

Veli Tammela

# LÄMPÖMODIFIOIDUN PUUN MEKAANISTEN OMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN

Opinnäytetyö  
Materiaalitekniikan koulutusohjelma

2017



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Veli Tammela	Insinööri (AMK)	Huhtikuu 2017
Opinnäytetyön nimi Lämpömodifioidun puun mekaanisten ominaisuuksien tutkiminen		54 sivua 23 liitesivua
Toimeksiantaja Mikpolis Oy		
Ohjaaja Juho Peura		
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia kuumavahakyllästetyn ja höyrylämpökäsitellyn puutavaran mekaanisia ominaisuuksia sekä vertailla eri koe-erien tuloksia. Työn toimeksiantajana toimi Mikpolis Oy, joka toimii Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun alaisuudessa. Vahakyllästyskäsittelyt liittyivät päättyneeseen PUMOK-hankeparin jatkokutkimukseen ja höyrylämpökäsittelyt sisältyivät tammikuussa alkaneeseen lämpöpuun kehittämishankkeeseen.</p> <p>Kaikki työssä käytetty koemateriaali tehtiin PUMOK-hankeparin aikana rakennetulla kuumakyllästyslaitteistolla. Mekaaniset testaukset suoritettiin materiaalitekniikan laboratorion laitteistoilla. Mekaanisiin testeihin kuului eri lujuus- ja kovuuskokeet sekä ruuvinpitävyys- ja kulutuksenkestokoe. Työssä käytettiin kahta vahatyyppeä. Koemateriaalina oli normaali mänty ja Thermo-D- lämpökäsitelty puu. Käsittelyt tehtiin korkeammalla ja matalammalla käsittelylämpötilalla. Referenssimateriaaleina toimivat käsittelemätön mänty ja Thermo-D.</p> <p>Mekaanisten testien tuloksista kävi ilmi, että SW-1800 -kynttilävaha soveltuu paremmin lujuutta, jäykkyyttä ja kulutuksenkestoa vaativiin sovellutuksiin. WARADUR OP -vahalla kovuusominaisuudet paranivat alemmalla käsittelylämpötilalla parhaiten. Thermo-D-laadulla korkeampi käsittelylämpötila heikensi kummankin vahatyypin ominaisuuksia entisestään.</p> <p>Höyrylämpökäsittelyssä koemateriaalina käytettiin hallikuivaa ja tuoretta sahatavaraa. Höyrylämpökäsittely suoritettiin kylläisen vesihöyryn paineen avulla. Vertailumateriaaliksi tehtiin perinteinen lämpökäsittely normaalissa ilmanpaineessa. Tuloksia verrattiin myös Thermo-D -materiaaliin.</p> <p>Höyrykäsittelyllä iskulujuus lähes tuplaantui verrattuna Thermo-D -laatuun. Taivutuslujuuteen sillä ei ollut suurta vaikutusta. Hallikuivalla materiaalilla kimmokerroin kasvoi, mutta ei kuitenkaan merkittävästi.</p>		
Asiasanat lämpöpuu, vahat, kyllästys, paine		

Author (authors)	Degree	Time
Veli Tammela	Bachelor of Engineering	April 2017
Thesis Title		54 pages 23 pages of appendices
Research of Mechanical Properties for Thermally Modified Wood		
Commissioned by		
Mikpolis Oy		
Supervisor		
Juho Peura		
Abstract		
<p>The objective of this thesis was to research the mechanical properties of hot wax- saturated and steam heat- treated wood, and to compare different sample lots with each other. This thesis was commissioned by Mikpolis Oy, which is a part of the South-Eastern Finland University of Applied Sciences. Wax treatments are a follow-up research for the already finished PUMOK-projects. Steam heat- treatments are part of a project where the goal is to improve the properties of thermally modified wood.</p> <p>Test materials used in this thesis were made with a hot saturation apparatus, which was designed and manufactured during the PUMOK-project. Mechanical tests were performed in the material technology laboratory and included strength, hardness, screw withdrawal and abrasion testing. Two different wax types were used. Both the wax test and reference materials were normal pine and Thermo-D. High and lower treating temperatures were used.</p> <p>Results of the mechanical tests showed that SW-1800 candle wax is more suitable for applications where strength, stiffness and abrasion resistance are needed. WARA-DUR® OP wax had the best hardness properties when the treatment temperature was lower. A higher treatment temperature reduced the properties of Thermo-D in the case of both wax types.</p> <p>In steam heat-treatment, the test material was made out of hall dry and fresh pinewood. The steam heat- treatment was performed under saturated steam pressure. For the sake of comparison, normal heat treatment was performed. Results were also compared for the previous tested Thermo-D.</p> <p>In steam heat-treatment the impact strength almost doubled for compared to the Thermo-D. Bending strength stayed in the same level. In hall dry sample lot the stiffness showed some increase.</p>		
Keywords		
heat treated wood, waxes, saturation, pressure		

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	PUUN RAKENNE JA FYSIKAALISET OMINAISUUDET.....	7
2.1	Tiheys.....	7
2.2	Kosteussuhde ja tasapainokosteus.....	8
2.3	Muodonmuutokset.....	9
3	PUUN MEKAANISIA OMINAISUUKSIA.....	10
3.1	Lujuus ja kimmokerroin.....	10
3.2	Kovuus.....	11
4	PUUN LÄMPÖKÄSITTELY.....	12
4.1	Lämpökäsittelyn vaikutus ja prosessin kulku.....	12
4.2	ThermoWood®.....	13
4.3	Kuumavahakyllästysprosessi.....	15
4.4	Höyrylämpökäsittelyprosessi.....	16
5	LAITTEISTO JA KOEMATERIAALIN VALMISTUS.....	17
5.1	Kuumavahakyllästykset.....	18
5.2	Höyrylämpökäsittely.....	21
5.2.1	Lämpökäsittely/ kuumakuivaus normaalissa ilmanpaineessa.....	22
5.2.2	Käsittely RH 100 % höyrynpaineella.....	23
6	TUTKIMUSMENETELMÄT.....	25
6.1	Taivutuslujuuden ja kimmokertoimen määrittäminen.....	25
6.2	Brinell-kovuus.....	27
6.3	Janka-kovuus.....	28
6.4	Taber-kulutuskoe.....	28
6.5	Ruuvien vetotesti.....	29
6.6	Iskulujuuden määrittäminen.....	31
7	TUTKIMUSTULOKSET JA VERTAILU.....	31
7.1	Vahakoekappaleiden EN 408 -taivutuskoe.....	31

7.2	Vahakoekappaleiden Brinell-kovuustestaus .....	36
7.3	Vahakappaleiden Janka-kovuusmittaukset.....	37
7.4	Taber-kulutuskoe .....	38
7.5	Ruuvinvetokoe .....	41
7.6	Iskulujuuden määrittäminen .....	43
7.7	Höyrylämpökäsittelyn koemateriaalin testaus.....	44
8	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	46
8.1	Vahakyllästyksen määrittäminen.....	46
8.2	Höyrylämpökäsittelyt.....	49
	LÄHTEET .....	50
	KUVALUETTELO .....	52
	TAULUKKOLUETTELO .....	54
	LIITTEET	
	Liite 1. Taivutus- ja iskutestien tulokset	
	Liite 2. Brinell, Janka, ruuvinveto ja Taber mittaukset	
	Liite 3. Höyrylämpökäsittelyn tulokset	

## 1 JOHDANTO

Idea tämän opinnäytetyön aiheeseen syntyi syksyllä 2016, kun teimme puumateriaalin kurssilla projektityötä kyllästyskäsittelyistä. Nykyisellä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratoriolle oli tutkittu PUMOK-hankeparin aikana puun kyllästämistä vahoilla. Tästä heräsi kiinnostukseni päästä tekemään opinnäytetyötä samasta aihepiiristä. Lopulta tammikuussa 2017 varmistui, että hankkeen jatkotutkimukseen ja alkavaan lämpöpuun kehittämishankkeeseen olisi mahdollista päästä mukaan opinnäytetyön muodossa.

Opinnäytetyön aiheeksi vakiintui lämpömodifioidun puun mekaanisten ominaisuuksien tutkiminen. Se sisälsi kaksi erillistä kokonaisuutta. Ensimmäinen kokonaisuus oli vahakyllästettyjen koemateriaalien mekaaninen testaus ja ominaisuuksien vertailu. Vahakoemateriaalin muuttujina olivat vahatyyppejä, kyllästyskäsittelylämpötila ja puumateriaali. Työn toinen kokonaisuus koostui lämpöpuuhankkeen koemateriaalin lujuusominaisuuksien testauksesta ja vertailusta.

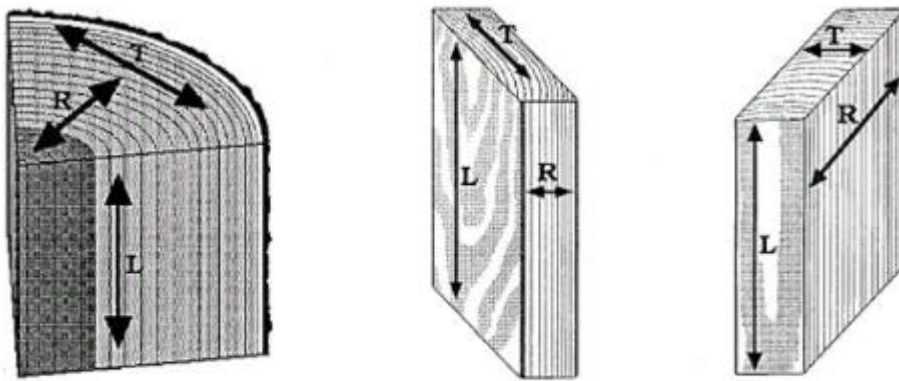
Opinnäytetyön ensimmäisessä vaiheessa valmistettiin koekappaleita PUMOK-hankeparin aikana tuotetusta koemateriaaleista ja tehtiin muutamia uusia koeajoja puutekniikan laboratorion kuumakyllästyslaitteistolla, jotta saatiin riittävä määrä koemateriaalia mekaanisiin testeihin. Uusien ajojen koemateriaalista valmistettiin testeihin sopivia kappalekokoja. Kaikki koekappaleet tasaannutettiin olosuhdekaapissa ja niille suoritettiin, eri standardeja soveltaen, useita eri mekaanisia testejä. Koe-erien testituloksia verrattiin sekä toisiinsa että referenssimateriaaliin.

Työn toisessa vaiheessa koemateriaaleille suoritettiin lämpöpuuhankkeen mukaisia koeajoja ja koemateriaaleista valmistettiin mekaanisiin testeihin soveltuvia kappalekokoja, jotka tasaannutettiin olosuhdekaapissa. Testauksien jälkeen saatuja tuloksia vertailtiin keskenään.

Työn toimeksiantajana oli Mikpolis Oy, joka on osa nykyistä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulua. Opinnäytetyön kaikki vaiheet koemateriaalin valmistuksesta mekaanisiin testeihin suoritettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun puutekniikan ja materiaalitekniikan laboratorioilla.

## 2 PUUN RAKENNE JA FYSIKAALISET OMINAISUUDET

Puun poikkileikkauksen kuvaamiseen käytetään sylinterikoordinaatistoa. Poikkileikkauksesta voidaan erottaa eri leikkauspinnat, joilla puun rungon rakennetta ja ominaisuuksia voidaan havainnollistaa. Eri leikkauspintojen suunnat ovat nimeltään poikkileikkauksen, säteen ja tangentin suuntainen leikkaus (kuva 1). Poikkileikkauksen suuntainen pinta on kohtisuoraan puun pituussuuntaan. /1, s. 15./



R: Säteen suunta

T: Tangentin suunta

L: Pituussuunta

Kuva 1. Puun eri leikkauspinnat

Lähellä puun ydintä olevaa puuainesta nimitetään nuorpuuksi ja kauempana ytimestä olevaan aineeseen aikuispuuksi /1, s. 16/. Sydänpuulla tarkoitetaan rungon keskiosassa olevaa puuainesta, jonka väri on tummempi kuin ulkokehällä olevan vaalean puuaineksen väri. Poikkileikkauksen ulkokehällä olevaa puuainesta kutsutaan pintapuuksi. Joskus käytetään myös nimitystä manto. /1, s. 109./

### 2.1 Tiheys

Tiheydellä tarkoitetaan massaa tilavuusyksikköä kohden. Massan perusyksikkö on kilogramma (kg). Tilavuudesta käytetään symbolia  $V$  ja yksikköä  $m^3$ .

Näin ollen tiheyden yksiköksi tulee  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Sitä merkitään puutieteessä tunnuksella  $r$ . /1, s. 133./

Puu on ominaisuuksiltaan hygroskooppista eli vettä imevää materiaalia. Hygroskooppisuuden takia puun tilavuus ja massa vaihtelevat sen sisältämän vesimäärän mukaan. Näin ollen on tärkeää ilmoittaa, tiheyttä määritettäessä, missä kosteudessa puu on ollut laskentahetkellä. /1, s. 134./

Kuivatiheys on laskettu silloin, kun puun massa ja tilavuus on mitattu absoluuttisen kuivana. Kuivatiheyden tunnus on  $r_0$ . Ilmakuivatiheydestä puhutaan silloin, kun massa ja tilavuus on mitattu puun kosteuden ollessa 12 %. Eräissä standardeissa kosteusprosentiksi on myös mainittu 15 %. Ilmakuivatiheyttä merkitään tunnuksella  $r_{12}$  tai  $r_{15}$ . Kolmas käytetty tiheys on kuiva-tuoretiheys. Siinä massa on mitattu kuivana ja tilavuus tuoreena. Merkintänä käytetään  $r_{0,g}$ . Edellä mainittu tiheys on nykyään eniten käytössä ja siitä käytetäänkin usein nimitystä *tiheys*. /1, s. 134./

Muita tiheyksiä ovat tuoretiheys, jossa massa ja tilavuus on mitattu tuoreena ( $r_g$ ) sekä kuiva-ilmakuivatiheys, jossa massa on mitattu kuivana ja tilavuus ilmakeivana. Merkintänä käytetään silloin  $r_{0,12}$  tai  $r_{0,15}$ . /1, s. 134./

## 2.2 Kosteussuhde ja tasapainokosteus

Puun kosteussuhteella tarkoitetaan puun sisältämän veden massan suhdetta vedettömän puun massaan. Se lasketaan kaavasta 1. Kosteussuhteesta käytetään myös nimitystä *kosteus*. /2./

$$u = \frac{m_v}{m_0} = \frac{(m_m - m_0)}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

jossa	$u$	puun kosteussuhde	[%]
	$m_v$	veden massa	[g]
	$m_0$	vedettömän puun massa	[g]
	$m_m$	kostean puun massa	[g]



Havupuiden kyseessä ollessa puun kosteuspitoisuuden ero pinta- ja sydänpuun välillä on elävässä puussa huomattava. Sydänpuun muodostuessa sen kosteus alenee voimakkaasti suhteessa pintapuuhun. Sydänpuun osuus runkossa vaikuttaa siis puun kosteuteen. Elävän tukkirunkoisen männyn pinta- puun kosteussuhde on 120–150 %, kun taas sydänpuussa kosteussuhde on vain 32–37 %. /1, s. 126./

Puun tasapainokosteudella tarkoitetaan tilaa, johon puun kosteuspitoisuus on vakioitunut. Siihen vaikuttaa ilman lämpötila ja sen hetkinen ilman suhteellinen kosteus. Ilman suhteellinen kosteus (RH) tarkoittaa ilmaan sisältyvän vesimäärän suhdetta ilman maksimaaliseen vesimäärään vallitsevassa lämpötilassa. /3./

### **2.3 Muodonmuutokset**

Puun sisältämä vesi on varastoitunut puun soluseinämiin ja osaksi vapaaksi vedeksi soluonteloihin. Puun kuivuessa soluonteloissa oleva vapaa vesi haihtuu ensin, jonka jälkeen soluseinämiin varastoitunut vesi alkaa poistua. /2./

Puun syiden kyllästymispiste on puun kosteussuhde silloin, kun soluseinämät ovat kyllästyneet vedellä ja vapaata vettä ei esiinny puun soluonteloissa. Puun kastuessa soluseinämät siis alkavat imeä vettä itseensä, jolloin puu turpoaa ja dimensiot kasvavat. Mittamuutokset jatkuvat aina puun syiden kyllästymispisteeseen asti, jonka jälkeen laajeneminen pysähtyy. Kosteussuhteen taas alennuttua alle kyllästymispisteen alkaa puu kutistua ja muodonmuutos on päinvastainen. /3./

Puulle tapahtuvat muodonmuutokset, kutistuminen ja turpoaminen, ovat anisotrooppiaisia. Tämä tarkoittaa sitä, että eri leikkaussuunnissa muodonmuutokset ovat erilaisia. Kuivattaessa tuore puu absoluuttisen kuivaksi, pituussuunnassa kutistuminen on 0,1–0,2 %. Säteensuuntainen muodonmuutos taas on n. 4 % ja tangentin suuntaan n. 8 %. Havupuilla anisotrooppinen muodonmuutos selittyy kesä- ja kevätpuun tiheyseroilla. Huokoisempi ja näin ollen

matalampitiheyksinen kevätpuu kutistuu enemmän. Tangentin suunnassa kutistuminen on voimakkaampaa, minkä vuoksi puu voi halkeilla kuivattaessa.  
/2./

### 3 PUUN MEKAANISIA OMINAISUUKSIA

Puun mekaanisiin ominaisuuksiin lukeutuvat muun muassa lujuus, kovuus ja jäykkyys. Tässä kappaleessa käydään läpi opinnäytetyön kannalta keskeisimpiä puun mekaanisia ominaisuuksia.

#### 3.1 Lujuus ja kimmokerroin

Puun lujuudella tarkoitetaan sen kykyä vastustaa siihen vaikuttavia voimia. Puu noudattaa ns. Hooken lakia, jonka mukaan materiaali palautuu alkuperäiseen muotoonsa kuormituksen lakattua, elleivät siihen vaikuttavat voimat ole ylittäneet tiettyä rajaa. Tätä rajaa sanotaan kimmorajaksi ja siihen asti muodonmuutos on palautuvaa. Kun kimmoraja ylitetään, siirrytään palautumattoman muodonmuutoksen alueelle. Kuormitusta jatkettaessa edelleen tulee piste, jossa kappale ei enää kestä kuormitusta ja murtuu. Pistettä kutsutaan murtorajaksi. /1, s. 208./

Kimmo- ja murtoraja tarkoittavat jännityksen määrää, joka kappaleeseen syntyy. Puun murtorajalla olevaa jännitystä kutsutaan yleisnimellä *murtolujuus*. Kimmomoduuli kuvaa kappaleen jäykkyyttä ja kertoo kuinka paljon taipumaa esim. palkkiin syntyy tietyllä kuormituksella. Taipuma onkin usein rajoittavampi tekijä mitoituksessa kuin murtolujuus. Taulukossa 1 on esitetty kimmomoduuleja eri puulajeille. /1, s. 208./

Taulukko 1. Puulajien kimmomoduulit

Puulaji	Kuiva-ilmakuiva tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Kimmomoduuli [N/mm <sup>2</sup> ]
Mänty	461	12700
kuusi	424	13700
Koivu	555	15100
Rauduskoivu	505	14500
Hieskoivu	480	13200
Haapa	429	13500

Puun lujuusominaisuudet ovat erilaiset syiden, säteen ja tangentin suunnassa. Myös lujuuden määrittystapa ja ulkoiset olosuhteet vaikuttavat saatuihin tuloksiin. Tämän vuoksi lujuutta määritettäessä käytetään mittausstandardeja, joiden avulla saadut tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. /1, s. 212./

Puun lujuuteen vaikuttavat olennaisesti sen tiheys, viat, lämpötila ja kosteus. Suurempi tiheys kasvattaa lujuutta. Tiheys on eniten vaikuttava tekijä lujuuden määrittämisessä. Erilaiset viat ja epäjatkuvuuskohtat alentavat puun lujuutta. Niistä kohdista kappale murtuu herkemmin. Lämpötilan alentuessa puun lujuus kasvaa. Taivutuslujuuden osalta absoluuttisen kuiva puu on kestäväintä. Taivutuslujuus siis alenee kosteuden kasvaessa. /1, s. 217- 221./

Taivutuslujuuden määrittäminen, mitä testataan tässäkin työssä, on eniten käytetty menetelmä puulle, koska sen avulla saatava lujuusarvo vastaa monen käyttösovelluksen kuormitustapaa. Taivutuslujuus mitataan kohtisuorasti pituus-suuntaa vastaan. Syiden suunnassa lujuus on alhainen. /1, s. 214./

### 3.2 Kovuus

Puun kovuudella tarkoitetaan sen kykyä vastustaa kiinteän kappaleen tunkeutumista puun sisään. Esimerkiksi Janka-kovuuden mittauksessa puuhun painetaan teräskuula siten, että se on työntynyt puolet kuulan halkaisijasta. Tunkeutumiseen vaadittava voima mitataan. Pallon muotoisen painimen lisäksi muissa kovuusmittaus menetelmissä käytetään myös kartiota, naulaa, neulaa kiilaa, prismaa tai sylinterin muotoista paininta. Yhteistä kaikissa menetelmissä on, että niissä mitataan puuhun muodostuvan painauman pinta-alaa tai voiman suuruutta, jolla saavutetaan halutun syvyinen tunkeuma. /1, s. 215./

Puulla kovuus on suurimmillaan syiden suunnassa. Suurta kovuusarvoa hyödynnetään esimerkiksi käyttämällä puun poikkileikkauspintaa lattiamateriaalina tiloissa, joissa lattia altistuu suurelle kuormitukselle. Männyllä, jota tässä opinnäytetyössä käytetään koemateriaalina, kovuus tangentin ja säteen suuntaisilla pinnoilla on noin puolet syy suunnasta. /1, s. 215./

## **4 PUUN LÄMPÖKÄSITTELY**

Puun lämpökäsittelyllä on pitkä historia. Ensimmäiset tieteelliset tutkimukset ulottuvat 1930-luvulle. Tutkimus on jatkunut tasaisesti läpi vuosikymmenten ja Suomessa lämpökäsittelyä ryhdyttiin tutkimaan tarkemmin 1990-luvulla. Tarkimmat ja kattavimmat tutkimukset onkin tehty juuri Suomessa VTT:n toimesta. Merkittävää käytännön testaustyötä ja prosessin kehittämistä on suoritettu YTI:ssä, joka toimi Mikkelin ammattikorkeakoulun alaisuudessa. /4./

### **4.1 Lämpökäsittelyn vaikutus ja prosessin kulku**

Puuta lämmitettäessä yli 150 °C lämpötiloihin sen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet muuttuvat. Yli 200 °C jälkeen muutokset korostuvat edelleen. Puu alkaessa hajota siitä poistuu monia uuteaineita. Samalla massa ja tasapainokosteus alenevat ja lämmöneristyskyky kasvaa. Lämpökäsittelyn muita aikaansaamia toivottuja muutoksia ovat mittapysyvyyden ja lahonkeston parantuminen. Myös puun väri muuttuu sitä tummemmaksi mitä korkeammassa lämpötiloissa se käsitellään. Huonona puolena lämpökäsittelyssä on jäykkyyden ja lujuusominaisuuksien heikkeneminen puussa. /5./

Puu ainesosia ovat hemiselluloosa, selluloosa ja ligniini. Ainesosat alkavat pilkkoutua ja hajota lämpötilan kasvaessa. Korkea lämpötila synnyttää puuhun etikkahappoa kemiallisten reaktioiden kautta. Etikkahappo taas pilkkoo selluloosan rakennetta pienemmiksi ketjuiksi. Selluloosan ja hemiselluloosan pitoisuus puussa laskee lämpötilan noustessa. Ne hydrolysoituvat sokereiksi kuten glukoosi ja ksyloosi. Hydrolyysillä tarkoitetaan kemiallista reaktiota, jossa yhdiste hajoaa sen lähtöaineiksi, kun reaktiossa on mukana vesi. Kolmas ainesosa, ligniini, hajoaa korkeammassa lämpötiloissa kuin hemiselluloosa ja selluloosa. /5./

Lämpökäsittelyprosessi suoritetaan pienessä ylipaineessa. Ylipaine synnyttää vesihöyryn avulla ja vesihöyry estää samalla puuta syttymästä, happipitoisuuden vähenemisen kautta. Puu syttyy itsestään noin 160 Celsiusasteissa. Taulukossa 2 on esitetty lämpökäsittelyprosessin kulku. /4./

Taulukko 2. Lämpökäsittelyprosessi

1. kuivaus (kuumakuivaus 100–135 °C)
2. lämpökäsittely (190–230 °C) – puu on lähes absoluuttisen kuivaa
3. tasaannutus (kosteuden palauttaminen puuhun käyttökosteutta vastaavaksi) – lämpökäsitellyllä puulla noin 4–8 %
4. jäähdytys – ennen puun ulosottoa
5. laadunvalvonta

Puun lujuuden heikkeneminen lämpökäsittelyn vaikutuksesta rajoittaa kaupallista käyttöä. Lämpöpuu ei sovellu kantaviin rakenteisiin. On tutkittu, että lujuuden aleneminen on suoraan verrannollista puun painohäviöön /5/. Taivutuslujuuden heikkeneminen ei ole yhtä voimakasta kuin veto- tai halkaisulujuuden. On myös havaittu, että taivutuslujuus laskee kuusella ja männyllä lineaarisesti lämpökäsittelyasteen mukaan; taivutuslujuuden aleneminen johtuu selluloosan hajoamisesta. Lisäksi taivutuslujuuden aleneminen kiihtyy lämpötilan kasvaessa yli 210 °C:een. /4./

Lämpökäsittelyn vaikutus puun kovuuteen on suurelta osin negatiivinen. Männyllä ja kuusella syitä vasten kohtisuora kovuus laskee lämpötilan noustessa. Koivulla kovuuden lasku ei ole yhtä voimakasta. Huomattavaa on, että syiden suuntainen kovuus kasvaa lämpökäsittelyn vaikutuksesta. /4./

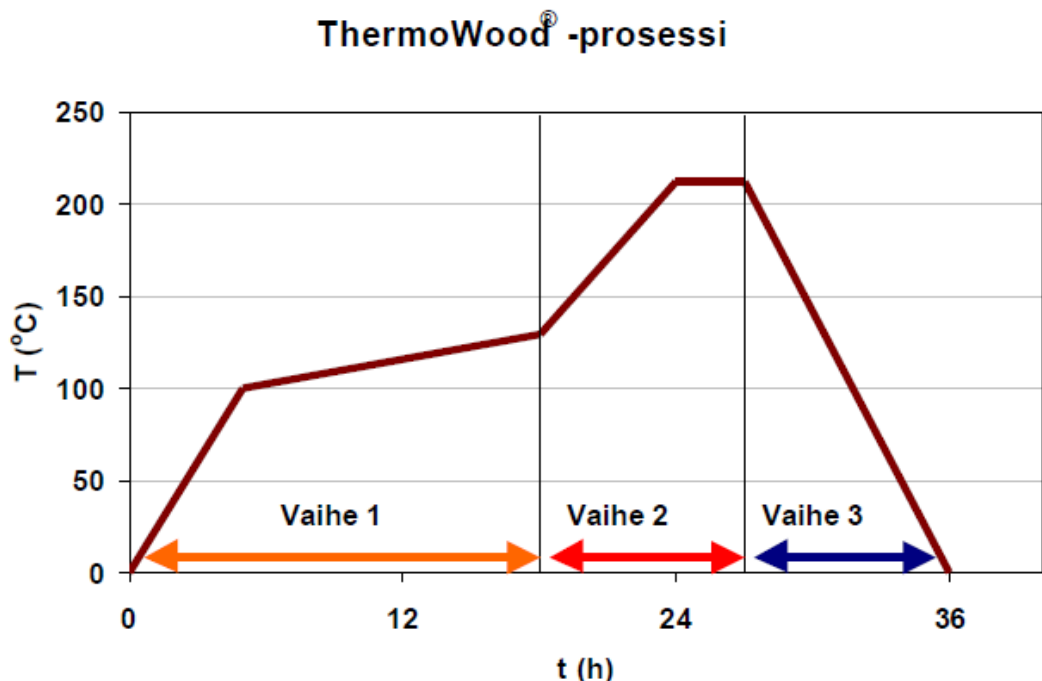
## 4.2 ThermoWood®

ThermoWood on Suomessa kehitetty lämpökäsittelymenetelmä. Prosessi on lisensoitu ja ThermoWood®- tavaramerkin käyttöoikeus on vain Lämpöpuuyhdistys ry:n jäsenillä. Prosessi on kehitetty VTT:n toimesta. ThermoWood -

prosessi jakaantuu kolmeen vaiheeseen (kuva 2). Ensimmäisessä vaiheessa kamarin lämpötilaa nostetaan nopeasti noin 100 °C:een. Lämmön nostoa jatketaan tasaisesti aina 130 C:een asti. Nostovaihetta kutsutaan kuuma-kuivaukseksi ja sen aikana puu muuttuu lähes absoluuttisen kuivaksi. /6./

Toisessa vaiheessa uunin sisälämpötila nostetaan 185–215 °C, riippuen käsittelystä. Kun tavoitelämpötila on saavutettu, sitä pidetään yllä 2-3 h, loppukäyttösovelluksesta riippuen. Toisessa vaiheessa puulle tapahtuu varsinainen lämpökäsittely. /6./

Kolmannessa ja viimeisessä vaiheessa uunin lämpötilaa lasketaan hallitusti vesisuihkun avulla noin 80–90 °C lämpötilaan. Tämän jälkeen puutavaralle tehdään vielä uudelleen kostutus, jonka avulla puun kosteuspitoisuus saadaan 4–7 % tietämille. Näin puuta voidaan jatkojalostaa helpommin eri käyttökohteisiin. /6./



Kuva 2. ThermoWood-prosessi

Raaka-aineena prosessissa voidaan käyttää tuoretta sahatavaraa tai uunikuivattua puuta. ThermoWood-menetelmä soveltuu sekä havu- ja lehtipuille. Niille on kuitenkin omat luokitukset, koska puulajien ominaisuudet eroavat toisistaan. /6./

Yleisiä lämpökäsittelyluokkia on kaksi. Ensimmäinen on Thermo-S. Kirjaintunnus tulee englannin sanasta *stability*, joka tarkoittaa stabiiliutta eli vakautta. Thermo-S – luokan puu keskimääräinen kosteuseläminen on tangentin suunnassa 6–8 %. Lahonkestoltaan se kuuluu EN 113 luokituksen mukaan kesto- luokkaan 3. Tummuudeltaan Thermo-S on vaaleampaa kuin korkeammassa lämpötilassa käsitelty Thermo-D. Thermo-S -laadun käsittelylämpötila on havupuilla 190 °C ja lehtipuilla 185 °C. /6./

Toinen käsittelyluokka on Thermo-D. Kirjaintunnus tulee sanasta *durability*, jolla tarkoitetaan kestävyyttä. Tummemmän ulkonäön lisäksi Thermo-D -laadulla on parempi biologinen kestävyys kuin Thermo-S -laadulla. Kosteuseläminen tangentin suuntaan on 5–6 %. EN 113 -standardin mukaisessa luokituksessa se kuuluu luokkaan 2. Thermo-D -laadun käsittelylämpötila on havupuilla 212 °C ja lehtipuilla 200 °C. /6./

### 4.3 Kuumavahakyllästysprosessi

Vahat koostuvat rasvahappojen estereistä ja korkeammista alkoholeista. Vahaa on käytetty jo tuhansia vuosia muuan muassa värien sidosaineena, laivanrakennuksessa sekä muumioinnissa. Vahalla on hyvä vedenhylkimiskyky, mihin perustuu osittain sen käyttö puunsuojauksessa. Lisäksi vahoilla voidaan parantaa kiinteän puun kovuutta ja lujuusominaisuuksia. Eri vahoilla on kuitenkin erilaiset vaikutukset edellä mainittuihin ominaisuuksiin eivätkä kaikki vahatyypit esimerkiksi paranna puun lujuutta. /7./

Kyllästysprosessissa käsittelyt suoritetaan korotetuissa lämpötiloissa yli- tai alipaineilla riippuen käytetystä menetelmästä. Yksi kaupallistettu vahakyllästysmenetelmä on NATwood®. Siinä puutavara asetetaan kammioon, johon siirretään sulassa tilassa olevaa vahaa lämmön ja paineen avulla. Prosessi kestää noin 30 minuuttia. Sulassa tilassa oleva vaha tunkeutuu paineen avulla puuhun. Tunkeuman syvyys riippuu puulajista, käytetyistä paineista, vahatyypistä ja pitoajasta. NATwood®-prosessissa käytetyt paineet vaihtelevat välillä 2-20 bar. /8./

#### 4.4 Hörylämpökäsittelyprosessi

Suljetussa kyllästysjärjestelmässä vesi alkaa höyrystyä lämmön vaikutuksesta eikä pääse karkaamaan sylinteristä pois. Vesihöyry on kylläistä, kun höyrystyvän ja takaisin tiivistyvän veden määrä on sama. Kylläisessä vesihöyryssä tiivistyminen on siis yhtä nopeaa kuin veden höyrystyminen. Kylläisen vesihöyryn paineen avulla voidaan nähdä lämpötila, joka vesihöyryssä vallitsee. /9./

Höyrylämpökäsittelyssä hyödynnetään korkeaa höyrynpainetta, jonka avulla lämpökäsittely tapahtuu. Tämän tyyppistä prosessia käytetään muun muassa WTT:n kehittämässä ThermoTreat 2.0 -kyllästyslaitteistossa, joka on kaupallistettua teknologiaa. Käsittely perustuu hydrolyysin prosessiin, ja siinä käytetään korkeaa painetta, jolloin ei tarvita korkeaa lämpötilaa hyvien ominaisuuksien aikaan saamiseksi puuhun. Puutavaraa ei tarvitse esikuivata. Vaadittu prosessilämpö tuotetaan polttamalla kaasua tai öljyä kattilassa, joka lämmittää öljyä. Kuuma öljy kiertää lämmittäen kyllästysylintereitä ja toimii myös jäähdytyksessä siirtäen lämpöä jäähdyttimeen. Kuvassa 3 on havainnollistettu eri lämpötilojen vaikutusta menetelmällä tuotettuun puutavaraan. /10./



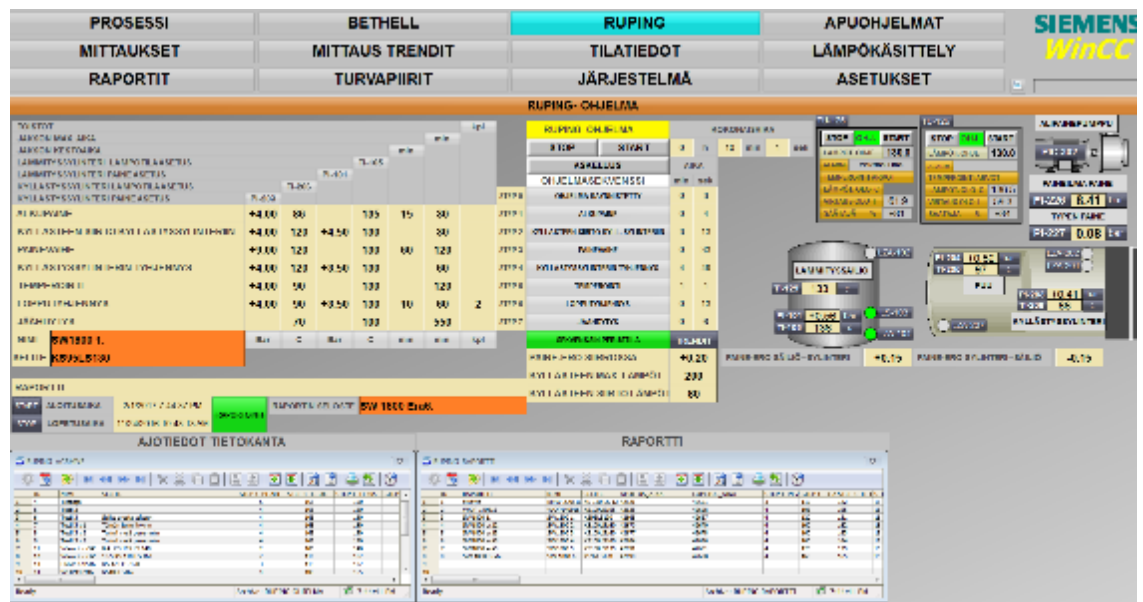
Kuva 3. WTT ThermoTreat 2.0- menetelmällä käsitelty puutavara

Höyrylämpökäsittelyssä tarvittava höyry voidaan myös johtaa kyllästysylintereihin, jolloin lämpökäsittely tapahtuu johdetun höyryn paineen ja lämmön vaikutuksesta sekä toimii samalla suojakaasuna prosessissa estämällä hapettumisreaktioita. Korkeassa höyrynpaineessa tapahtuvia käsittelyjä kutsutaan hygrotermisiksi prosesseiksi. /11, s.101./



## 5 LAITTEISTO JA KOEMATERIAALIN VALMISTUS

PUMOK-hankeparin aikana Mikkelin Ammattikorkeakoulun (nykyisen Kaakois-Suomen ammattikorkeakoulun) puutekniikan laboratoriolle suunniteltiin ja rakennettiin koelaitteisto, jolla tutkittiin erilaisia vahakyllästyksiä puulle. Laitteiston pääkomponentteina toimivat kyllästysylinteri, typpigeneraattori, alipainepumppu, kompressori, lämmityssäiliö ja erillinen temperointiyksikkö, joka vastaa lämmöntuotosta. Sylinterien lämmitys tapahtuu niiden vaipassa kiertävän öljyn avulla, jonka temperointiyksikkö lämmittää. Vahojen siirrossa käytetään siirtoputkea, joka on esilämmitetty asentamalla putken päälle lämmityskaapeli ja eristys. Putkistoissa on sekä manuaalisia että automaattiohjauksella toimivia venttiilejä. Kyllästysylinterissä ja lämmityssäiliössä on antureita, jotka ilmaisevat säiliöiden täyttöasteen. Laitteistoa ohjataan erillisen käyttöliittymän avulla, jolla voidaan säätää yksityiskohtaisesti kaikkia tarvittavia prosessiparametreja sekä suorittaa koeajoja joko automaattiohjauksella tai käsiajolla (kuva 4). /12./



Kuva 4. Käyttöliittymän säätöarvot

Mekaanisia testejä varten vahakoekappaleille oli jo osittain koemateriaalia hyllyssä. Koemateriaalit olivat PUMOK-hankeparin kyllästyksissä tuotettuja ja koostuivat kahdella eri vahatyypillä, kahdessa eri lämpötilassa ajetuista eristä.

Vahatyypit olivat WARADUR® OP- ja SW-1800 -kynttilävaha. Kyllästyskäsitteilyiden lämpötilat olivat WARADUR® OP -vahalla 160 °C ja 140–130 °C. SW-1800 kynttilävahalla lämpötilat olivat 160 °C ja 120 °C. Käsitelymateriaalina oli tavallinen mänty sekä Thermo-D- käsitelty puu. Referenssimateriaalina toimi Thermo-D -laatu ja normaali mänty. Loput vaadittavat koemateriaalit vahakoekappaleille tehtiin ajamalla lisää testiajoja kyllästyslaitteistolla. Samalla pääsin näkemään konkreettisesti, miten ajot suunnitellaan ja suoritetaan sekä sain tarkempaa tietoa kuumavahaproessin kulusta.

Höyrylämpökäsittelyille ei ollut vielä aikaisempaa koemateriaalia. Aalto-yliopistossa oli tehty pienen mittakaavan testiajoja, joita oli tarkoitus testata isomassa mittakaavassa. Opinnäytetyöhön sisällytettäviä ajoja olivat 100 % suhteellisella kosteudella olevan höyryn paineella suoritettava käsittely, jossa lämpötila ja paine noudattavat kylläisen höyryn taulukkoarvoja. Koeajossa oli mukana sekä tuoretta että hallikuivaa sahatavaraa. Vertailumateriaaliksi suoritettiin lämpökäsittely ilman höyrynpainetta, joka vastasi suurelta osin perinteistä lämpökäsittelyprosessia. Ajoista saatavan koemateriaalin lujuusominaisuuksia testattiin taivutus- ja iskulujuuskokeilla. Saatuja tuloksia vertailtiin keskenään.

## **5.1 Kuumavahakyllästykset**

Saatavilla olevasta valmiista koemateriaalista valittiin eri mekaanisiin testeihin soveltuvat koe-erät ja niistä valmistettiin puutekniikan laboratorion laitteilla testistandardien määrittelemät koot ja testierät. Valmistuksen jälkeen koemateriaalit laitettiin tasaantumaan standardien mukaiseen ilman suhteelliseen kosteuteen ja lämpötilaan (kuva 5). Osa standarditesteistä tehtiin sovellettuna, koska vahakoekappaleille ei ollut omia testistandardeja ja saatavilla oleva koemateriaali ei vastannut täysin standardin määäämiä mittoja ja määriä kappaleille. Pyrkimyksenä oli kuitenkin saada jokaiseen testaukseen vähintään 10 koekappaletta, jotta tulokset olisivat riittävän tarkkoja.



Kuva 5. Koekappaleet tasaantumassa olosuhdekaapissa, RH 65 % ja T20 °C

Loput mekaanisiin testeihin vaadittavat vahakoekappaleet valmistettiin teke­ mällä uusia koeajoja kyllästyslaitteistolla. Kuumakyllästysprosessi aloitettiin li­ säämällä kynttilävahaa lämmityssylinteriin niin, että sitä oli noin 200 kg sylinte­ rissä. Vahan sekaan kaadettiin mustaa väripigmenttiä noin 2 kg. Väripigmentin tarkoitus oli selvittää, tunkeutuuko se riittävästi puuhun ja jääkö pigmentti py­ syvästi puuhun kyllästyksen jälkeen. Kynttilävahalla ei ole luontaisesti UV-sä­ teilyn kesto, joten mustan värin lisääminen voi parantaa sitä.

Vahaseoksen saattaminen sulaan tilaan lämmön avulla kesti noin vuorokau­ den. Kyllästys­sylinteriin asetettiin halutut koemateriaalit käsittelyä varten. Syl­ linteri suljettiin tiivisteen ja pulttien avulla. Lukitus varmistettiin erillisen suoja­ kuoren ja manuaalisen lukitussalvan avulla. Näin sylinteriä ei saanut auki kes­ ken ajon eikä kuumaan luokkuun voinut koskea.

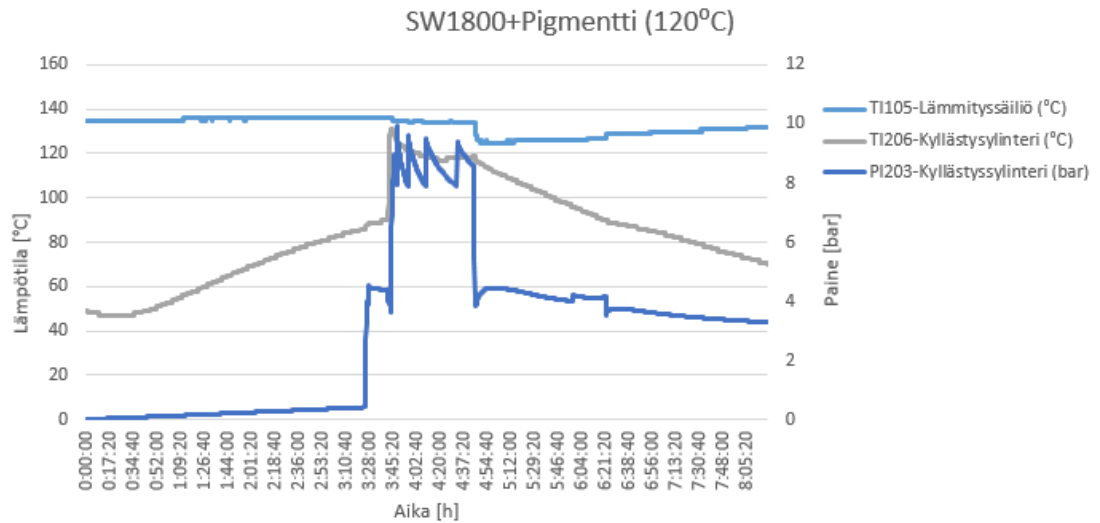
Kyllästys­sylinterin lämpötilaa nostettiin hallitusti vaiheittain. Kun lämpötila oli riittävä, sylinteriin luotiin painetta typen avulla. Typpi toimi samalla suojakaa­ sun prosessissa ja esti koemateriaalin syttymisen. Painetta siirrettiin vaiheit­ tain siirtoputkea pitkin lämmityssäiliöön. Lämmityssäiliön ja kyllästys­sylinterin paine-erojen avulla vaha kierrätettiin lämmityssäiliöstä sylinteriin ja sieltä ta­ kaisin säiliöön. Tällä varmistuttiin, että väripigmentti oli varmasti sekoittunut ta­ saisesti vahaan. Varsinainen vahakäsittelyprosessi suoritettiin Rüping-proses­ sin mukaisesti. Siihen kuuluu alkupaine, siirtovaihe, painevaihe, sylinterin tyh-

jennys, temperointi, lopputyhjennys ja jäähditys. Rūping-prosessin alkupai-  
neen aikana ilma painuu puun solukkaan. Painevaiheen aikana vaha tunkeu-  
tuu puuhun, puristaen solukossa olevan ilman kokoon. Paineen tasaantuessa,  
solukossa oleva ilma alkaa taas laajentua ja työntää ylimääräisen vaha pois  
puun solukosta. Kyllästysylinterin lämpötilan laskiessa alle 70 °C, sylinterin  
luukku voitiin avata (kuva 6). /13, s. 30./



Kuva 6. Koemateriaalia 120 °C vahakyllästyksessä kynttilävahalla

Vahakyllästysprosessit suoritettiin 120 °C ja 160 °C lämpötiloissa. Kuvassa 7  
on esitetty 120 °C lämpötilassa tehdyn kynttilävahakyllästyksen prosessiku-  
vaaja.



Kuva 7. 120 °C vahakäsittelyn prosessikuvaaja

Kuvaajasta näkee, että varsinainen vahakäsittely alkaa kohdasta 3:45:20 ja prosessi loppuu lämpötilan laskiessa alle 70 °C, jolloin kyllästysylinterin luukun voi avata.

Taivutus- ja iskutkeystesteihin menevät koemateriaalit olivat kyllästyksissä 20 x 20 x 2000 mm tankoina, joista katkaistiin halutun mittaiset koekappaleet kyllästyksien jälkeen. Taber-kulutuskokeen mäntykappaleet valmistettiin ennen kyllästyksiä standardin mukaisesti 100 x 100 x mm mittoihin paksuuden ollessa laitteistoon sopiva 20 mm. Syy tähän oli, että saatavilla oleva muu mäntykoemateriaali ei ollut riittävän levyistä testiä varten. Kaikki muu koemateriaali oli kyllästyksissä pitkänä tavarana ja testien vaatimat kappalekoot valmistettiin kyllästyksien jälkeen.

## 5.2 Höyrylämpökäsittely

Lämpöpuuhankkeen höyrylämpökäsittelyiden ideana on parantaa lämpöpuun ominaisuuksia siten, että lujuusominaisuudet eivät heikkene prosessin aikana liikaa. Pyritään siis saamaan lämpöpuulle riittävä mittapysyvyys ja lujuus sekä biologinen kestävyys. Olennaisessa osassa prosessissa on veden kiinnittyminen puuhun. Pyritään vähentämään puussa olevia avoimia hydroksyyliiryhmiä ja tätä kautta puun tasapainokosteus laskee. /14, s. 265./

Lämpöpuuhankkeessa tutkitaan myös sarveistumiseksi kutsuttua muutosta puun hienorakenteessa. Siinä selluloosan hienorakenne muuttuu palautumattomasti, jolloin veden sitoutuminen puuhun vähenee. Lämpöpuuhankkeessa tehdäänkin höyrylämpökäsittelyjä sekä tuoreelle että hallikuivalle puulle. Tuoreessa puussa sarveistumista ei ole vielä ehtinyt tapahtua ja sen vaikutusta lämpöpuuprosessiin voidaan vielä säädellä. /14, s. 265./

Tähän opinnäytetyöhön sisällytettiin koemateriaalien taivutus- ja iskutkeys-kokeet, jotka suoritettiin samojen standardien mukaisesti kuin vahakyllästyk-sissä. Suoritettavina koeajoina oli lämpökäsittely normaalissa ilmanpaineessa ja höyrylämpökäsittely kylläisen höyrynpaineen avulla.

### **5.2.1 Lämpökäsittely/ kuumakuivaus normaalissa ilmanpaineessa**

Ensimmäisessä vaiheessa kyllästyslaitteistolla suoritettiin lämpökäsittely, jossa lämpötila oli 160 °C ja pitoaika 3 tuntia. Paineena toimi normaali ilmanpaine. Käsittelyssä ei käytetty ollenkaan vesihöyryä, jolloin pystyimme vertaamaan näitä kappaleita vesihöyryn avulla käsiteltyihin koekappaleisiin ja näimme konkreettisesti, onko vesihöyrykäsittelyllä vaikutusta puun lujuusominaisuuksiin. Koemateriaalina toimi hallikuiva mänty ja kappalekoot määräytyivät standardien mukaisesti.

Koemateriaaleille tehtiin normaalit alkuvalmistelut ja niiden mitat ja kappalekoot kirjattiin ylös. Koemateriaali asetettiin kyllästysylinteriin ja kuorman paksumpaan kappaleeseen porattiin reiät puun sisälämpötila- ja paineanturia varten. Anturien asentamisen jälkeen kyllästysylinteri suljettiin tiiviisti ja lämpötilaa nostettiin kokeen vaatimalle tasolle. Lämpökäsittelyjakson jälkeen kyllästysylinteri jäähdytettiin hallitusti, jonka jälkeen se voitiin avata. Koekappaleet punnittiin lämpökäsittelyn jälkeen ja työstettiin testien vaatimiin mittoihin.

Testikappaleet vaativat tasaannutusjakson, jotta kosteuspitoisuus saatiin riittäväälle tasolle. Koekappaleet tasaannutettiin olosuhteissa, joissa lämpötila oli  $20 \pm 2$  °C ja ilman suhteellinen kosteus  $65 \pm 5$  %.

### 5.2.2 Käsittely RH 100 % höyrynpaineella

Kylläisessä höyrynpaineessa suoritettuna lämpökäsittelyprosessin koemateriaalina oli hallikuivaa ja tuoretta sahatavaraa. Hallikuiva koemateriaali oli leveydeltään ja paksuudeltaan valmiiksi oikeissa mitoissa testejä varten. Juuri sahalla tuotua sahatavaraa ei työstetty testimittoihin ennen käsittelyä. Koemateriaalit punnittiin ennen käsittelyä ja dimensiot kirjattiin ylös. Koemateriaalin kosteus mitattiin käyttämällä Hydromette M2050 -kosteusmittaria. Mittarin piikkianturit iskettiin puuhun, ja laite ilmoitti mittauskohdan kosteusprosentin. Koeerään kiinnitettiin paine- ja lämpötila-anturi, jotta nähtiin, missä lämpötilassa ja paineessa puun sisäosa on käynyt.

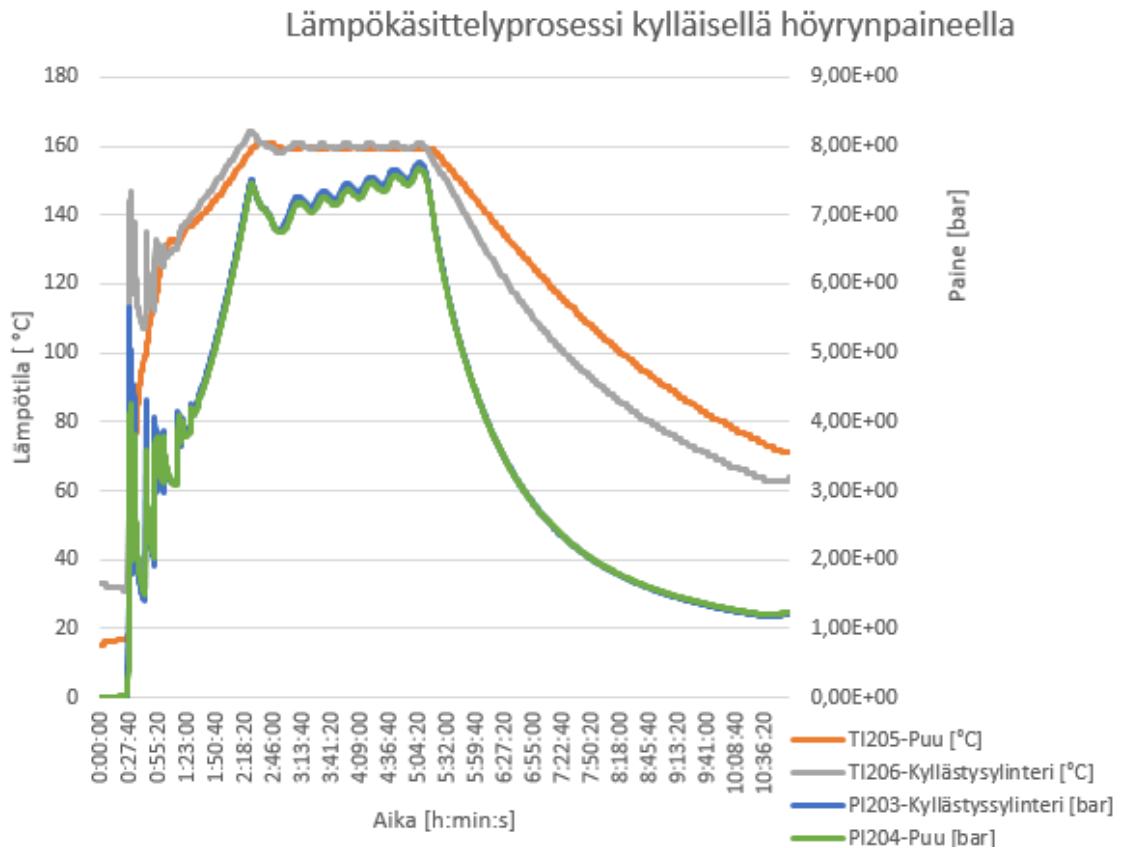
Luukun sulkemisen jälkeen kyllästysylinterin vaipassa kiertävää öljyä alettiin lämmittää temperointiyksikön avulla. Käsittelyyn vaadittava kylläinen vesihöyry oli synnytetty valmiiksi laitteiston lämmityssäiliöön. Höyryn lämpötila oli noin 180 °C ja paine 9,6 bar. Kyllästyssylinterin tavoitelämpötilaksi asetettiin 160 °C. Lämmityssäiliössä olevaa höyryä siirrettiin vähitellen kyllästyssylinteriin. Kun kyllästyssylinteri oli lämmennyt tavoitelämpötilaan ja varmistuttiin että sylinterin paine oli kylläisen höyrynpaineen mukainen, alkoi varsinainen 3h lämpökäsittelyjakso. Jakson jälkeen sylinteri jäähdytettiin alle 70 °C ja luukku voitiin avata (kuva 8).



Kuva 8. Tuore sahatavara höyrylämpökäsittelyn jälkeen

Höyrylämpökäsittelyn jälkeen kaikki koemateriaali kuivattiin puutekniikan laboratorion kuivaamolla, koska niiden kosteuspitoisuus oli hyvin suuri. Kuivauserän mukana oli myös tuoretta mäntysahatavaraa, joka meni muuhun käyttöön. Koko erän kuivausjakso kesti noin 6 vuorokautta, ja se suoritettiin riittävän hitaasti. Näin välttyttiin puutavaran turhalta vääntyilyltä ja halkeilulta. Kuivauksen jälkeen koemateriaalit työstettiin testien vaatimiin mittoihin. Kuvassa 9 on esitetty höyrylämpökäsittelyprosessin kulku.





Kuva 9. Höyrylämpökäsittelyprosessi

Kuvasta ilmenee, että puu on pysynyt tasaisesti 160 °C:een lämpötilassa koko lämpökäsittelyvaiheen ajan. Kyllästysylinterin paine on yli vaadittavan painearvon, jolloin sylinterissä oleva höyry on ollut varmasti kylläistä. Painearvojen kuvaajissa oleva vaihtelu johtuu höyrytysjaksoista. Lämmityssylinteristä päästettiin painetta jaksoittain kylästysylinteriin ja paine nousi sylinterissä vähitellen.

## 6 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä osiossa on selitetty kaikki opinnäytetyössä käytetyt testaukset. Lähteinä on käytetty testimenetelmien standardeja.

### 6.1 Taivutuslujuuden ja kimmokertoimen määrittäminen

Taivutuslujuuden ja kimmokertoimen mittaaminen tapahtuu standardin EN 408 mukaisesti. Kaikki testiä varten valmistetut koekappaleet tasaannutetaan ennen testiä olosuhteissa, joissa lämpötila on  $20 \pm 2$  °C ja ilman suhteellinen

kosteus  $65 \pm 5$  %. Kappaleiden katsotaan olevan tasaantuneita, kun kahden 6h välisen punnituksen paino ei poikkea yli 0,1 %. /14./

Taivutuslujuuden ja kimmokertoimenmääritys tapahtuu 4-pistetaivutuksena. Koekappaleet asetetaan yksinkertaisesti tuettuna ja symmetrisesti kahden tuen väliin, joiden jänneväli on vähintään 18 kertaa kappaleen korkeus. Kappaleen ja sitä kuormittavien kärkien väliin voidaan asettaa teräslaatat, joiden pituus on maksimissaan puolet koekappaleen korkeudesta. Laatoilla estetään mahdollinen kuormituskärkien uppoaminen kappaleeseen. /15./

Kappaletta kuormitetaan keskeltä kahdella kuormituskärjellä, joiden jänneväli on kuusinkertainen kappaleen korkeuteen nähden. Kuormitusnopeus on tasainen ja maksimikuorma ( $F_{max}$ ) täytyy saavuttaa  $300 \pm 120$  s ajassa.

Kuormitusnopeus ei saa ylittää 0,06 mm/s. Muodonmuutos ( $w$ ) mitataan kappaleen jännevälin keskeltä missä se on suurin. Muodonmuutoksen mittaukseen käytetään tässä opinnäytetyössä puikkoanturia, joka on sijoitettu kappaleen yläpuolelle. /15./

Taivutuslujuus voidaan laskea yhtälöstä 2.

$$f_m = \frac{3 \times F \times a}{b \times h^2} \quad (2)$$

jossa	$f_m$	taivutuslujuus	[N/mm <sup>2</sup> ]
	$F$	maksimikuorma	[N]
	$a$	etäisyys kuormituskärjeltä tuelle	[mm]
	$b$	koekappaleen leveys	[mm]
	$h$	koekappaleen korkeus	[mm]

Saadut tulokset taltioidaan ja mahdolliset koekappaleiden poikkeavuudet maksimikuormassa kirjataan ylös. /15./

## 6.2 Brinell-kovuus

Testaus suoritetaan standardin EN 1534 mukaisesti. Standardi on tarkoitettu lattiapäällysteiden testaukseen, joten sitä joudutaan soveltamaan. Ennen testiä kaikki koekappaleet tasaannutetaan olosuhteissa, joissa lämpötila on  $20 \pm 2$  °C ja ilman suhteellinen kosteus  $65 \pm 5$  %. /16./

Brinell-kovuustestissä karkaistu teräskuula, halkaisijaltaan  $10 \pm 0,01$  mm, painetaan koekappaleen pintaa vasten noin 1 kN voimalla. Painaminen täytyy tapahtua siten, että voima saavutetaan  $15 \pm 3$  sekunnin sisällä. Kappale altistetaan 1 kN voimalle  $25 \pm 5$  sekunnin ajan, jonka jälkeen teräskuula nostetaan kappaleen pinnasta pois kokonaan. /16./

Kuulan poistamisen jälkeen kappaleen annetaan tasaantua noin 3 minuutin ajan. Syntyneen kuopan halkaisija mitataan syiden suuntaisesti ( $d_1$ ) sekä kohtisuoraan syitä ( $d_2$ ), tarkkuudella  $\pm 0,2$  mm. /16./

Jokaiselle mittaukselle määritetään Brinell-kovuus yhtälön 3 mukaisesti.

$$HB = \frac{2 \times F}{g \times \pi \times D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

jossa	HB	Brinell-kovuus	[N/mm <sup>2</sup> ]
	$g$	putoamiskiihtyvyyys 9,81	[m/s <sup>2</sup> ]
	$\pi$	Pii vakio 3,14	[-]
	$F$	maksimivoima	[N]
	$d$	keskiarvo tuloksista $d_1$ ja $d_2$	[mm]
	$D$	teräskuulan halkaisija	[mm]

Mittaukset täytyy suorittaa joko koekappaleen keskialueelta tai siten, että ne on jaettu kaikkialle koekappaleen pinnassa. Jos koekappale on yli 200 mm pitkä, siitä voidaan ottaa kaksi eri mittausta. Alle 200 mm kappaleista otetaan vain yksi mittaus. Etäisyys mittauskohdan keskeltä kappaleen reunaan tai oksaan ei saa olla alle 20 mm. /16./

Kuitenkin, jos kappaleen leveys on alle 40 mm, voidaan mittaus suorittaa pitkittäisen sivun akselin mukaisesti. Standardi määrittelee siten, että testikappaleiden lukumäärä tulee olla suhteutettuna mittauksien määrään. Joka käsitteilyssä täytyy olla vähintään 50 mittausta. /16./

### **6.3 Janka-kovuus**

Janka-kovuuden mittaus suoritetaan standardin ASTM D143 mukaisesti. Kovuuden mittauksessa käytetään teräskuulaa, jonka halkaisija on 11,3 mm ja sen pinta-alaksi tulee näin ollen 1 cm<sup>2</sup>. Varsinaisessa testissä teräskuulaa painetaan kappaleeseen niin kauan, että se on uponnut puolet sen halkaisijasta. Tarkka uppoaman mittaaminen tapahtuu joko elektronisesti tai kappaleen pintaan kiristetyn kauluksen avulla. /17./

Mittauksia suoritetaan tangentiaaliselle ja säteensuuntaiselle pinnalle kullekin kaksi kappaletta sekä kumpaankin päätyyn yksi mittaus. Ei ole määrätty, mille tangentiaaliselle tai säteensuuntaiselle pinnalle mittaukset tehdään, kuitenkin siten, että kappaleesta saadaan keskimääräisiä tuloksia. Mittaukset tulee tehdä riittävän kaukana reunasta, jottei puu halkea mittauksessa. /17./

Teräskuulan täytyy upota kappaleeseen nopeudella 6 mm/min. Käytetystä nopeudesta saa poiketa korkeintaan 25 %. Jos nopeus jotain syystä muuttuu, tulee uusi käytetty nopeus ilmoittaa tuloksissa. /17./

Koekappaleet tulee punnita heti ennen testiä. Testin jälkeen koekappaleista sahataan kosteuskappale, joiden pituus on 25 mm. Punnituksissa tarkkuuden pitää olla vähintään 0,2 %. /17./

### **6.4 Taber-kulutuskoe**

Kulumisenkeston testaaminen suoritetaan Taber -testauslaitteistolla, joka on EN ISO 7784-1 standardin mukainen. Standardi on suunnattu pinnoitteiden testaamiseen, joten sitä sovelletaan lämpöpuuhun. Ennen testiä kaikki koekappaleet tasaannutetaan olosuhteissa, joissa lämpötila on  $20 \pm 2$  °C ja ilman suhteellinen kosteus  $65 \pm 5$  %. /18./

Testissä kaksi eri akselilla varustettua kumista valmistettua pyörää, joihin on liimattu hiomapaperi, asetetaan epäkeskisesti koekappaleen pinnalle. Kumipyöriin on asetettu painoa 1 kg kummallekin pyörälle. Koekappale on pultattu kiinni alustaan, joka pyörii sovitun määrän kierroksia. Tässä testissä kierros-  
määrä on 1000. Kumipyörät jauhavat kierrosten aikana kappaleen pintaan renkaanmuotoisen uran ja kappaleesta irtoava aines imuroidaan pois pinnalta. Etäisyys kappaleen reunasta renkaan muotoiselle uralle saa olla minimissään 7 mm. /18./

Testi suoritetaan kolmelle eri koekappaleelle. Ennen testiä kappaleet punnitaan 0,1 mg tarkkuudella. Testin jälkeen kappaleet putsataan nukkaamattomalla liinalla ja kappaleet punnitaan 0,1 mg tarkkuuteen. /18./

Jokaiselle kolmelle koekappaleelle lasketaan massahäviö ja kolmen koekappaleen massahäviöiden keskiarvo. Massahäviöt ja keskiarvo ilmoitetaan 1 mg tarkkuudella. /18./

## 6.5 Ruuvien vetotesti

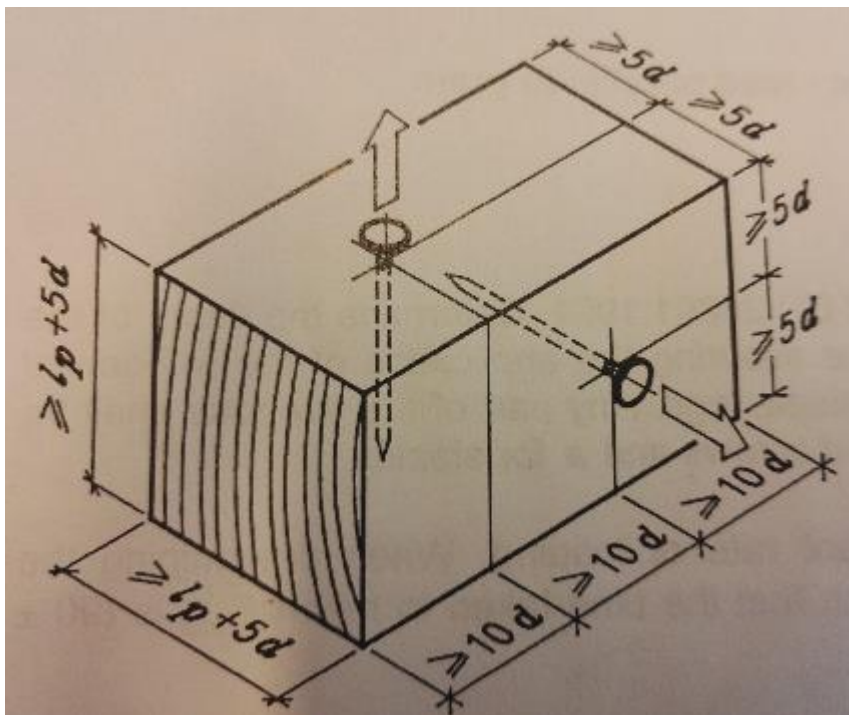
Ruuvien pysyvyyttä arvioidaan standardin EN 1382 mukaisesti. Testin ideana on porata koekappaleisiin ruuvi, joka vedetään kappaleesta irti ja irrottamiseen vaadittava voima mitataan. Koekappaleiden mitat määräytyvät ruuvien kierteiden välisen osan halkaisijan ja koekappaleeseen uppoavan kierresyvyuden mukaan. Ruuveja varten kappaleisiin porataan tässä esireiät, jotta vältytään kappaleiden mahdolliselta halkeamiselta ruuveja kiinnitettäessä. /19./

Kappaleiden leveys ja pituus tulee olla vähintään yhtälön 4 suuruiset.

$$I_p + 5 \times d \quad (4)$$

jossa	$I_p$	uppoavan kierreosan syvyys	[mm]
	$d$	ruuvien kierteiden halkaisija	[mm]

Ruuvien kohdistamisessa täytyy noudattaa alla olevan kuvan 7 minimietäisyyksiä kappaleen reunoista (kuva 10). /19./



Kuva 10. Ruuvien kohdistaminen kappaleeseen

Kappaletta kuormitettaessa etäisyys ruuvien keskeltä tuelle saa olla minimissään 3 x ruuvien halkaisijan verran. Vetotesti pitää suorittaa tasaisella nopeudella ja maksimikuorma täytyy saavuttaa  $90 \pm 30$  s. /19./

Joka vetokokeesta määritetään vetoparametri  $f$  yhtälön 5 mukaisesti.

$$f = \frac{F_{max}}{d \times l_p} \times 10^3 \quad (5)$$

jossa	$f$	vetoparametri $f$	[N/mm <sup>2</sup> ]
	$F_{max}$	maksimivoima	[N]
	$d$	ruuvien halkaisija	[mm]
	$l_p$	koekappaleen leveys	[mm]

Ennen testiä kaikki koekappaleet tasaannutetaan olosuhteissa, joissa lämpötila on  $20 \pm 2$  °C ja ilman suhteellinen kosteus  $65 \pm 5$  %. /19./

## 6.6 Iskulujuuden määrittäminen

Charpy -iskulujuuden määrittäminen tapahtuu standardin EN ISO 179-1 mukaisesti. Testissä vaakasuoraksi palkiksi tuettu koekappale isketään rikki heiluriva-saralla. Koekappaleen iskeminen absorboi energiaa, jonka suuruuden Charpy-iskulujuuskoelaitte taltioi. /20./

Kappaleen absorboiman energian ja koekappaleen mittojen avulla voidaan laskea Charpy-iskulujuus yhtälön 6 mukaisesti.

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \times b} \times 10^3 \quad (6)$$

jossa	$a_{cU}$	Charpy-iskulujuus	[kJ/m <sup>2</sup> ]
	$E_c$	koekappaleen absorboima energia	[J]
	$h$	koekappaleen paksuus	[mm]
	$b$	koekappaleen leveys	[mm]

Ennen testiä kaikki koekappaleet tasaannutetaan olosuhteissa, joissa lämpötila on  $20 \pm 2$  °C ja ilman suhteellinen kosteus  $65 \pm 5$  %. /20./

## 7 TUTKIMUSTULOKSET JA VERTAILU

Tässä kappaleessa on selostettu työn eteneminen ja testeistä saatuja tuloksia on havainnollistettu kuvien avulla. Tarkemmat testitulokset on koottu liitteisiin ja vain keskiarvotuloksia on analysoitu tekstissä havainnollistamisen helpottamiseksi.

### 7.1 Vahakoekappaleiden EN 408 -taivutuskoet

Kynttilävahalla käsitellyt koekappaleita pidettiin olosuhdekaapissa noin viikko, jonka jälkeen niille suoritettiin taivutuskoet EN 408 -standardin mukaisesti. WOP-vahalla käsitellyt koekappaleet ja referenssimateriaali olivat olosuhdekaapissa yli kaksi viikkoa. Ennen testiä kappaleet punnittiin tiheyden

määrittämiseksi (liite 1). Taivutustestaus suoritettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun materiaalitekniikan laboratoriossa Shimadzu Autograph -kuormituskehällä. Testaus tapahtui 4-pistetaivutuksena ja koekappaleen taipuma mitattiin puikkoanturin avulla (kuva 11).



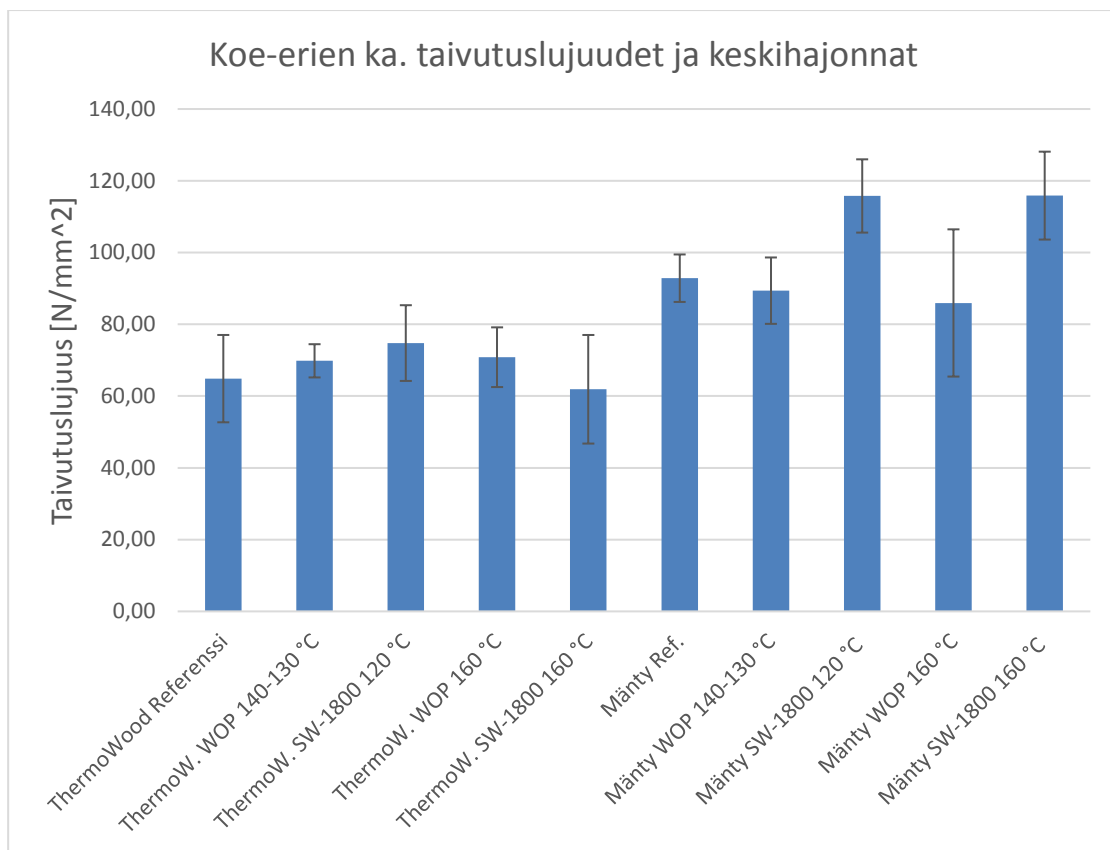
Kuva 11. Koekappaleen 4-pistetaivutus kuormituskehällä

Testiä ohjattiin Trapezium-ohjelmalla, jonne syötettiin kappaleen leveys ja paksuus sekä muut tarvittavat parametrit. Ohjelma laski suoraan jokaiselle kappaleelle murtolujuuden, kimmokertoimen ja testiajan. Kimmokertoimen määrittämistä varten piti huolehtia, että ohjelma otti taipuman ja voiman arvot standardin mukaisesti alueelta  $0,1 - 0,4 \times F_{max}$ . Mittausaluetta voitiin säätää testin aikana. Kuormitusnopeutta säädettiin testiajan perusteella, jotta pysyttiin standardin määrittämässä aikarajassa.

Taivutustestaukset suoritettiin kohtisuoraan syitä vasten ja sydänpuun puolelta. Koekappaleiden mitat olivat 20 x 20 x 380 mm. Kuormitusnopeudet vaihtelivat eri testeissä välillä 1,5–2,5 mm/min.

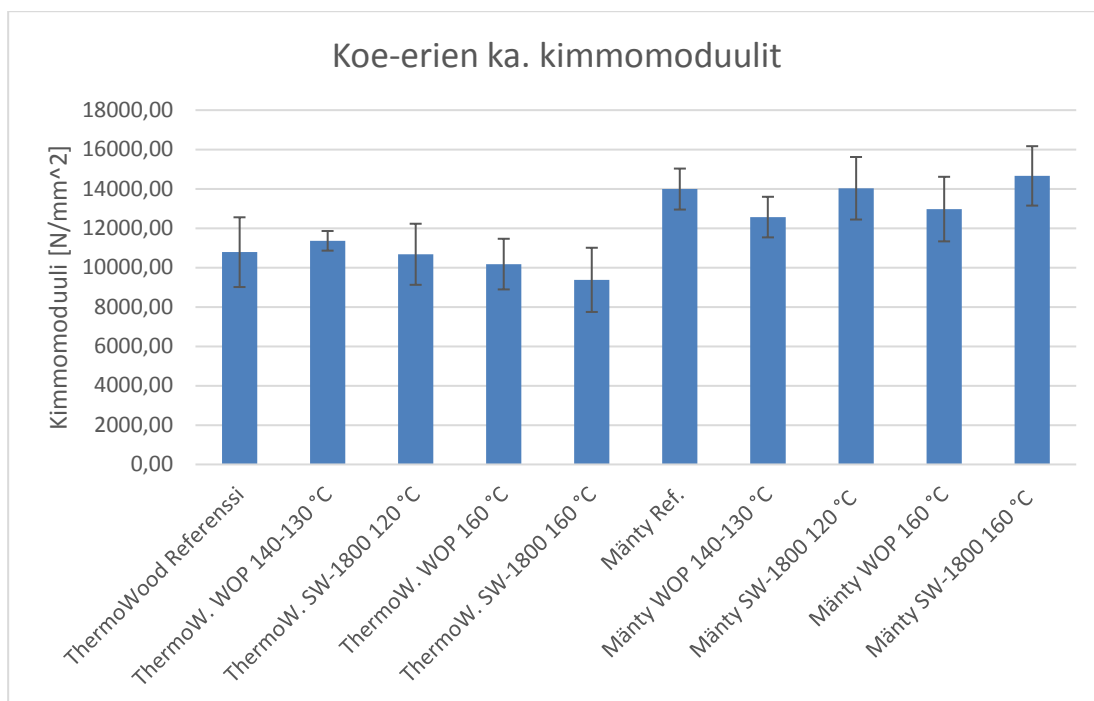


Saaduista tuloksista laskettiin eräkohtaiset keskiarvot, joissa ei huomioitu viallisia kappaleita (kuva 12). Osassa koekappaleista oli oksia tai ne olivat sahattu juuri oksan vierestä, joten lujuus jäi verrattain alhaiseksi.



Kuva 12. Ka. taivutuslujuudet ja keskihajonnat eräkohtaisesti

Saadut taivutuslujuudet vaihtelivat runsaasti koe-erien välillä. 160 °C WOP-vahakappaleet oli testattu jo viime kesänä, joten arvot on lisätty tähän työhön vertailun vuoksi. Kaikilla muilla ThermoWood-kappaleilla lujuus kasvoi vahoilla, lukuun ottamatta 160 °C SW-1800 -käsittelyä. Lujuuden muutokset eivät olleet suuria. Mäntykappaleilla lujuus laski vahatyypin ollessa WOP eli WARADUR® OP. Viime kesänä testattujen erien testausajankohdan aikaisia kosteusprosentteja ei ole tiedossa, joten kosteuden vaikutusta lujuuteen on vaikea arvioida. SW-1800 -kynttilävahalla lujuus kasvoi merkittävästi kummasakin lämpötilassa. Keskihajonnaltaan suurin koe-erä oli WOP 160 °C mäntykappaleet. Taivutuskokeista saadut kimmomoduulien arvot on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Koe-erien ka. kimmomoduulit ja keskihajonnat

ThermoWood-kappaleilla korkeampi käsittelylämpötila laskee kimmomoduulia kummallakin vahatyypillä. Alemmassa lämpötilassa ThermoWood-kappaleiden kimmomoduulit eivät juuri muuttuneet vahojen avulla. Mäntykoekappaleilla kimmomoduuli pysyi lähes samana SW-1800 vahalla. WOP vahalla kimmomoduuli taas laskee verrattuna referenssimateriaaliin. Eräkohtaiset keskiarvotulokset ja keskihajonnat on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Taivutustestin eräkohtaiset ka. tulokset ja keskihajonnat

Koe-erä	Maks.voima	Maks.taipuma	Maks.jännitys	Kim.moduuli	$\sigma_{max}$ Std.	E Std.
	[kN]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
ThermoWood Referenssi	1,47	9,22	64,86	10784,63	12,17	1771,51
ThermoW. WOP 140-130 °C	1,62	9,69	69,83	11360,89	4,63	498,66
ThermoW. SW-1800 120 °C	1,69	12,11	74,77	10677,30	10,55	1551,68
ThermoW. WOP 160 °C	1,57	11,14	70,83	10178,90	8,32	1286,49
ThermoW. SW-1800 160 °C	1,38	10,15	61,90	9378,33	15,13	1630,56
Mänty Ref.	2,06	14,58	92,85	13990,49	6,61	1040,96
Mänty WOP 140-130 °C	2,07	14,08	89,38	12566,96	9,25	1031,10
Mänty SW-1800 120 °C	2,55	16,11	115,77	14030,99	10,21	1588,62
Mänty WOP 160 °C	1,97	11,05	85,95	12973,36	20,51	1640,25
Mänty SW-1800 160 °C	2,54	14,39	115,86	14659,38	12,25	1509,21

Taivutuskokeen jälkeen jokaisesta koe-erästä otettiin kaksi rikottua koekappaleita ja niistä valmistettiin kosteuskappaleet. Kappaleiden koko oli 20 x 20x 30

mm. Kosteuskappaleet punnittiin foliokuppien kanssa ja ne laitettiin uuniin kuivumaan. Foliokupin idea oli pitää kappaleista valuvan vahain paino mukana tuloissa, jotta puusta poistuvan veden massa saatiin määritettyä (kuva 14).



Kuva 14. Kosteuskappaleita uunikuivauksen jälkeen

Kosteuskappaleita pidettiin uunissa yhden vuorokauden ajan ja ne punnittiin uudestaan. Poistuneen veden massa avulla laskettiin eri koe-erille kosteusprosentit (taulukko 4).

Taulukko 4. Koe-erien kosteusprosentit

Koe-erä	Kappale	m1 [g]	m0 [g]	mv [g]	u [%]	Erä ka. u [%]
ThermoW. ref.	T8	5,75	5,43	0,32	5,89	<b>5,24</b>
ThermoW. ref.	T17	5,71	5,46	0,25	4,58	
WOP ThermoW. 140-130 °C	TVW1-3	7,49	7,19	0,3	4,17	<b>3,96</b>
WOP ThermoW. 140-130 °C	TVW1-8	6,93	6,68	0,25	3,74	
SW-1800 ThermoW. 120 °C	TVK2-8	9,16	8,86	0,3	3,39	<b>3,51</b>
SW-1800 ThermoW. 120 °C	TVK2-10	9,69	9,35	0,34	3,64	
WOP ThermoW. 160 °C	BT1-1	8,04	7,77	0,27	3,47	<b>3,48</b>
WOP ThermoW. 160 °C	BT4-1	7,73	7,47	0,26	3,48	
SW-1800 ThermoW. 160 °C	TVK6-1	9,84	9,57	0,27	2,82	<b>2,51</b>
SW-1800 ThermoW. 160 °C	TVK6-12	9,75	9,54	0,21	2,20	
Mänty ref.	TR5	6,45	5,95	0,5	8,40	<b>8,50</b>
Mänty ref.	TR7	6,44	5,93	0,51	8,60	
WOP Mänty 140-130 °C	TVW2-5	9,47	9,14	0,33	3,61	<b>3,97</b>
WOP Mänty 140-130 °C	TVW2-18	10,61	10,17	0,44	4,33	
SW-1800 Mänty 120 °C	TVK22	10,84	10,33	0,51	4,94	<b>4,88</b>
SW-1800 Mänty 120 °C	TVK37	11,53	11	0,53	4,82	
WOP Mänty 160 °C	B1-1	9,2	8,8	0,4	4,55	<b>4,75</b>
WOP Mänty 160 °C	B4-1	10,61	10,11	0,5	4,95	
SW-1800 Mänty 160 °C	TVK4	10,93	10,55	0,38	3,60	<b>3,95</b>
SW-1800 Mänty 160 °C	TVK15	12,14	11,64	0,5	4,30	

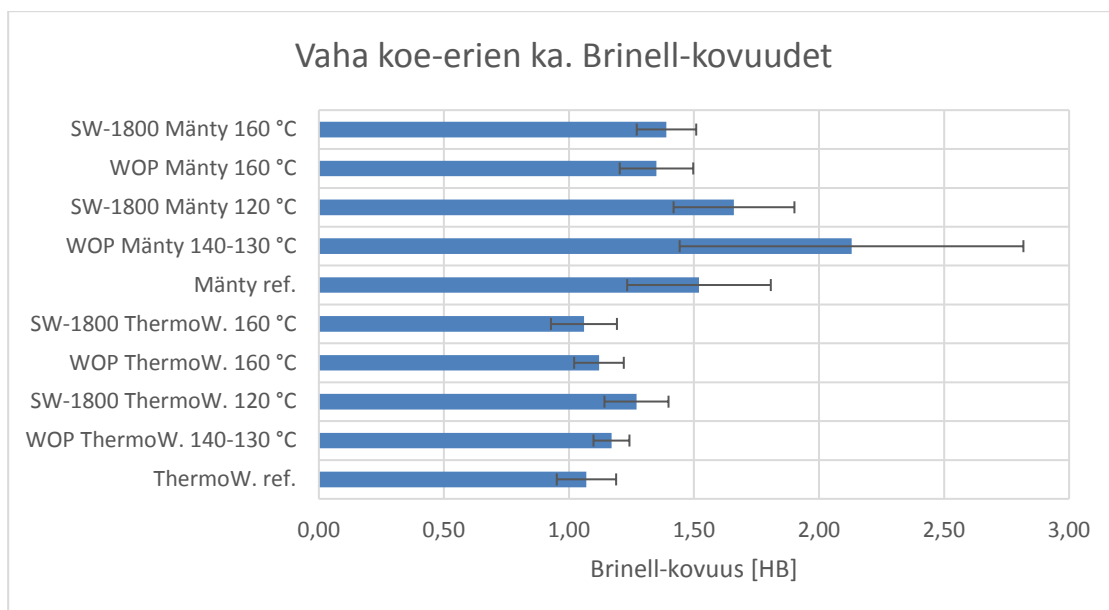
Taulukosta 4 ilmenee, että vahakäsittely laskee kappaleiden kosteusprosentteja, vaikka ne on tasaannutettu samoissa olosuhteissa. Kosteusprosentti on

tippunut mänyllä lähes puoleen referenssistä. ThermoWood-kappaleilla muutos ei ole niin suuri, koska ThermoWood-prosessi laskee puun tasapainokosteutta jo valmiiksi. 160 °C WOP mäntykappaleiden kosteuspitoisuus on suurempi kuin alemman lämpötilan kappaleilla. Alemman lämpötilan WOP vahakappaleet eivät olleet todennäköisesti tasaantuneet riittävästi 2 viikon aikana. 160 °C WOP vahakoekappaleet oli testattu jo viime kesänä, ilman tasaannutusta, eikä niistä ei ollut määritetty kosteusprosenttia. Rikotut kappaleet olivat ehtineet tasaantua halliolosuhteissa RH 50 % jo yli puoli vuotta, kun otin niistä kosteusnäytekappaleet. Kosteusprosentti on näin ollen suuntaa antava.

## **7.2 Vahakoekappaleiden Brinell-kovuustestaus**

Koekappaleille suoritettiin EN 1534 standardin Brinell-kovuustestaus Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun materiaalitekniikan laboratoriollla. Testi suoritettiin AFFRI 250 DRM -kovuusmittauslaitteella. Koemateriaaleja tasaannutettiin olosuhdekaapissa yhtä kauan kuin taivutuskokeessa. Taber-kovuusmittauslaite ei ollut täysin standardin mukainen, koska kuulan uppoamiseen menevää aikaa ei voinut säätää. Standardi määrittelee ajaksi  $15 \pm 3$  sekuntia laite painoi kuulan puuhun noin 3 sekunnissa. Koekappaleiden massat ja tiheydet on esitetty liitteessä 2.

Kovuusmittaukset otettiin kappaleiden lappeilta ja sydänpuun puolelta. Ajatuksena oli mitata kovuus käyttösovelluksen mukaan. Esimerkiksi terassilauta asennetaan sydänpuoli ylöspäin, kieroutumisen ja sydänpuolen kovuuden takia. Mittauksia otettiin referenssi ThermoWood-kappaleista 2 mittausta/ kappale ja kaikista muista koe-eristä 5 mittausta/ kappale. Määritetyistä kovuusmittausarvoista laskettiin kappalekohtainen keskiarvo. Kappalekohtaisista arvoista taas saatiin määritettyä keskiarvotulos jokaiselle koe-erälle (liite 2.). Kuvassa 15 on esitetty eri koe-erien Brinell-kovuudet ja keskihajonnat.

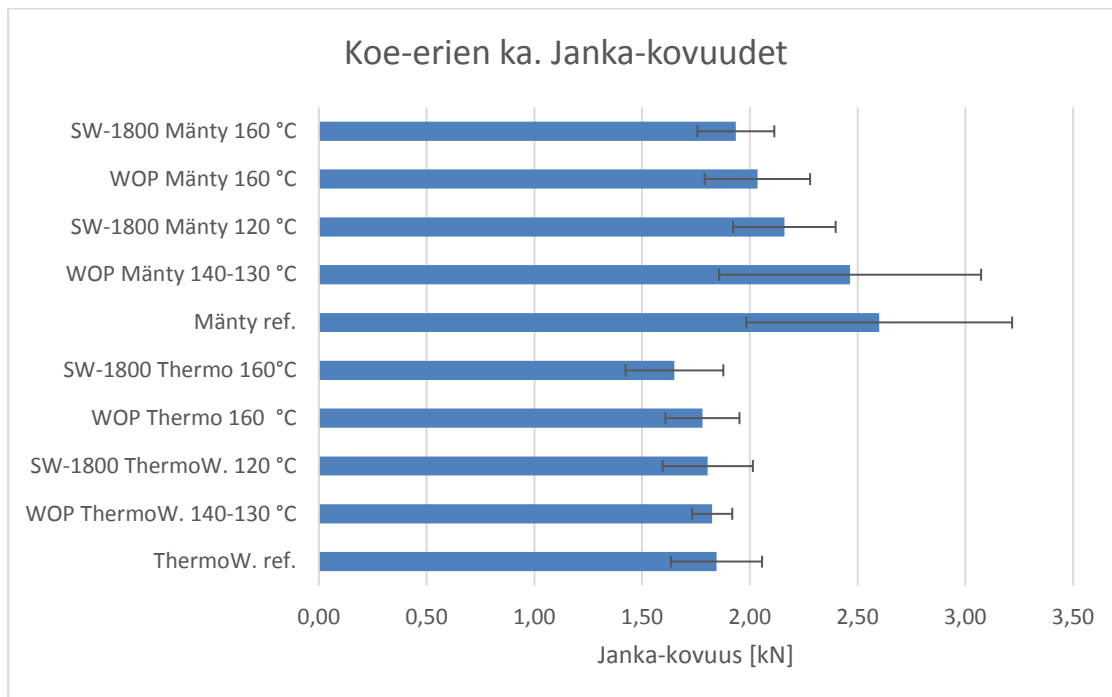


Kuva 15. Koe-erien Brinell-kovuudet ja keskihajonnat

Mäntykoekappaleilla kovuus kasvoi alemman lämpötilan kyllästyskäsittelyillä, molemmilla vahatyypeillä, verrattuna referenssi mäntyyn. WOP-vahalla kovuu- den nousu oli suurin, mutta eräkohtainen keskihajonta oli suuri, johtuen toden- näköisesti tiheyseroista kappaleiden välillä. Korkeamman lämpötilan käsitte- lyllä männyn kovuus laski kummallakin vahatyypillä. ThermoWood-kappaleilla matalampi käsittelylämpötila paransi hieman puun kovuutta kummallakin va- hatyypillä. Korkeampi kyllästyslämpötila ei vaikuttanut juurikaan Thermo- Wood-kappaleiden kovuusarvoihin vaan ne pysyivät referenssi ThermoWoo- din tasolla. Referenssimännyllä keskihajonta oli suurta, koska koekappaleet olivat eri lähteistä, jolloin niiden tiheyksissä oli eroavaisuuksia. Ottamalla kap- paleet eri lähteistä saatiin vertailumateriaalit vastaamaan enemmän vaha- koemateriaalia, joissa oli myöskin eri lähteistä otettua puutavaraa.

### 7.3 Vahakappaleiden Janka-kovuusmittaukset

Janka-kovuuden mittaaminen suoritettiin standardia ASTM D143 soveltaen Shimadzu Autograph kuormituskehällä. Trapezium-ohjelmaan syötettiin vaa- dittavat parametrit mittausta varten. Mittaukset otettiin puun lappeilta. Toinen sydänpuun puolelta keskeltä ja toinen pintapuun puolelta reunemmasta, jossa syykuvio on tiheämpää. Saaduita tuloksista laskettiin kappalekohtainen kes- kiarvo. Koekappaleina toimivat samat kappaleet kuin Brinell-kovuuden mit- tauksissa. Kuvassa 16 on esitettyä eri koe-erien keskiarvo- Janka-kovuudet.



Kuva 16. Koe-erien ka. Janka-kovuudet ja keskihajonnat

ThermoWood-kappaleiden Janka-kovuudet laskivat hieman lämpötilan ollessa korkeampi. Muutos oli suurempi SW-1800 -kynttilävahalla. Mäntykappaleilla tuli samankaltaisia tuloksia kuin ThermoWoodilla. Kovuudet laskivat kummallakin vahatyypillä, ja korkeampi lämpötila alensi kovuutta enemmän. Keskihajonnat olivat suurempia referenssimännillä ja alemman lämpötilan WOP mäntykappaleilla. Hajonta selittyi suurilla tiheysvaihteluilla kappaleiden välillä, jolloin kovuudet vaihtelivat suuresti.

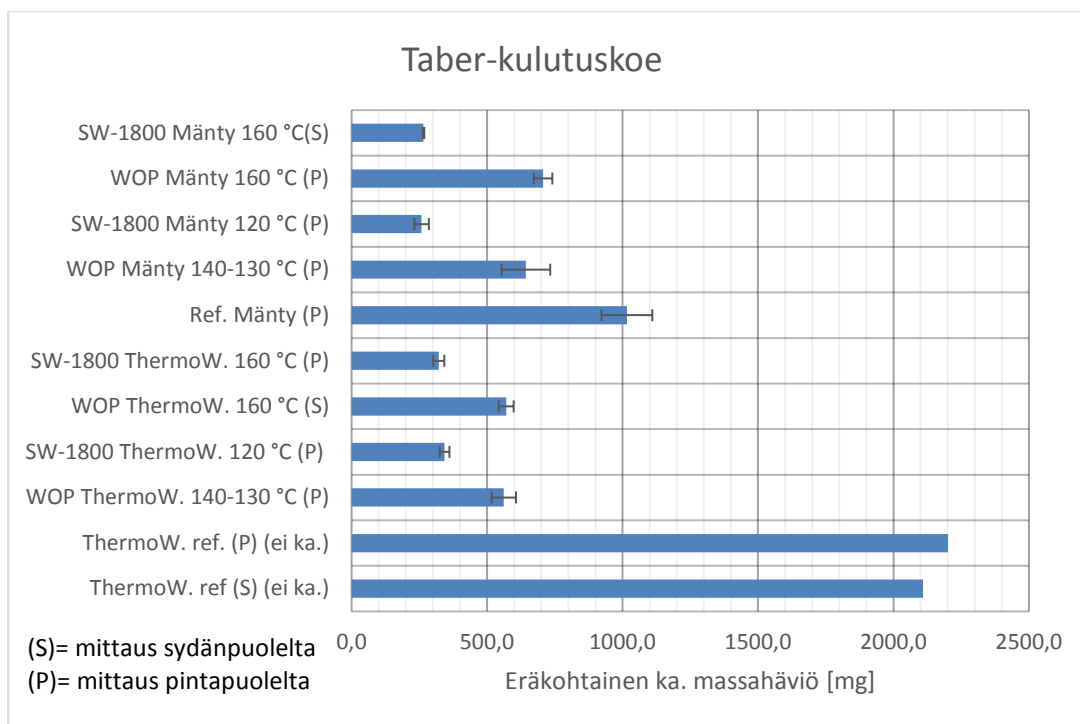
#### 7.4 Taber-kulutuskoe

Taber-kulutuskoe suoritettiin EN ISO 7784-1 -standardin mukaisella laitteella (kuva 17.). Koemateriaaleja tasaannutettiin olosuhdekaapissa yhtä kauan kuin edellisten testien koekappaleita. Koekappaleiden reunat leikattiin tiheyspunnituksien jälkeen pois, jotta kappaleet mahtuivat pyörimään Taber-laitteistossa. Tiheydet ja painot on esitetty liitteessä 2. Lopulliset kappaleet punnittiin ennen testiä Mettler Toledo XS105 -vaa'alla. Sen tarkkuus oli standardin vaatimat 0,1 mg. Kappaleet asetettiin alla olevan kuvan mukaisesti laitteeseen ja hiomaliuskoilla päällystetyt kumipyörät hioivat kappaleen pintaan uran. Kierrosmäärä oli aluksi 1000, mutta sitä laskettiin ensimmäisen kappaleen jälkeen 500 kierrokseen. Urista olisi tullut muuten tarpeettoman suuria.



Kuva 17. Taber-kulutuskoelaite testin jälkeen

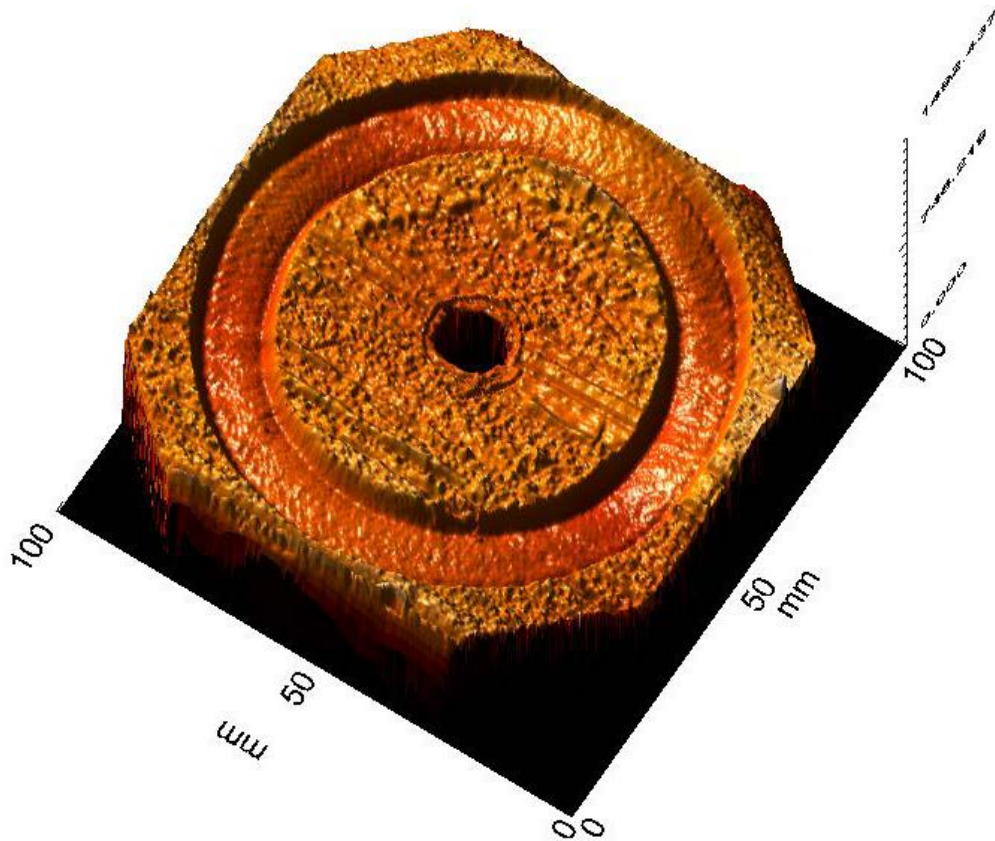
Kappaleet punnittiin heti testin jälkeen, jotta kosteusmuutokset eivät vaikuttaisi massahäviöön. Testatuista kappaleista myös määritettiin urasyvyys 3D-profi-lometrin avulla ja ne kirjattiin ylös (liite 2.). Jokaiselle erälle laskettiin standar-din mukaisesti ka. massahäviö, lukuun ottamatta referenssi ThermoWoodia (kuva 18.).



Kuva 18 Kulutuskokeen eräkohtaiset massahäviöt ja keskihajonnat

ThermoWood-kappaleilla vahat paransivat kulutuksenkestoa huomattavasti. Mäntykappaleilla kulutuksenkesto parani myös, mutta ei yhtä paljon kuin ThermoWood-kappaleilla. Kynttilävahakappaleilla pehmeä SW-1800 -vaha tukki hiomaliuskat jo 40 kierroksen jälkeen, joten saadut tulokset eivät ole kovin tarkkoja. Standardissa sanotaan, että liuskat tulee vaihtaa, jos ne tukkeutuvat, mutta näissä testeissä se ei olisi ollut järkevää, koska liuskoja olisi tarvittu kohtuuttoman paljon. WOP-vahalla liuskat tukkeutuivat myös, mutta eivät yhtä nopeasti kuin kynttilävahalla. Koe-erien keskihajonta oli alhainen. Tarkemmat mittaustulokset löytyvät liitteestä 2. Kuvassa 19 on esitetty profiilometrillä luotu 3-D kuva SW-1800 -vahalla kyllästetystä kappaleesta, joka on käynyt 160 °C käsittelyssä.





Kuva 19. 3-D profilometrillä luotu kuva Taber-kappaleesta

## 7.5 Ruuvinvetokoe

Ruuvin ulosvetokoe suoritettiin EN 1382 -standardia soveltaen. Vetokokeeseen käytettiin samaa kuormituskehää kuin taivutus- ja Janka-kovuuskokeissa. Koekappaleina käytettiin samoja koe-eriä kuin Brinell- ja Janka-testauksissa. Eräkohtainen kappalemäärä oli 10 lukuun ottamatta eriä, joissa kappaleita oli vähemmän kuin 10.

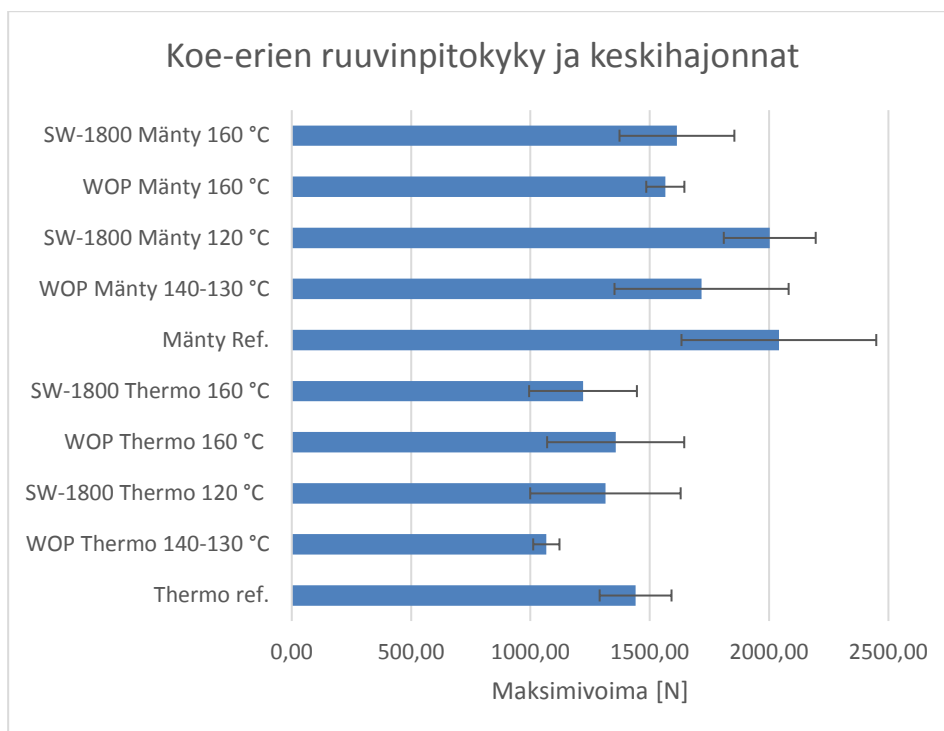
Koekappaleisiin porattiin 3 mm terällä esireiät, jonne kokeessa vedettävät ruuvit kiinnitettiin. Porauskohta oli joka kappaleessa sydänpuun puolella, kappaleen keskikohdilla. Osassa kappaleista ruuvi kiinnitettiin läpi asti, koska kappaleet olivat ohuita. Paksummissa kappaleissa ruuvit kiinnitettiin sen mukaan, miten paljon niissä oli kierreosaa. Ruuveina käytettiin samantyyppisiä passiivoituja ja ruostumattomasta teräksestä valmistettuja terassiruuveja, joiden halkaisija oli 4,5 mm.

Kuormitusnopeutta säädettiin riippuen koe-erästä niin, että pysyttiin standardin määrittämässä aikavälissä. Kuvassa 20 on esitetty ruuvinvetokokeen periaate.



Kuva 20. ThermoWood-kappaleen ruuvinvetokoe

Ennen kokeen alkua Trapezium-ohjelmaan määritettiin koe-erälle kuormaa kantavan kierreosan pituus kappaleessa. Kierreosan pituuden, ruuvin halkaisijan ja kokeesta saadun voiman avulla ohjelma laski jokaiselle kappaleelle *withdrawal parameter*  $f$  eli vetoparametri  $f$ , jonka yksiköksi tuli  $N/mm^2$  (liite 2.). Koe-erien keskiarvotulokset on esitetty kuvassa 21.

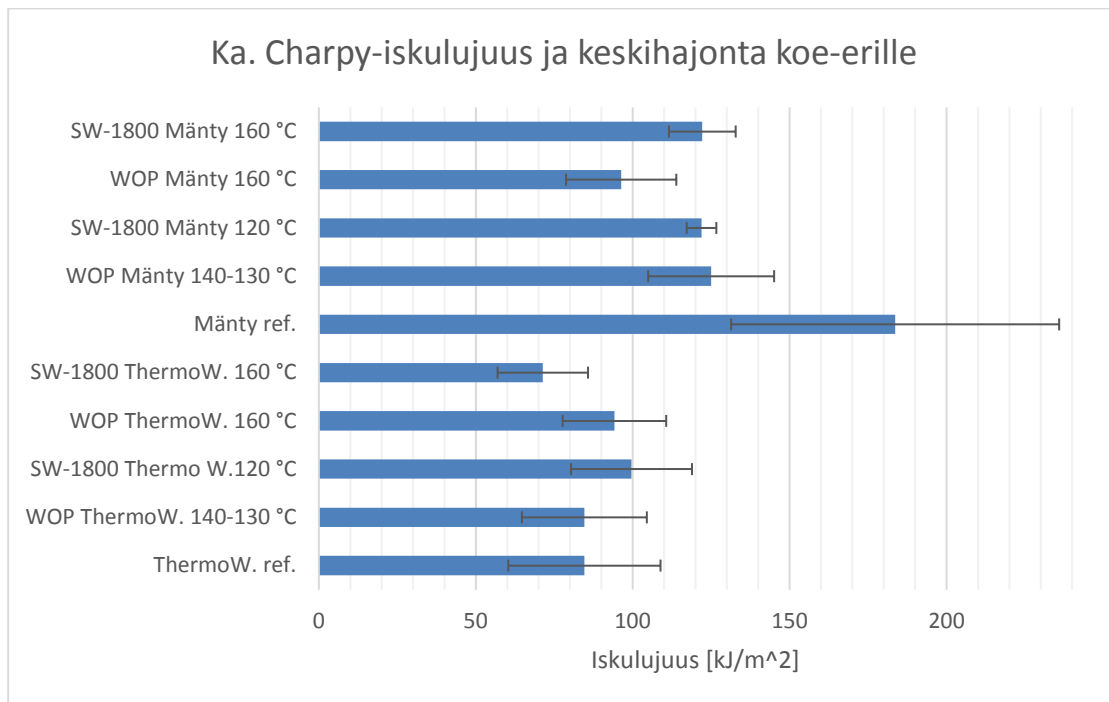


Kuva 21. Koe-erien ka. ruuvinpitävyydet ja keskihajonnat

Ruuvinpitokyky laski ThermoWoodilla ja suurimalla osalla mäntykoemateriaalista riippumatta vahatyypistä ja lämpötilasta. 120 °C kynttilävahakäsittelyillä mäntykoekappaleilla ruuvinpitokyky säilyi ennallaan. Kappaleissa ei myöskään ollut merkittävää tiheys tai vahamäärä eroa esimerkiksi 160 °C kynttilävahakappaleisiin. Voidaan siis olettaa, että korkeamman lämpötilan käsittely muuttaa kappaleen rakennetta niin, että ruuvinpitävyys heikkenee. Osassa koe-eristä keskihajonta oli suuri. Hajonta johtunee koekappaleiden tiheyseroista, joita koe-erien sisällä oli.

## 7.6 Iskulujuuden määrittäminen

Charpy-iskulujuuden määrittäminen suoritettiin materiaalitekniikan laboratorion testilaitteella standardin EN ISO 179-1 mukaisesti. Koekappaleet olivat 20 x 20 x 80 mm, ja ne valmistettiin samoista tangoista kuin taivutuskappaleet ja taasaannutettiin yhtä pitkiä aikoja. Koekappaleiden iskeminen suoritettiin kohtisuoraan syitä vastaan ja sydänpuun puolelta. Saadut tulokset taltioitiin ja niiden avulla määritettiin kappalekohtainen Charpy-iskulujuus. Kappalekohtaisista tuloksista määritettiin eräkohtaiset keskiarvotulokset (kuva 22). 160 °C WOP -käsittelyn iskulujuus kappaleet oli testattu jo viime kesänä ja tulokset on lisätty työhön vertailun vuoksi.



Kuva 22. koe-erien ka. iskulujuudet ja keskihajonnat

Mäntykoekappaleilla vahakäsittelyt laskivat iskulujuutta merkittävästi. Eniten laskua tuli 160 °C WOP -käsittelyllä, joiden testaus oli suoritettu viime kesänä. Sen erän koekappaleissa ei ollut tiheyseroa muihin nähden, ja saman käsittelylämpötilan kynttilävahakappaleilla iskulujuus oli parempi. Erän kosteusprosentti oli kuitenkin suurempi kuin esimerkiksi alemman lämpötilan WOP-erällä. Matalampi iskulujuus voi siis johtua korkeammasta kosteusprosentista. Referenssi mäntykappaleiden iskulujuuksissa oli suurta vaihtelua. Vaihtelu ei selity tiheyseroilla, koska kappaleiden tiheydet olivat samaa luokkaa. ThermoWood-kappaleilla muutokset eivät olleet suuria.

## 7.7 Höyrylämpökäsittelyn koemateriaalin testaus

Koemateriaalille suoritettiin EN 408 -standardin mukainen taivutustestaus. Koekappaleiden koko oli taivutuksessa 18 x 18 x 342 mm. Testissä käytettiin puikkoanturia, jonka avulla saatiin tarkka taipuma kappaleille. Vahakyllästystestauksien tapaan, kone laski eri kappaleille kimmomoduulit (liite 3). Koeeristä määritettiin kosteusprosentit punnitus-kuivaus menetelmällä. Saadut eräkohtaiset tulokset on kerätty taulukkoon 5. Taulukkoon on myös lisätty vertailuksi Thermo-D -laadulla saadut taivutustulokset.

Taulukko 5. Höyrylämpökäsittelyn taivutuskokeiden tulokset ja keskihajonnat

	Ka. tiheys	Kosteus	Taiv. Lujuus	Kim.mod.	Std. Luj.	Std. E
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Mänty 160 °C/3h Ilmanpaine	464,78	7,73	75,58	10932,37	7,24	1070,19
Hallikuiva mänty 160 °C/3h RH 100%	466,55	4,75	64,27	11495,07	12,98	1448,38
Tuore mänty 160 °C/3h RH 100%	481,57	7,51	63,01	10814,34	9,98	1217,12
ThermoWood Referenssi	461,81	5,24	64,86	10784,63	12,17	1771,51

Höyrylämpökäsitellyjen koemateriaalien taivutuslujuudet ovat samansuuruisia kuin referenssimateriaalilla. Hallikuivassa koemateriaalissa höyrykäsittely nosti puun kimmomoduulia verrattuna Thermo-D -laatuun. Edellä mainittujen laatuojen kosteusprosentit ovat myös lähelle toisiaan, joten ne ovat vertailukelpoisia keskenään. Tuoreen männyn ja perinteisellä lämpökäsittelyllä tuotetun koe-erän kosteusprosentit olivat myös lähellä toisiaan ja täten erät ovat vertailukelpoisia keskenään. Tuoreella höyrykäsittelyllä männyllä taivutuslujuus aleni hieman, mutta puun jäykkyys pysyi samalla tasolla. Hallikuivalla koeerällä lujouden ja jäykkyyden keskihajonnat olivat suurimmat.

Koe-erille suoritettiin Charpy-iskulujuustestaus standardin EN ISO 179-1 mukaisesti. Koe-kappaleiden koko oli 20 x 20 x 80 mm. Eräkohtaiset keskiarvotulokset ja tiheydet on kerätty taulukkoon 6. Tarkemmat mittaustulokset on esitetty liitteessä 3.

Taulukko 6. Iskulujuustestien ka. tulokset ja keskihajonnat

	Tiheys	Kosteus	Iskulujuus	Std. Iskulujuus
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]
Mänty 160 °C/3h Ilmanpaine	444,96	7,73	121,25	38,80
Hallikuiva mänty 160 °C/3h RH 100%	416,88	4,75	157,50	43,33
Tuore mänty 160 °C/3h RH 100%	500,31	7,51	151,14	42,24
ThermoWood referenssi	487,50	5,24	84,6	24,25

Höyrykäsittelyllä puutavaralla iskulujuus kasvoi merkittävästi. Verrattuna Thermo-D -laatuun hallikuivan ja tuoreen puun iskulujuus lähes tuplaantui. Tuoreella höyrykäsittelyllä männyllä tiheys oli hieman suurempi verrattuna muihin. Keskihajonnoissa ei ollut suuria eroja koe-erien välillä.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tähän kappaleeseen on kerätty huomionarvoisia seikkoja opinnäytetyöprosessin ajalta ja vertailtu työstä saatuja tuloksia keskenään. Vahakyllästyksien keskimääräiset tulokset on kerätty samoihin taulukoihin, jotta niitä on helpompi tulkita.

### 8.1 Vahakyllästykset

Vahakoe-erien kosteudet vaihtelivat runsaasti. Osa koe-eristä ei välttämättä ollut tasaantunut riittävästi, vaikka tasaannutusaika oli pitkä. Pitempi tasaannutusaika ei olisi ollut mahdollinen opinnäytetyön etenemisen kannalta. Viime kesänä testattuja taivutus- ja iskusitkeys-kappaleita ei tasaannutettu ollenkaan, mikä varmasti vaikutti tuloksiin. Kosteusprosentit olivat niissä alhaisemmat kuin tasaannutetuissa kappaleissa, ja näin ollen esimerkiksi lujuusominaisuudet pitäisi olla paremmat.

ThermoWood-taivutuskappaleilla puumateriaalissa oli runsasta vaihtelua. Osa kappaleista oli esimerkiksi sahattu oksan läheltä, jolloin lujuus jäi alhaiseksi. Karsin kaikki tämän tyyppiset kappaleet pois tuloksista, jotta ne eivät vääristä eräkohtaista keskiarvoa ja testaus on standardin mukainen.

Mustalla pigmentillä käsiteltyjen SW-1800 -vahakappaleiden kanssa ongelmaksi muodostui väriaineen irtoaminen kappaleista. Koemateriaalia työstettäessä väri tarttui helposti esimerkiksi tasohöylään ja mustan värin puhdistaminen oli työlästä. Myös testien aikana väriaine tarttui helposti ja sotki paikkoja. Johtopäätöksenä näin ollen on, että musta väripigmentti ei sovellu kynttilävahan kanssa ja sen käytettävyys kaupallisissa tuotteissa on huono. Kynttilävaha itsessään ei ole kaikkein mukavinta käsitellä ja kädet jäivät nihkeäksi, kun kynttilävahakappaleisiin koski. Tämän vuoksi se ei sovellu esimerkiksi terrassimateriaaliksi.

Alla olevaan taulukkoon 7 on koottu taivutus- ja iskulujuustestauksien tulokset sekä niiden koemateriaalien keskimääräiset tiheydet ja vahamäärät.

Taulukko 7. Koe-erien keskimääräiset tulokset

<b>Mänty</b>	<b>Lämpötila</b>	<b>Tiheys</b>	<b>Vahaa</b>	<b>Taiv. Lujuus</b>	<b>Kimmomoduuli</b>	<b>Iskulujuus</b>
	[°C]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]
SW-1800	120,00	661,87	182,21	115,77	14030,99	121,93
	160,00	676,68	183,12	115,86	14659,38	122,17
WOP	130-140	554,90		87,96	12287,12	125,00
	160,00	588,17		85,95	12973,36	96,32
Ref.		550,00		92,85	13990,49	174,38
<b>ThermoW.</b>						
	[°C]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]
SW-1800	120,00	573,25	163,77	74,77	10677,30	99,62
	160,00	581,67	189,34	61,90	9378,33	71,35
WOP	130-140	421,31		69,83	11360,89	84,59
	160,00	456,22		70,83	10178,90	81,25
Ref.		474,39		64,86	10784,63	84,60

Taulukossa esitetyn vahamäärän laskemisessa on huomioitu käsittelyssä puusta poistuneen veden massa, jolloin on saatu lähempänä todellista vahamäärää oleva lukuarvo. Kynttilävahan määrä mäntypuussa pysyi tasaisena riippumatta käsittelylämpötilasta. ThermoWoodilla vahamäärä kasvoi hieman, kun käsittelylämpötila nousi. WOP-vahalle ei ollut vahamääriä saatavilla, koska koemateriaali oli peräisin laitteiston testivaiheen aikana suoritetuista koeajoista, joissa ei ollut tarpeellista kirjata koemateriaalin tietoja ylös.

SW-1800 -vahalla käsittelylämpötilalla ei ollut suurta vaikutusta mäntykoekappaleiden ominaisuuksiin. Kynttilävaha paransi männyn taivutuslujuutta referenssiin verrattuna. WOP-vahalla männyn ominaisuudet eivät muuttuneet merkittävästi lukuun ottamatta iskulujuutta, joka heikentyi kummallakin vahatyypillä. SW-1800 ThermoWood -kappaleilla alempi käsittelylämpötila paransi taivutus- ja iskulujuutta. Korkeammassa lämpötilassa ominaisuudet heikkenivät, mikä on selitettävissä sillä, että puu on tässä tapauksessa läpikäynyt kaksinkertaisen lämpökäsittelyn, jolloin myös lujuusominaisuudet ovat kärsineet vastaavasti.

WOP-vahalla ThermoWoodin ominaisuudet paranivat alemmassa lämpötilassa, mutta muutokset eivät olleet yhtä suuria kuin kynttilävahalla. Johtopäätöksenä lujuusominaisuuksien osalta on, että SW-1800 -kynttilävaha soveltuu

paremmin lujuutta vaativiin sovellutuksiin, kummankin koemateriaalin osalta. Vahatyypien muut ominaisuudet on koottu alla olevaan taulukkoon 8.

Taulukko 8. Vahatyypien muut ominaisuudet

Mänty	Lämpö-tila	Tiheys	Vahaa	Brinell	Janka	Taber		Ruuvin-pitokyky	Withdrawal parameter f
						Massahäv.	Urasyvyyys		
						[mg]	[µm]		
	[°C]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[mg]	[µm]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
SW-1800	120,00	611,35	133,09	1,66	2,16	258,47	82,06	2002,75	19,64
	160,00	623,41	164,35	1,39	1,94	265,47	108,74	1613,89	15,72
WOP	130-140	578,25		2,13	2,47	643,53	227,67	1717,07	18,84
	160,00	509,87	47,46	1,35	2,04	706,73	299,92	1565,17	15,39
Ref.		495,58		1,52	2,60	1016,13	617,33	2041,00	20,77
<b>Thermo-Wood</b>									
	[°C]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[mg]	[µm]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
SW-1800	120,00	581,34	138,99	1,27	1,80	343,10	94,13	1314,25	12,84
	160,00	544,38	167,01	1,06	1,65	321,77	106,20	1220,35	12,14
WOP	130-140	483,24		1,17	1,83	561,90	272,88	1066,63	11,71
	160,00	447,40	65,32	1,12	1,78	570,60	263,51	1357,22	13,51
Ref.		446,42		1,07	1,85	2155,15	1298,22	1440,60	14,37

SW-1800 -vahalla männyn kaikki muut ominaisuudet paranivat tai pysyivät samalla tasolla, kun käsittelylämpötilana oli 120 °C. Myös WOP-vahalla alempi käsittelylämpötila paransi ominaisuuksia ja esimerkiksi Brinell-kovuus oli parempi kuin kynttilävahalla. Thermowood-kappaleilla alempi käsittelylämpötila toi kynttilävahalla samankaltaisia tuloksia kuin männyllä. Korkeammalla lämpötilalla ominaisuudet heikkenivät, mutta verrattuna 120 °C käsittelyyn muutokset eivät olleet kovin suuria. WOP ThermoWood -kappaleilla käsittelylämpötilalla ei ollut suurta vaikutusta lopputuloksiin. Voin todeta, että männyllä WOP-vaha sopii paremmin kovuutta vaativiin sovellutuksiin, kun taas kulutuksenkesto hakiessa kynttilävaha on parempi vaihtoehto. Molemmilla vahatyypeillä alempi käsittelylämpötila tuo kuitenkin paremmat lopputulokset. ThermoWood-laadulla alemman lämpötilan kynttilävahakäsittely tuo parhaimmat kovuus- ja kulutuksenkesto-ominaisuudet.



## 8.2 Hörylämpökäsittelyt

Hallikuivalla hörylämpökäsittelyerällä koe-erän koko jäi taivutuksessa pieneksi, koska jouduin karsimaan kappaleita pois tuloksista. Useampi taivutus-kappale oli juuri oksan läheltä ja näin ollen lujuus jäi alhaiseksi. Juuri hallikui-vassa erässä kimmomoduuli oli parempi kuin muilla erillä ja pienen kappale-määrän vaikutusta tulokseen on hankala arvioida.

Tuoreen sahatavaran käyttäminen höyrykäsittelyssä ei tuonut merkittävää eroa lopputuloksiin verrattuna hallikuivaan ja vaikutukset olivat jopa negatiivisia. Erät oli kuitenkin valmistettu eri lähtömateriaalista, jolloin puumateriaalin eroista syntyvät muuttujat vaikuttivat lopputuloksiin.

Erien kosteudet poikkesivat toisistaan. Tällä oli varmasti osaltaan vaikutusta saatuihin lujuus- ja jäykkyyssarvoihin. Tuoreen höyrykäsittelyn koe-erän kimmomoduuli olisi saattanut olla lähellä hallikuivaa erää, jos sen kosteuspro-sentti olisi ollut alhaisempi.

Koe-erien tiheydet eivät vaihdelleet merkittävästi. Ainoastaan tuoreilla iskulu-juuskappaleilla oli suurempi tiheysarvo, joka saattoi nostaa saatua iskulujuus-arvoa verrattuna muihin eriin. Tiheys oli kuitenkin lähellä Thermo-D -laadun tiehyttä, ja iskulujuus oli silti korkea.

Iskulujuuden osalta hörylämpökäsittelyllä on selvästi positiivisia vaikutuksia iskulujuuteen ja saadut arvot lähestyvät jo aikaisemmin testatun normaalin männyn iskulujuutta. Varmempien tuloksien saamiseksi olisi syytä tehdä tes-tauksia suuremmilla koe-erillä ja pyrkiä eliminoimaan kosteus- ja tiheysmuut-tujat mahdollisimman tarkasti.

## LÄHTEET

1. Kärkkäinen, M. Puutieteen perusteet. Hämeenlinna: Metsälehti Kustannus. 2003.
2. Jantunen, J. & Pihlajamaa, T. Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet. 1995. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://ju-kuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/443346/vtselostus70.pdf> [viitattu 30.1.2017].
3. Puu materiaalina. Puuinfo. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina> [viitattu 31.1.2017].
4. Torniainen, P. Puun Lämpökäsittely. Mikkelin ammattikorkeakoulun ympäristötekniikan instituutti YTI. 2000. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK010404.pdf> [viitattu 9.2.2017].
5. Jämsä, S. & Viitaniemi, P. Puun modifiointi lämpökäsittelyllä. Espoo: VTT offsetpaino. 1996
6. ThermoWood® käsikirja. Lämpöpuuyhdistys ry. 2003. PDF-dokumentti. Saatavissa: [http://www.thermowood.kotisivukone.com/files/thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/914711200401161255\\_twkasikirja.pdf](http://www.thermowood.kotisivukone.com/files/thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/914711200401161255_twkasikirja.pdf) [viitattu 14.2.2017]
7. Krause, A., Militz, H. & Scholz, G. Exploratory study on the impregnation of Scots pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) With different hot melting waxes. 2010. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00226-010-0353-3> [viitattu 14.2.2017].
8. Procedure. NATwood. 2009. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.natwood.co.at/Procedure.html> [viitattu 4.3.2017].
9. Lavonen, Meisalo & al. Veden haihtuminen. 2013. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.edu.helsinki.fi/malu/kirjasto/mb/lampo/olomuodot.htm> [viitattu 4.3.2017].
10. ThermoTreat 2.0 - the most competitive solution on the market. WTT. 2016. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.wtt.dk/products/thermo-treatment/thermotreat-2-0> [viitattu 4.3.2017].
11. Hill, C. Wood Modification – Chemical, Thermal and Other Processes. Wiley Series in Renewable Resources. West Sussex: Wiley. 2006.

12. Paajanen, O. Peura, J. Turunen, H. Puu Modifioinnin Kehittäminen–PUMOK. 2016. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/121277/URNISBN9789515885678.pdf?sequence=1> [viitattu 4.3.2017].
13. Salminen, H. Wood preservation with chemicals: Best Available Techniques (BAT). Temanord. 2014.
14. Paajanen, O. Lämpöpuu-hanke. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/121713/URNISBN9789515885746.pdf?sequence=1> [viitattu 3.4.2017].
15. SFS-EN 408+A1.2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties.
16. SFS-EN 1534. 2011. Wood flooring. Determination of resistance to indentation. Test method.
17. ASTM D143-14. 2014. Standard test methods for small clear specimens of timber.
18. SFS-EN ISO 7784-1. 2016. Paint and varnishes. Determination of resistance to abrasion. Part 1: Method with abrasive-paper covered wheels and rotating test specimen.
19. SFS-EN 1382. 1999. Timber structures - Test methods – Withdrawal capacity of timber fasteners.
20. SFS-EN ISO 179-1. 2001. Charpy-iskulujuusominaisuuksien määrittäminen. Osa 1: Ei-instrumentoitu iskukoe.

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Puun leikkauspintojen eri suunnat. Saatavissa: [http://images.sli-deplayer.biz/7/1878751/slides/slide\\_13.jpg](http://images.sli-deplayer.biz/7/1878751/slides/slide_13.jpg) [viitattu 30.1.2017].

Kuva 2. ThermWood prosessi. Saatavissa: [http://www.thermowood.kotisivukone.com/files/thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/914711200401161255\\_twkasikirja.pdf](http://www.thermowood.kotisivukone.com/files/thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/914711200401161255_twkasikirja.pdf) [viitattu 14.2.2017].

Kuva 3. WTT ThermoTreat 2.0 käsittelyn vaikutus puutavaraan. Saatavissa: [http://www.wtt.dk/app/webroot/uploads/Documents/ThermoTreat%202.0\\_Product%20Presentation.pdf](http://www.wtt.dk/app/webroot/uploads/Documents/ThermoTreat%202.0_Product%20Presentation.pdf) [viitattu 4.3.2017].

Kuva 4. Laitteiston käyttöliittymä. Peura, J. 10.3.2017

Kuva 5. Kappaleet olosuhdekaapissa. Tammela, V. 27.1.2017

Kuva 6. Koemateriaalia 120 °C vahakyllästyksestä kynttilävahalla. Tammela, V. 2.2.2017

Kuva 7. 120 °C vaha-ajon prosessikuvaaja. Peura, J. 2.2.2017

Kuva 8. Tuore sahatavara höyrylämpökäsittelyn jälkeen. Tammela, V. 31.3.2017

Kuva 9. Höyrylämpökäsittelyn prosessikuvaaja. Tammela, V. 10.4.2017

Kuva 10. Ruuvien kohdistus kappaleeseen. SFS EN 1382. Tammela, V. 10.3.2017

Kuva 11. Koekappaleen 4-piste taivutus kuormituskehällä. Tammela, V. 6.3.2017

Kuva 12. ka. taivutuslujuudet ja keskihajonnat eräkohtaisesti. Tammela, V. 15.3.2017

Kuva 13. Koe-erien ka. kimmomoduulit ja keskihajonnat. Tammela, V. 6.3.2017

Kuva 14. Koe-erien kosteusprosentit. Tammela, V. 15.3.2017

Kuva 15. Koe-erien Brinell-kovuudet ja keskihajonnat. Tammela, V. 13.3.2017

Kuva 16. Koe-erien Janka-kovuudet ja keskihajonnat. Tammela, V. 17.3.2017

Kuva 17. Taber-kulutuskoe-laite. Tammela, V. 22.3.2017

Kuva 18. Profilometrillä otettu 3D-kuva Taber-kappaleesta. Tammela, V. 4.4.2017

Kuva 19. Kulutuskokeen eräkohtaiset massahäviöt ja keskihajonnat. Tammela, V. 23.3.2017

Kuva 20. ThermoWood-kappaleen ruuvinvetokoe. Tammela, V. 8.3.2017.

Kuva 21. Koe-erien ruuvinpitävyydet ja keskihajonnat. Tammela, V. 30.3.2017

Kuva 22. Koe-erien ka. iskulujuudet ja keskihajonnat. Tammela, V. 29.3.2017

**TAULUKKOLUETTELO**

Taulukko 1. Puulajien kimmomoduulit. 1. Kärkkäinen, M. Puutieteen perusteet. Hämeenlinna: Metsälehti Kustannus. 2003.

Taulukko 2. Lämpökäsittelyprosessi. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK010404.pdf> [viitattu 9.2.2017].

Taulukko 3. Taivutustestin eräkohtaiset ka. tulokset ja keskihajonnat. Tammela, V. 15.3.2017

Taulukko 4. Koe-erien kosteusprosentit. Tammela, V. 15.3.2017

Taulukko 5. Höyrylämpökäsittelyn eräkohtaiset taivutustulokset. Tammela, V. 10.4.2017

Taulukko 6. Höyrylämpökäsittelyn eräkohtaiset iskutitkeystulokset. Tammela, V. 10.4.2017

Taulukko 7. Koe-erien keskimääräiset tulokset. Tammela, V. 31.3.2017

Taulukko 8. Vahatyypien muut ominaisuudet. Tammela, V. 31.3.2017

## TAIVUTUS- JA ISKUSITKEYSKOKEIDEN MITTAUSTULOKSET

Taivutuskappaleet		Tiheys	Maksimijännitys	Kimmomoduuli
<b>ThermoWood ref.</b>				
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
T1	65,44	430,53	53,49	9077,97
T2	77,24	508,16	60,38	13524,50
T3	73,32	482,37	53,16	11581,70
T5	61,65	405,59	64,07	8903,73
T6	70,41	463,22	70,03	11988,60
T7	67,08	441,32	75,49	10282,30
T8	71,42	469,87	83,37	11170,80
T9	69,79	459,14	77,58	11632,30
T10	74,87	492,57	60,93	11443,50
T11	75,61	497,43	58,96	12806,50
T12	69,65	458,22	45,16	11008,30
T13	64,47	424,14	47,81	8759,84
T14	62,78	413,03	63,08	8063,90
T15	68,43	450,20	47,53	7496,22
T16	66,17	435,33	78,85	10097,70
T17	73,45	483,22	62,75	10320,30
T18	78,43	515,99	82,16	14137,10
T19	72,30	475,66	84,09	12470,40
T20	75,89	499,28	67,95	11823,50
V1	66,81	439,54	70,03	9091,31
V2	68,90	453,29	55,25	10796,70
Ka.	70,20	461,81	64,86	10784,63
Max	78,43	515,99	84,09	14137,10
Min	61,65	405,59	45,16	7496,22
<b>Iskusitkeys</b>		<b>Tiheys</b>	<b>Charpy iskulujuus</b>	
<b>ThermoWood ref.</b>				
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
I1	15,82	494,38	67,50	
I2	14,68	458,75	66,25	
I3	15,88	496,25	130,00	
I4	15,63	488,44	78,75	
I5	15,51	484,69	63,75	
I6	15,35	479,69	59,50	
I7	15,75	492,19	105,25	
I8	15,75	492,19	87,50	
I9	15,87	495,94	72,50	
I10	15,76	492,50	115,00	
Ka.	15,60	487,50	84,60	
Max	15,88	496,25	130,00	
Min	14,68	458,75	59,50	

Taivutuskappaleet ThermoWood		Tiheys	Maksimijännitys	Kimmomoduuli
<b>Waradur OP vaha 140-130 °C</b>				
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
TVW1-1	62,50	411,18	63,79	10398,50
TVW1-2	62,99	414,41	66,28	11583,30
TVW1-3	62,39	410,46	72,94	11474,30
TVW1-4	66,42	436,97	70,08	11380,80
TVW1-5	64,08	421,58	75,25	11985,40
TVW1-6	63,40	417,11	71,28	11706,00
TVW1-7	62,54	411,45	70,44	11876,00
TVW1-8	63,18	415,66	63,92	10630,10
TVW1-9	65,37	430,07	65,90	11175,80
TVW1-10	66,32	436,32	73,31	11749,70
TVW1-11	64,79	426,25	76,50	10842,10
TVW1-12	61,28	403,16	75,47	11781,30
Vara 1	68,36	449,74	69,61	11603,30
Vara 3	63,11	415,20	62,82	10865,80
Ka.	64,05	421,40	69,83	11360,89
Max	68,36	449,74	76,50	11985,40
Min	61,28	403,16	62,82	10398,50
<b>Iskusitkeys ThermoWood</b>		<b>Tiheys</b>	<b>Charpy iskulujuus</b>	
<b>Waradur OP 140-130 °C</b>				
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
IVW1	12,81	400,31	93,75	
IVW2	12,66	395,63	62,50	
IVW3	13,52	422,50	84,25	
IVW4	13,80	431,25	80,00	
IVW5	13,16	411,25	88,75	
IVW6	14,60	456,25	73,75	
IVW7	13,90	434,38	71,25	
IVW8	12,94	404,38	67,50	
IVW9	12,68	396,25	107,50	
IVW10	14,81	462,81	130,00	
Vara 1	13,23	413,44	71,25	
Ka.	13,46	420,77	84,59	
Max	14,81	462,81	130,00	
Min	12,66	395,63	62,50	



Taivutuskappaleet ThermoW.		Tiheys	Ainetta	Maksimijännitys	Kimmomoduuli
<b>Kynttilävaha 120 °C</b>					
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
TVK2-2	83,36	548,42	129,77	75,75	12191,10
TVK2-3	79,55	523,36	129,77	76,70	11041,90
TVK2-4	98,02	644,87	129,77	99,31	13093,20
TVK2-5	92,51	608,62	129,77	76,91	12174,10
TVK2-6	81,44	535,79	129,77	60,49	8362,81
TVK2-7	75,78	498,55	129,77	67,50	9212,65
TVK2-8	83,19	547,30	129,77	76,85	10298,60
TVK2-9	83,42	548,82	129,77	73,74	9610,16
TVK2-10	89,83	590,99	129,77	76,84	9339,90
V1	92,10	605,92	129,77	63,63	11448,60
Ka.	85,92	565,26	129,77	74,77	10677,30
Max	98,02	644,87	129,77	99,31	13093,20
Min	75,78	498,55	129,77	60,49	8362,81
<b>Iskusitkeys ThermoWood</b>		<b>Tiheys</b>	<b>Ainetta</b>	<b>Charpy iskul.</b>	
<b>Kynttilävaha 120 °C</b>					
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
IVK21	18,00	562,50	129,77	80,00	
IVK22	19,95	623,44	129,77	95,25	
IVK23	19,79	618,44	129,77	104,50	
IVK24	15,89	496,56	129,77	80,00	
IVK25	21,51	672,19	129,77	100,00	
IVK26	22,79	712,19	129,77	99,50	
IVK27	16,18	505,63	129,77	80,00	
IVK28	16,81	525,31	129,77	102,50	
IVK29	17,38	543,13	129,77	140,00	
IVK30	17,69	552,81	129,77	104,50	
v1	20,06	626,88	129,77	90,00	
v2	17,70	553,13	129,77	135,00	
v3	18,26	570,63	129,77	83,75	
Ka.	18,62	581,75	129,77	99,62	
Max	22,79	712,19	129,77	140,00	
Min	15,89	496,56	129,77	80,00	

Taivutuskappaleet ThermoW.		Maksimijännitys	Kimmomoduuli
WOP 160 °C		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BT1-1		70,82	9309,07
BT2-1		55,35	8667,97
BT3-1		80,16	11376,70
BT4-1		67,28	9206,97
BT6-1		74,31	10186,40
BT1-2		67,89	10325,40
BT2-2		77,34	11669,50
BT3-2		83,76	12531,40
BT4-2		65,08	9290,43
BT6-2		66,32	9225,14
Ka.		70,83	10178,90
Max		83,76	12531,40
Min		55,35	8667,97
Iskusitkeys ThermoWood		Tiheys	Charpy iskulujuus
WOP 160 °C			
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]
BT1-1	13,75	429,75	70,00
BT1-2	13,81	431,69	107,50
BT1-3	14,32	447,63	92,50
BT1-4	14,46	451,91	70,00
BT1-5	13,58	424,44	80,00
BT1-6	13,69	427,88	70,00
BT2-1	16,65	520,38	65,00
BT2-2	14,45	451,53	77,50
BT2-3	14,73	460,44	72,50
BT2-4	18,11	565,91	75,00
BT3-1	14,55	454,78	122,50
BT3-2	15,08	471,31	70,00
BT3-3	13,91	434,53	90,00
BT4-1	15,38	480,56	87,50
BT4-2	15,96	498,81	72,50
BT4-3	16,39	512,28	70,00
BT5-1	12,87	402,19	67,50
BT5-2	13,43	419,75	57,50
BT5-3	13,36	417,56	105,00
BT6-1	14,29	446,47	70,00
BT6-2	13,73	429,06	100,00
BT6-3	14,66	458,06	95,00
Ka.	14,60	456,22	81,25
Max	18,11	565,91	122,50
Min	12,87	402,19	57,50

Taivutuskipaleet ThermoW.		Tiheys	Ainetta	Maksimijännitys	Kimmomoduuli
Kynttilävaha 160 °C					
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
TVK6-1	89,24	587,11	154,36	66,88	9197,55
TVK6-2	79,66	524,08	154,36	52,16	8547,95
TVK6-4	88,30	580,92	154,36	50,85	8468,70
TVK6-5	82,08	540,00	154,36	48,89	8124,62
TVK6-6	95,03	625,20	154,36	92,44	13334,80
TVK6-7	94,95	624,67	154,36	94,01	11935,50
TVK6-8	89,98	591,97	154,36	59,75	7913,46
TVK6-9	80,61	530,33	154,36	73,51	8863,51
TVK6-10	82,51	542,83	154,36	65,90	8790,67
TVK6-11	84,68	557,11	154,36	48,69	10879,30
TVK6-12	87,13	573,22	154,36	51,81	10772,70
TVK6-13	84,83	558,09	154,36	67,78	9304,36
TVK6-14	95,58	628,82	154,36	48,49	7737,02
V1	83,57	549,80	154,36	48,75	7983,94
V2	87,34	574,61	154,36	58,54	8820,81
Ka.	87,03	572,58	154,36	61,90	9378,33
Max	95,58	628,82	154,36	94,01	13334,80
Min	79,66	524,08	154,36	48,49	7737,02
Iskusitkeys ThermoW.		Tiheys	Ainetta	Charpy iskulujuus	
Kynttilävaha 160 °C					
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
IVK31	16,68	521,25	154,36	58,75	
IVK32	17,95	560,94	154,36	75,00	
IVK33	19,34	604,38	154,36	67,50	
IVK34	19,07	595,94	154,36	78,75	
IVK35	19,91	622,19	154,36	75,00	
IVK36	19,82	619,38	154,36	96,25	
IVK37	20,82	650,63	154,36	88,75	
IVK38	18,26	570,63	154,36	58,75	
IVK39	19,27	602,19	154,36	57,50	
IVK40	17,83	557,19	154,36	88,75	
v1	17,18	536,88	154,36	75,00	
v2	17,93	560,31	154,36	57,50	
v3	20,95	654,69	154,36	50,00	
Ka.	18,85	588,97	154,36	71,35	
Max	20,95	654,69	154,36	96,25	
Min	16,68	521,25	154,36	50,00	

<b>Taivutuskappaleet</b>		<b>Maksimijännitys</b>	<b>Kimmomoduuli</b>
Mänty Referenssi		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
TR1		90,45	14308,20
TR2		85,33	13291,20
TR3		85,73	12302,90
TR4		95,34	13440,40
TR5		96,36	14588,90
TR6		104,29	15425,80
TR7		92,48	14576,00
Ka.		92,85	13990,49
Max		104,29	15425,80
Min		85,33	12302,90
<b>Iskusitkeys</b>		<b>Tiheys</b>	<b>Charpy iskulujuus</b>
Mänty Referenssi			
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]
IM1	16,78	524,38	225,00
IM2	16,80	525,00	143,75
IM3	17,18	536,88	235,00
IM5	16,78	524,38	222,50
IM6	16,34	510,63	182,50
IM7	16,34	510,63	171,25
IM8	16,55	517,19	107,50
IM9	16,42	513,13	117,50
IM10	17,48	546,25	247,50
Ka.	16,74	523,16	183,61
Max	17,48	546,25	247,50
Min	16,34	510,63	107,50

Taivutuskappaleet Mänty		Tiheys	Maksimijännitys	Kimmomoduuli
Waradur OP 140-130 °C				
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
TVW2-1	84,70	557,24	96,77	13804,20
TVW2-2	83,30	548,03	82,89	10242,10
TVW2-3	77,02	506,71	78,23	10187,40
TVW2-4	79,63	523,88	87,15	12180,10
TVW2-6	86,25	567,43	96,28	13432,60
TVW2-7	81,48	536,05	85,58	11654,30
TVW2-8	88,77	584,01	99,15	13286,00
TVW2-9	81,99	539,41	92,58	12679,50
TVW2-11	84,33	554,80	60,76	12560,20
TVW2-12	85,49	562,43	89,98	12196,80
TVW2-13	81,03	533,09	89,85	13081,40
TVW2-15	81,25	534,54	92,41	12713,40
TVW2-16	84,42	555,39	83,88	12592,10
TVW2-17	86,01	565,86	92,52	13146,00
TVW2-18	83,77	551,12	92,39	12570,60
TVW2-19	88,09	579,54	100,72	12769,00
TVW2-20	85,65	563,49	96,51	14035,80
Vara 1	84,53	556,12	91,16	13073,80
Ka.	83,76	551,06	89,38	12566,96
Max	88,77	584,01	100,72	14035,80
Min	77,02	506,71	60,76	10187,40
Iskusitkeys Mänty		Tiheys	Charpy iskulujuus	
Waradur OP 140-130 °C				
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
IVW11	17,70	553,13	135,00	
IVW12	18,50	578,13	100,00	
IVW13	17,05	532,81	128,75	
IVW14	17,56	548,75	147,50	
IVW15	17,27	539,69	125,00	
IVW16	18,43	575,94	135,00	
IVW17	18,41	575,31	98,75	
IVW18	17,56	548,75	113,75	
IVW19	19,42	606,88	127,50	
IVW20	18,11	565,94	130,00	
Vara 1	17,62	550,63	96,25	
Vara 2	17,90	559,38	162,50	
Ka.	17,96	561,28	125,00	
Max	19,42	606,88	162,50	
Min	17,05	532,81	96,25	

Taivutuskappaleet Mänty		Tiheys	Ainetta	Maksimijännitys	Kim.moduuli
Kynttilävaha 120 °C					
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
TVK21	110,42	726,45	142,11	109,46	14965,00
TVK22	95,46	628,03	142,11	93,10	12122,50
TVK23	96,77	636,64	142,11	106,68	11841,10
TVK24	100,66	662,24	142,11	108,31	11262,70
TVK25	106,44	700,26	142,11	119,97	14636,60
TVK26	91,31	600,72	142,11	105,79	11331,00
TVK27	95,61	629,01	142,11	125,18	13212,50
TVK28	97,65	642,43	142,11	114,94	12804,40
TVK29	100,36	660,26	142,11	121,82	14834,10
TVK30	94,31	620,46	142,11	119,93	14455,50
TVK31	98,98	651,18	142,11	133,44	15558,10
TVK32	98,21	646,12	142,11	128,56	15549,50
TVK33	100,21	659,28	142,11	125,11	15505,00
TVK34	106,27	699,14	142,11	121,84	15431,20
TVK35	107,31	705,99	142,11	114,85	15048,70
TVK37	100,12	658,68	142,11	113,86	15734,20
V1	95,30	626,97	142,11	105,24	14234,80
Ka.	99,73	656,11	142,11	115,77	14030,99
Max	110,42	726,45	142,11	133,44	15734,20
Min	91,31	600,72	142,11	93,10	11262,70
Iskusitkeys Mänty		Tiheys	Ainetta	Charpy iskulujuus	
Kynttilävaha 120 °C					
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
IVK11	22,06	689,38	142,11	125,00	
IVK12	21,82	681,88	142,11	117,50	
IVK13	21,69	677,81	142,11	120,00	
IVK14	21,48	671,25	142,11	120,50	
IVK15	21,45	670,31	142,11	120,50	
IVK16	21,23	663,44	142,11	128,75	
IVK17	20,86	651,88	142,11	114,50	
IVK18	21,29	665,31	142,11	119,50	
IVK19	21,45	670,31	142,11	130,00	
IVK20	21,47	670,94	142,11	125,00	
v1	21,91	684,69	142,11	120,00	
Ka.	21,52	672,47	142,11	121,93	
Max	22,06	689,38	142,11	130,00	
Min	20,86	651,88	142,11	114,50	

Taivutuskappaleet Mänty		Maksimijännitys	Kimmomoduuli
<b>WOP 160 °C</b>			
Tunniste		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
B1-1		52,65	11152,80
B1-2		79,88	12252,70
B1-3		111,04	15200,80
B1-4		93,60	12171,30
B1-5		96,64	14703,60
B1-6		88,37	14684,00
B1-2		62,89	10964,20
B2-2		56,36	11952,50
B3-2		105,75	14259,70
B4-2		80,78	10792,70
B5-2		114,98	14629,80
B6-2		88,48	12916,20
Ka.		85,95	12973,36
Max		114,98	15200,80
Min		52,65	10792,70
Iskusitkeys Mänty		Tiheys	Charpy iskulujuus
<b>WOP 160 °C</b>			
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]
B1-1	18,68	583,84	120,00
B1-2	17,76	555,06	120,00
B1-3	19,68	615,09	57,50
B2-1	18,42	575,59	97,50
B2-2	17,19	537,25	100,00
B2-3	18,06	564,41	90,00
B3-1	18,75	585,97	130,00
B3-2	18,93	591,69	80,00
B3-3	18,95	592,13	105,00
B4-1	19,92	622,34	87,50
B4-2	19,67	614,81	95,00
B4-3	20,00	625,00	72,50
B5-1	20,04	626,31	102,50
B5-2	20,02	625,56	105,00
B5-3	20,09	627,91	97,50
B6-1	17,65	551,56	82,50
B6-2	18,28	571,09	60,00
B6-3	17,55	548,44	92,50
Ka.	18,87	589,67	94,17
Max	20,09	627,91	130,00
Min	17,19	537,25	57,50

Taivutuskappaleet Mänty		Tiheys	Ainetta	Maksimijännitys	Kim.moduuli
Kynttilävaha 160 °C					
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
TVK1	99,79	656,51	141,63	128,78	15157,40
TVK2	105,88	696,58	141,63	110,26	15538,90
TVK3	101,14	665,39	141,63	113,07	14472,00
TVK4	101,39	667,04	141,63	126,85	16533,00
TVK5	102,02	671,18	141,63	122,85	15130,30
TVK6	104,08	684,74	141,63	126,68	15258,40
TVK7	113,62	747,50	141,63	113,46	14680,50
TVK8	119,51	786,25	141,63	103,89	13543,00
TVK9	109,61	721,12	141,63	125,62	15750,50
TVK10	101,82	669,87	141,63	119,17	14903,80
TVK11	95,91	630,99	141,63	108,15	10913,90
TVK12	97,52	641,58	141,63	102,21	11906,50
TVK13	114,48	753,16	141,63	99,47	15593,80
TVK14	112,11	737,57	141,63	116,98	16108,40
TVK15	111,07	730,72	141,63	107,98	15137,80
TVK16	110,52	727,11	141,63	91,08	12062,00
TVK17	107,96	710,26	141,63	123,96	14473,70
TVK18	107,87	709,67	141,63	128,33	14538,90
TVK19	108,94	716,71	141,63	133,20	16063,60
TVK20	112,99	743,36	141,63	132,00	16462,10
V2	92,71	609,93	141,63	99,17	13618,40
Ka.	106,24	698,92	141,63	115,86	14659,38
Max	119,51	786,25	141,63	133,20	16533,00
Min	92,71	609,93	141,63	91,08	10913,90
Iskusitkeys Mänty		Tiheys	Ainetta	Charpy iskul.	
Kynttilävaha 160 °C					
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
IVK1	20,90	653,13	141,63	139,75	
IVK2	20,81	650,31	141,63	107,50	
IVK3	20,51	640,94	141,63	116,25	
IVK4	20,37	636,56	141,63	115,00	
IVK5	20,65	645,31	141,63	138,75	
IVK6	21,02	656,88	141,63	125,00	
IVK7	21,23	663,44	141,63	110,00	
IVK8	21,41	669,06	141,63	118,75	
IVK9	21,59	674,69	141,63	117,50	
IVK10	21,18	661,88	141,63	122,50	
v1	21,31	665,94	141,63	135,00	
v2	21,88	683,75	141,63	120,00	
Ka.	21,07	658,49	141,63	122,17	
Max	21,88	683,75	141,63	139,75	
Min	20,37	636,56	141,63	107,50	



## BRINELL, JANKA, RUUVINVETO JA TABER MITTAUKSET

Brinell/Janka/Ruuvi		Tiheys	ka. Kov.	Janka-kovuus		Ruuvinveto	
ThermoW. Ref.				Sydän	Pinta	Maks.voima	Withdrawal param. f
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[kN]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BJR1-1	252,09	481,27	1,11	2,24	1,79	1213,50	10,79
BJR1-2	241,72	461,47	1,06	1,99	1,97	1690,00	15,02
BJR1-3	257,86	492,29	1,15	1,80	2,13	1659,50	14,75
BJR1-4	225,83	431,14	0,90	1,90	1,50	1433,00	12,74
BJR1-5	223,70	427,07	0,85	1,69	1,59	1361,00	12,10
BJR1-6	223,30	426,31	0,87	1,65	1,45	1284,00	14,27
BJR1-7	255,41	487,61	0,95	1,83	1,96	1401,50	15,57
BJR1-8	241,28	460,63	1,15	1,87	1,81	1412,00	15,69
BJR1-9	252,11	481,31	1,16	2,05	2,13	1418,00	15,76
BJR1-10	248,96	475,30	1,13	2,07	2,10	1533,50	17,04
B1-11	255,11	487,04	1,26	1,97	1,94		
B1-12	261,43	499,10	1,04	2,12	2,05		
B1-13	221,98	423,79	1,06	1,73	1,54		
B1-14	216,89	414,07	1,01	1,64	1,65		
B1-15	222,97	425,68	0,89	1,73	1,47		
B1-16	224,64	428,87	1,00	1,56	1,50		
B1-17	221,73	423,31	1,02	1,77	1,58		
B1-18	225,13	429,80	1,07	1,67	1,59		
B1-19	253,75	484,44	1,23	1,94	1,77		
B1-20	248,79	474,97	1,08	1,87	2,11		
B1-21	249,41	476,16	1,05	1,88	1,89		
B1-22	258,13	492,80	1,16	1,85	1,80		
B1-23	265,91	507,66	1,18	1,99	1,99		
B1-24	239,85	457,90	1,23	2,03	2,02		
B1-25	261,14	498,55	1,23	2,36	1,76		
Ka.	241,96	461,94	1,07	1,89	1,80	1440,60	14,37
Max	265,91	507,66	1,26	2,36	2,13	1690,00	17,04
Min	216,89	414,07	0,85	1,56	1,45	1213,50	10,79
Taber		Tiheys	Kierrokset	Mittaus Puoli		Urasyvyyys	
ThermoWood ref.							
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]				[µm]	
TA1	86,08	434,75	1000,00				
TA2	85,62	432,42	500,00	Sydän			
TA3	86,16	435,15	500,00	Pinta		1298,22	
Ka.	85,95	434,11					

B/J/R ThermoW.		Tiheys	ka. Kov.	Janka-kovuus		Ruuvinveto	
Waradur OP 140-130 °C				Sydän	Pinta	Maks.voim.	Withdrawal param. f
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[kN]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BJR4-1	234,17	509,07	1,14	1,81	1,86	1041,50	11,29
BJR4-2	226,18	491,70	1,19	1,69	1,75	1035,50	11,22
BJR4-3	226,63	492,67	1,20	1,83	1,81	1155,50	12,53
BJR4-4	229,20	498,26	1,06	1,84	1,88	1018,50	11,04
BJR4-5	227,96	495,57	1,14	1,73	1,86	1012,50	11,25
BJR4-6	240,10	521,96	1,14	1,98	1,80	1140,00	12,67
BJR4-7	228,57	496,89	1,30	1,92	1,90	1041,50	11,57
BJR4-8	235,05	510,98	1,22	1,57	1,92	1088,00	12,09
Ka.	230,98	502,14	1,17	1,80	1,85	1066,63	11,71
Max	240,10	521,96	1,30	1,98	1,92	1155,50	12,67
Min	226,18	491,70	1,06	1,57	1,75	1012,50	11,04
Taber ThermoWood		Tiheys	Kierrokset	Mittauspuoli		Urasyvyyys	
Waradur OP 140-130 °C							
Tunniste	m1 [g]	[kg/m <sup>3</sup> ]				[µm]	
TW4-1	92,88	464,40	500,00	Pinta		243,76	
TW4-2	91,97	459,85	500,00	Pinta		313,98	
TW4-3	93,76	468,80	500,00	Pinta		260,91	
Ka.	92,87	464,35					

B/J/R ThermoW.		Tiheys	Ainetta	ka. Kovuus	Janka-kovuus		Ruuvinveto	
Kynttiläväh. 120 °C					S	P	Maks.voima	Withd. parameter f
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[kN]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BJR8-1	302,07	576,69	99,29	1,31	2,03	2,06	1667,00	14,82
BJR8-2	309,41	590,70	99,29	1,14	1,77	1,80	1538,00	13,67
BJR8-3	324,29	619,11	99,29	1,27	2,10	2,03	1664,50	14,80
BJR8-4	297,94	568,80	99,29	1,30	1,80	1,76	1468,00	13,05
BJR8-5	287,72	549,29	99,29	1,36	1,64	2,09	1590,00	14,13
BJR8-6	298,10	569,11	99,29	1,30	1,78	1,65	1211,50	13,46
BJR8-7	298,84	570,52	99,29	1,13	1,51	1,72	832,00	9,24
BJR8-8	315,63	602,58	99,29	1,14	1,54	1,79	871,00	9,68
BJR8-9	321,99	614,72	99,29	1,17	1,87	1,68	1105,50	12,28
BJR8-10	299,33	571,46	99,29	1,19	1,55	1,72	1195,00	13,28
BJR8-11	310,28	592,36	99,29	1,36	1,57	1,59		
BJR8-12	339,12	647,42	99,29	1,57	2,29	1,98		
Ka.	308,73	589,40	99,29	1,27	1,79	1,82	1314,25	12,84
Max	339,12	647,42	99,29	1,57	2,29	2,09	1667,00	14,82
Min	287,72	549,29	99,29	1,13	1,51	1,59	832,00	9,24
Taber ThermoW.		Tiheys	Ainetta	Kierrokset	Mittauspuoli		Urasyvyys	
Kynttiläväh. 120 °C								
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]				[µm]	
TK2-4	114,73	591,39	99,29	500,00		Pinta	100,23	
TK2-5	103,88	535,46	99,29	500,00		Pinta	87,55	
TK2-6	115,04	592,99	99,29	500,00		Pinta	94,60	
Ka.	111,22	573,28						

B/J/R ThermoW.		Tiheys	Ainetta	ka. Kovuus	Janka-kovuus		Ruuvinveto	
Waradur OP 160 °C					S	P	Maks.voima	Withd. parameter f
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[kN]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BJR2-1	268,15	456,04	32,37	1,13	1,77	2,01	1765,50	15,69
BJR2-2	319,59	543,52	32,37	1,24	1,66	1,91	1892,50	16,82
BJR2-3	289,66	492,62	32,37	1,14	1,81	2,00	1370,50	12,18
BJR2-4	300,04	510,27	32,37	1,06	1,56	1,74	1342,00	11,93
BJR2-5	289,36	492,11	32,37	0,95	1,62	1,68	1064,00	11,82
BJR2-6	281,54	478,81	32,37	1,04	1,52	1,65	1279,50	14,22
BJR2-7	280,13	476,41	32,37	1,29	1,97	1,80	1103,50	12,26
BJR2-8	259,12	440,68	32,37	0,98	1,81	1,58	1203,50	13,37
BJR2-9	278,43	473,52	32,37	1,15	1,75	1,62	1194,00	13,27
BJR2-10	284,37	483,62	32,37	1,18	2,05	1,75		
BJR2-11	248,29	422,26	32,37	1,14	1,92	1,68		
BJR2-12	244,17	415,26	32,37	1,12	2,16	1,65		
Ka.	278,57	473,76	32,37	1,12	1,80	1,76	1357,22	13,51
Max	319,59	543,52	32,37	1,29	2,16	2,01	1892,50	16,82
Min	244,17	415,26	32,37	0,95	1,52	1,58	1064,00	11,82
Taber ThermoWood		Tiheys	Ainetta	Kierrokset	Mittauspuoli		Urasyvyys	
Waradur OP 160 °C								
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]				[µm]	
TW6-1	86,98	448,35	32,37	500,00	Sydän		286,65	
TW6-2	86,15	444,07	32,37	500,00	Sydän		218,67	
TW6-3	79,49	409,74	32,37	500,00	Sydän		285,21	
Ka.	84,21	434,05						

B/J/R ThermoW.		Tiheys	Ainetta	ka. Kovuus	Janka-kovuus		Ruuvinveto	
Kynttilävaha 160 °C					S	P	Maks.voima	Withd. parameter f
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[kN]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BJR6-1	292,11	557,67	132,62	1,08	1,60	1,88	1438,50	12,79
BJR6-2	313,68	598,85	132,62	1,03	1,74	1,39	1199,50	10,66
BJR6-3	303,26	578,96	132,62	0,95	1,64	1,52	1251,50	11,12
BJR6-4	306,09	584,36	132,62	1,08	1,68	1,62	1294,00	11,50
BJR6-5	290,75	555,08	132,62	0,98	1,70	1,36	1200,00	10,67
BJR6-6	302,52	577,55	132,62	1,03	2,39	1,50	1637,50	18,19
BJR6-7	267,53	510,75	132,62	0,88	1,33	1,36	1038,00	11,53
BJR6-8	303,84	580,07	132,62	1,13	1,70	1,74	977,50	10,86
BJR6-9	308,79	589,52	132,62	1,13	1,85	1,69	1307,50	14,53
BJR6-10	295,14	563,46	132,62	0,95	1,35	1,42	859,50	9,55
BJR6-11	306,14	584,46	132,62	1,39	1,77	1,83		
BJR6-12	307,42	586,90	132,62	1,15	1,75	1,75		
Ka.	299,77	572,30	132,62	1,06	1,71	1,59	1220,35	12,14
Max	313,68	598,85	132,62	1,39	2,39	1,88	1637,50	18,19
Min	267,53	510,75	132,62	0,88	1,33	1,36	859,50	9,55
Taber ThermoWood		Tiheys	Ainetta	Kierrokset	Mittauspuoli		Urasyyvyys	
Kynttilävaha 160 °C								
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]				[µm]	
TK6-4	107,33	553,25	132,62	500,00	Pinta		105,94	
TK6-5	102,67	529,23	132,62	500,00	Pinta		88,00	
TK6-6	99,87	514,79	132,62	500,00	Pinta		124,67	
Ka.	103,29	532,42						

B/J/R Mänty		Tiheys	ka. Kovuus	Janka-kovuus		Ruuvinveto	
Mänty Ref.				S	P	Maks.voima	Withd. parameter f
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[kN]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
M1	174,95	474,12	1,60	2,20	2,18	1619,00	19,99
M2	189,11	512,49	1,61	2,98	2,34	1905,00	23,52
M3	186,34	504,99	1,70	2,62	2,46	1951,25	24,09
M4	186,91	506,53	1,62	3,16	2,28	2135,00	26,36
M5	492,58	571,17	1,64	2,89	3,78	1986,25	17,66
M6	401,02	465,00	1,21	1,95	2,26	1878,00	16,69
M7	491,12	569,48	2,05	3,29	3,75	2412,50	21,44
M8	401,93	466,06	1,26	1,92	1,98	2991,25	26,59
M9	434,56	503,90	1,47	2,61	3,39	1943,75	17,28
M10	329,45	382,02	1,06	2,23	1,73	1588,00	14,12
Ka.	328,80	495,58	1,52	2,59	2,61	2041,00	20,77
Max	492,58	571,17	2,05	3,29	3,78	2991,25	26,59
Min	174,95	382,02	1,06	1,92	1,73	1588,00	14,12
Taber		Tiheys	Kierrokset	Mittauspuoli		Urasyyvyys	
Mänty referenssi							
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]				[µm]	
M1	89,28	496,02	500,00	Pinta		544,82	
M2	89,98	499,87	500,00	Pinta		440,23	
M3	80,65	448,06	500,00	Pinta		866,93	
Ka.	86,64						

B/J/R Mänty		Tiheys	ka. Kovuus	Janka-kovuus		Ruuvinveto	
Waradur OP 140-130 °C				S	P	Maks.voima	Withd. parameter f
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[kN]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BJR5-1	207,94	577,61	2,23	3,25	2,29	2271,25	24,62
BJR5-2	190,14	528,17	2,92	2,73	2,20	1931,25	20,94
BJR5-3	181,89	505,25	0,95	1,44	1,85	1252,00	13,57
BJR5-4	167,39	464,97	0,98	1,54	1,79	1193,00	12,93
BJR5-5	241,33	670,36	2,43	2,90	2,95	2143,75	23,24
BJR5-6	229,29	636,92	2,35	2,87	3,49	1912,50	21,25
BJR5-7	235,57	654,36	2,57	2,95	2,93	1786,50	19,85
BJR5-8	223,53	620,92	2,82	2,67	3,07	1751,50	19,46
BJR5-9	180,29	500,81	1,83	2,14	2,21	1468,00	16,31
BJR5-10	201,65	560,14	2,23	1,87	2,10	1461,00	16,23
Ka.	205,90	571,95	2,13	2,44	2,49	1717,08	18,84
Max	241,33	670,36	2,92	3,25	3,49	2271,25	24,62
Min	167,39	464,97	0,95	1,44	1,79	1193,00	12,93
Taber Mänty		Tiheys	Kierrokset	Mittauspuoli		Urasyvyyys	
Waradur OP 140-130 °C							
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]				[µm]	
TW4-4	128,79	643,95	500,00	Pinta		233,93	
TW4-5	120,38	601,90	500,00	Pinta		271,41	
TW4-6	101,56	507,80	500,00	Pinta		177,66	
Ka.	116,91	584,55					

B/J/R Mänty		Tiheys	Ainetta	ka. Kovuus	Janka-kovuus		Ruuvinveto	
Kynttilävaha 120 °C					S	P	Maks.voima	Withd. parameter f
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[kN]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BRJ9-1	504,69	616,68	51,57	1,72	1,96	1,87	2148,75	19,10
BRJ9-2	509,29	622,30	51,57	1,79	2,03	2,20	2038,75	18,12
BRJ9-3	478,94	585,22	51,57	1,61	2,03	2,27	2227,50	19,80
BRJ9-4	436,87	533,81	51,57	1,30	2,07	1,91	2162,50	19,22
BRJ9-5	472,89	577,82	51,57	1,42	2,03	2,28	2017,50	17,93
BRJ9-6	433,45	529,63	51,57	1,43	1,96	1,89	1595,00	17,72
BRJ9-7	477,50	583,46	51,57	1,70	2,17	2,36	1833,50	20,37
BRJ9-8	482,02	588,98	51,57	1,95	2,43	2,42	1962,50	21,81
BRJ9-9	505,07	617,14	51,57	2,01	2,72	2,33	2038,75	22,65
Ka.	477,86	583,89	51,57	1,66	2,15	2,17	2002,75	19,64
Max	509,29	622,30	51,57	2,01	2,72	2,42	2227,50	22,65
Min	433,45	529,63	51,57	1,30	1,96	1,87	1595,00	17,72
Taber Mänty		Tiheys	Ainetta	Kierrokset	Mittauspuoli		Urasyvyys	
Kynttilävaha 120 °C								
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]				[µm]	
TK2-1	131,94	653,17	138,58	500,00	Pinta		75,32	
TK2-2	130,98	648,42	138,58	500,00	Pinta		79,97	
TK2-3	120,36	595,84	138,58	500,00	Pinta		90,89	
Ka.	127,76	632,48						



B/J/R Mänty		Tiheys	Ainetta	ka. Kovuus	Janka-kovuus		Ruuvinveto	
Waradur OP 160 °C					S	P	Maks.voima	Withd. parameter f
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[kN]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BJR3-1	373,17	586,75	13,15	1,35	1,55	2,43	1573,50	13,99
BJR3-2	340,45	535,30	13,15	1,45	1,53	2,32	1662,00	14,77
BJR3-3	366,30	575,94	13,15	1,34	1,56	2,19	1639,00	14,57
BJR3-4	312,95	492,06	13,15	1,28	1,76	1,95	1668,00	14,83
BJR3-5	358,09	563,03	13,15	1,45	1,70	2,18	1545,00	13,73
BJR3-6	318,02	500,03	13,15	1,12	1,99	2,38	1448,50	16,09
BJR3-7	314,66	494,75	13,15	1,13	2,07	2,38	1563,50	17,37
BJR3-8	358,30	563,36	13,15	1,42	2,29	2,43	1468,00	16,31
BJR3-9	311,49	489,76	13,15	1,29	2,39	2,20	1519,00	16,88
BJR3-10	321,31	505,20	13,15	1,63	1,92	1,86		
BJR3-11	341,64	537,17	13,15	1,50	1,77	1,95		
BJR3-12	353,88	556,42	13,15	1,27	1,99	1,98		
Ka.	339,19	533,31	13,15	1,35	1,88	2,19	1565,17	15,39
Max	373,17	586,75	13,15	1,63	2,39	2,43	1668,00	17,37
Min	311,49	489,76	13,15	1,12	1,53	1,86	1448,50	13,73
Taber Mänty		Tiheys	Ainetta	Kierrokset	Mittauspuoli		Urasyyvyys	
Waradur OP 160 °C								
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]				[µm]	
TW6-4	104,44	522,20	13,15	500,00	Pinta		336,05	
TW6-5	93,48	467,40	13,15	500,00	Pinta		293,87	
TW6-6	93,93	469,65	13,15	500,00	Pinta		269,83	
Ka.	97,28	486,42						

B/J/R Mänty		Tiheys	Ainetta	ka. Kovuus	Janka-kovuus		Ruuvinveto	
Kynttilävaha 160 °C					S	P	Maks.voima	Withd. parameter f
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[HB]	[kN]	[kN]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BJR7-1	493,83	603,41	79,09	1,47	2,15	2,00	1813,50	16,12
BJR7-2	479,95	586,45	79,09	1,63	1,98	2,21	1802,00	16,02
BJR7-3	509,36	622,39	79,09	1,48	2,29	1,65	2020,00	17,96
BJR7-4	494,29	603,97	79,09	1,28	1,96	1,97	1598,00	14,20
BJR7-5	489,94	598,66	79,09	1,31	1,69	1,83	1717,00	15,26
BJR7-6	494,45	604,17	79,09	1,36	1,81	1,75	1510,00	16,78
BJR7-7	491,07	600,04	79,09	1,39	2,05	1,88	1354,00	15,04
BJR7-8	448,05	547,47	79,09	1,31	1,82	2,07	1364,00	15,16
BJR7-9	486,57	594,54	79,09	1,27	1,83	1,93	1346,50	14,96
Ka.	487,50	595,68	79,09	1,39	1,95	1,92	1613,89	15,72
Max	509,36	622,39	79,09	1,63	2,29	2,21	2020,00	17,96
Min	448,05	547,47	79,09	1,27	1,69	1,65	1346,50	14,20
Taber Mänty		Tiheys	Ainetta	Kierrokset	Mittauspuoli		Urasyvyys	
Kynttilävaha 160 °C								
Tunniste	m1 [g]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]				[µm]	
TK6-1	132,40	668,69	160,75	500,00	Sydän		107,40	
TK6-2	133,57	674,60	160,75	500,00	Sydän		143,31	
TK6-3	124,72	629,90	160,75	500,00	Sydän		75,51	
Ka.	130,23	657,73						

## HÖYRYLÄMPÖKÄSITTELYN TULOKSET

Taivutus mänty 160 °C/3h Ilmanpaine					
	m1	Tilavuus	Tiheys	Taiv. Lujuus	Kimmomoduuli
Tunniste	[g]	[mm <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1,00	47,84	110160,00	434,28	67,22	9678,53
2,00	54,07	110160,00	490,83	68,89	11727,10
3,00	46,24	110160,00	419,75	70,35	9734,75
4,00	53,42	110160,00	484,93	76,32	10006,70
5,00	48,16	110160,00	437,18	68,54	10385,20
6,00	53,37	110160,00	484,48	79,38	11934,70
7,00	51,65	110160,00	468,86	81,81	10662,50
8,00	51,29	110160,00	465,60	75,69	10909,10
9,00	53,28	110160,00	483,66	90,56	13010,40
10,00	52,68	110160,00	478,21	77,01	11274,70
Ka.	51,20	110160,00	464,78	75,58	10932,37
Maksimi	54,07	110160,00	490,83	90,56	13010,40
Minimi	46,24	110160,00	419,75	67,22	9678,53
Std.	2,78	0,00	25,27	7,24	1070,19
Iskusitkeys mänty 160 °C/3h Ilmanpaine					
	m1	Tilavuus	Tiheys	Iskulujuus	
Tunniste	[g]	[mm <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
11,10	14,33	32000,00	447,81	135,00	
11,20	14,24	32000,00	445,00	117,50	
12,20	12,43	32000,00	388,44	187,50	
13,10	13,26	32000,00	414,38	110,00	
13,20	12,93	32000,00	404,06	155,00	
14,10	15,06	32000,00	470,63	82,50	
14,20	15,99	32000,00	499,69	65,00	
15,20	15,67	32000,00	489,69	117,50	
Ka.	14,24	32000,00	444,96	121,25	
Maksimi	15,99	32000,00	499,69	187,50	
Minimi	12,43	32000,00	388,44	65,00	
Std.	1,30	0,00	40,47	38,80	

Taivutus hallikuiva mänty 160 °C/3h RH 100% 6,7-7,6 bar					
	m1	Tilavuus	Tiheys	Taiv. Lujuus	Kimmomoduuli
Tunniste	[g]	[mm <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
12,00	47,18	110160,00	428,29	66,31	10930,30
13,00	55,90	110160,00	507,44	73,89	13749,30
15,00	54,14	110160,00	491,47	82,76	12687,30
16,00	54,20	110160,00	492,01	61,77	11293,10
18,00	46,85	110160,00	425,29	53,20	10021,40
19,00	50,10	110160,00	454,79	47,69	10289,00
Ka.	51,40	110160,00	466,55	64,27	11495,07
Maksimi	55,90	110160,00	507,44	82,76	13749,30
Minimi	46,85	110160,00	425,29	47,69	10021,40
Std.	3,89	0,00	35,34	12,98	1448,38
Iskusitkeys hallikuiva mänty 160 °C/3h RH 100% 6,7-7,6 bar					
	m1	Tilavuus	Tiheys	Iskulujuus	
Tunniste	[g]	[mm <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
16,10	12,06	32000,00	376,88	175,00	
16,20	12,24	32000,00	382,50	175,00	
17,10	12,63	32000,00	394,69	102,50	
17,20	12,81	32000,00	400,31	225,00	
18,10	12,46	32000,00	389,38	100,00	
18,20	12,35	32000,00	385,94	102,50	
19,10	15,38	32000,00	480,63	145,00	
19,20	15,44	32000,00	482,50	195,00	
20,10	14,04	32000,00	438,75	180,00	
20,20	13,99	32000,00	437,19	175,00	
Ka.	13,34	32000,00	416,88	157,50	
Maksimi	15,44	32000,00	482,50	225,00	
Minimi	12,06	32000,00	376,88	100,00	
Std.	1,29	0,00	40,17	43,33	

Taivutus tuore mänty 160 °C/3h RH 100% 6,7-7,6 bar					
	m1	Tilavuus	Tiheys	Taiv. Lujuus	Kimmomoduuli
Tunniste	[g]	[mm <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1,10	56,40	113400,00	497,35	53,13	9097,06
1,20	58,65	113400,00	517,20	48,40	8760,35
3,10	55,65	113400,00	490,74	50,76	10566,80
3,20	57,76	113400,00	509,35	65,56	12419,00
4,10	53,74	113400,00	473,90	69,72	11569,30
4,20	54,24	113400,00	478,31	77,22	12440,20
5,10	58,62	113400,00	516,93	62,92	11678,40
5,20	59,20	113400,00	522,05	66,25	12466,30
6,10	54,13	113400,00	477,34	59,31	9682,01
6,20	51,35	113400,00	452,82	49,38	10117,60
7,10	53,69	113400,00	473,46	70,35	11231,40
7,20	55,12	113400,00	486,07	60,00	9093,96
8,10	52,45	113400,00	462,52	57,43	9362,95
9,10	57,09	113400,00	503,44	62,64	11855,50
10,10	52,07	113400,00	459,17	68,40	10769,00
10,20	52,27	113400,00	460,93	86,11	11537,90
11,10	50,14	113400,00	442,15	55,83	11017,40
11,20	50,42	113400,00	444,62	70,76	10993,00
Ka.	54,61	113400,00	481,57	63,01	10814,34
Maksimi	59,20	113400,00	522,05	86,11	12466,30
Minimi	50,14	113400,00	442,15	48,40	8760,35
Std.	2,88	0,00	25,38	9,98	1217,12
Iskusitkeys tuore mänty 160 °C/3h RH 100% 6,7-7,6 bar					
	m1	Tilavuus	Tiheys	Iskulujuus	
Tunniste	[g]	[mm <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	
1,00	17,21	32000,00	537,81	140,00	
2,00	17,78	32000,00	555,63	222,50	
3,00	16,36	32000,00	511,25	187,50	
4,00	16,24	32000,00	507,50	152,50	
5,00	15,61	32000,00	487,81	105,00	
6,00	15,15	32000,00	473,44	170,00	
7,00	16,84	32000,00	526,25	175,00	
8,00	16,39	32000,00	512,19	192,50	
9,00	14,58	32000,00	455,63	112,50	
10,00	15,66	32000,00	489,38	90,00	
11,00	14,29	32000,00	446,56	115,00	
Ka.	16,01	32000,00	500,31	151,14	
Maksimi	17,78	32000,00	555,63	222,50	
Minimi	14,29	32000,00	446,56	90,00	
Std.	1,08	0,00	33,67	42,24	