauksessa jossa tutkitaan uritusten toimintaa halkeamaherkkyyden osalta aineistolla, jossa uran pohjalle syntyvien halkeamien osuus on mitätöity (suoran ja vinon uran tapauksessa).