

Opinnäytetyö (AMK)

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2022

Miikka Puranen

KONSTRUKTIIVISEN VILLAN LEIKKAUSMODUULIN MITTAUSMENETELMÄN KEHITYSTYÖ



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2022 | 49 sivua

Miikka Puranen

Konstruktiivisen villan leikkausmoduulin mittausmenetelmän kehitystyö

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää konstruktiivisen villan leikkausmoduulimäärityksen menetelmää niin, että leikkausmoduuli saataisiin määritettyä epäsuorasti giljotiinitestilaitteiston avulla. Työssä vertailtiin kolmea eri leikkausmoduulia mittaavaa menetelmää: giljotiini, palkkitesti ja kahden kappaleen leikkauslujuus. Tavoite oli löytää menetelmien tulosten välillä korrelaatiota ja yhtäläisyyttä tulosten keskiarvoissa.

Giljotiinimenetelmää haluttiin kehittää Paroc Groupin jokapäiväiseksi menetelmäksi, sillä giljotiini on menetelmänä nopeampi ja halvempi kuin muut leikkausmoduulia mittaavat menetelmät. Giljotiinimenetelmä ei tarvitse sahauksen ja dimensioiden mittauksen jälkeen muita esivalmisteluja ennen koestusta.

Opinnäytetyön tuloksina keskiarvojen yhtä suuruutta mittaava t-testi osoitti keskiarvojen olevan yhtäsuuria osalla tuote-eristä giljotiinin ja palkkitestin välillä. Giljotiinin ja kahden kappaleen leikkauslujuuden välillä yhtäsuuruutta ei havaittu. Työ antoi ideoita giljotiinimenetelmän kehittämiseksi niin, että se saataisiin Paroc Groupin jokapäiväiseen käyttöön.

Asiasanat:

Giljotiinimenetelmä, palkkitesti, kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmä, leikkausmoduuli, leikkauslujuus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Chemical and Materials Engineering

2022 | 49 pages

Miikka Puranen

Development of structural wool shear module determination method

The purpose of this thesis was to develop a guillotine method for measuring the shear modulus of structural wool. In this study three different methods for measuring the shear modulus were compared: the guillotine, the beam test and the two-specimen shear strength method. The goal was to find difference between results means.

There was a desire to develop the guillotine method as an everyday method by the Paroc Group Oy. Guillotine method is faster and cheaper than the other methods for shear modulus determination. After sawing and dimension measurement, the guillotine method does not require any further preparation before the determination.

The t-test which shows differences between the mean values showed that there was no differences in the mean values between the guillotine and the beam test. T-test showed a major statistical difference between the guillotine and the two-specimen shear strength method. This study gave suggestion for further development of the guillotine method so that it could be used as an everyday method for shear modulus measurement at Paroc.

Keywords:

Guillotine method, beam test, two specimen shear strength method, shear module, shear strength

Sisältö

Lyhenteet	7
1 Johdanto	8
1.1 Paroc Group Oy	9
2 Kivivilla	11
2.1 Kivivillan valmistus	11
2.2 Kivivillan leikkausominaisuudet	11
3 Menetelmät	13
3.1 Palkkitesti	13
3.2 Kahden kappaleen leikkauslujuus	16
3.3 Giljotiinimenetelmä	18
4 Käytetyt materiaalit ja valmistelu	21
4.1 Näytteiden sahaus	21
4.2 Näytteiden mittaus	22
4.3 Näytteiden esivalmistelu	23
4.4 Näytteiden koestus	26
4.4.1 Giljotiinimenetelmä	26
4.4.2 Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmä	29
4.4.3 Palkkitesti	31
4.5 Tulosten laskeminen	33
5 Tulokset	35
5.1 Tulokset eri venymäalueella	37
5.2 T-testien tulokset ja tulkinta	38
5.3 Giljotiinin etujen arviointi	42
5.3.1 Ajalliset säästöt	43
5.3.2 Taloudelliset säästöt	44
6 Yhteenveto	46
6.1 Johtopäätökset	46

6.2 Jatkokehitys	47
6.3 Loppusanat	48
Lähteet	49

Kuvat

Kuva 1. Punavalkoraidallinen pakkaus	9
Kuva 2. Näytekappale lamellisuunnassa	14
Kuva 3. Kahden kappaleen leikkauslujuus koekappale. Kuvassa 1) kuormituslevy, 2) näyte, 3) liima, 4) näytetuki (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2013)	16
Kuva 4. Voima-siirtymäkäyrä. Kuvassa F on voima (N), y on siirtymä (mm), α on tangentin kulma, F_e on voiman muutos (N) ja y_e on siirtymän muutos	17
Kuva 5. Giljotiinilaitteisto	19
Kuva 6. Mittapöytä	22
Kuva 7. Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän tukivanerit	23
Kuva 8. Valmis näytekappale	24
Kuva 9. Palkkien kuivausteline	26
Kuva 10. Giljotiinin alkutilanne	27
Kuva 11. Giljotiinin leikkausmurtuma	28
Kuva 12. Kahden kappaleen leikkauslujuus alkutilanne	30
Kuva 13. Kahden kappaleen leikkauslujuus leikkausmurtuma	31
Kuva 14. Palkkitemsti alkutilanne	32
Kuva 15. Palkkitemsti leikkausmurtuma	33

Kuviot

Kuvio 1. Giljotiinin voima-siirtymäkäyrä. Prosenttipisteet ovat tietty prosenttiosuuksia maksimivoimasta.	28
---	----

Kuvio 2. Voima-siirtymäkäyrä kullakin menetelmällä	36
--	----

Taulukot

Taulukko 1. Testatut tuote-erät	21
Taulukko 2. Menetelmien leikkausmoduulit ja keskihajonnat	35
Taulukko 3 Giljotiinin leikkausmoduulit eri venymäalueilla	38
Taulukko 4. Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän - giljotiini p-arvot	39
Taulukko 5. Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän - giljotiini keskiarvojen erotus	40
Taulukko 6. Palkkitestin - giljotiinin p-arvot	41
Taulukko 7. Palkkitestin - giljotiini keskiarvojen erotus	42
Taulukko 8. Menetelmiin käytettävä työaika	43

Lyhenteet

b	Näytteen leveys
d	Näytteen paksuus
e	Peltien keskiöväli
F_{max}	Maksimi muortokuorma
G	Leikkausmoduuli
$G10_{30}$	Leikkausvenymäalue 10-30 %
Ka	Keskiarvo
l	Näytteen pituus
R&D	Research and development, tutkimus- ja tuotekehitysosasto
s	Keskihajonta
$\tan \alpha$	Voima-siirtymäkäyrän kulmakerroin
ΔF	Murtokuorma
Δws	taipuman leikkauksen osuus
τ	Leikkauslujuus

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää konstruktiivisen villan leikkausmoduulimäärityksen giljotiinimenetelmää, niin että tämä ominaisuus saadaan määriteltyä epäsuorana menetelmänä leikkauslujuusmäärityksessä käytettävän giljotiini-testilaitteen avulla. Tavoite on, että giljotiinimenetelmästä tulisi Paroc Groupin jokapäiväinen nopeampi leikkausmoduulin määrittävä analyysimenetelmä verrattuna nykyään käytössä oleviin menetelmiin, joten haetaan menetelmien tulosten välisiä eroja.

Työ toteutettiin Parocin R&D laboratoriotiloissa Paraisilla. Työssä vertailtiin kolmen eri leikkauslujuutta mittaavan menetelmän välisiä tulosten keskiarvojen eroja useammalla tuotteella eri tuotantolinjoilta. Käytettävät menetelmät olivat palkkitesti, kahden kappaleen leikkauslujuus ja giljotiinimenetelmä. Kahden kappaleen leikkauslujuus ja giljotiinimenetelmä perustuvat standardiin EN 12090 ja palkkitesti standardiin EN 14509

Työn aihe perustui Parocin haluun kehittää nopeampi menetelmä leikkausmoduulin määrittämiseen sekä saada giljotiinimenetelmä jokapäiväiseen käyttöön yrityksessä. Giljotiinimenetelmän muita etuja ajan säästämisen lisäksi ovat myös taloudelliset säästöt, sillä giljotiinimenetelmän näytteisiin ei tehdä sahausen jälkeen muita esivalmisteluja. Henkilökohtaisesti kiinnostuksen aihetta kohtaan loi halu olla mukana kehittämässä uutta menetelmää yrityksen käyttöön ja oppia sekä kehittää taitoja menetelmäkehityksen parissa. Menetelmäkehityksen tilastollinen analysointi oli itseä kiinnostava osa-alue, josta halusin erityisesti kerätä oppia ja saavuttaa tilastollisen analysoinnin taitoja, joita pystyn hyödyntämään opinnäytetyön jälkeenkin.

Tässä työssä mitattiin yhteensä neljää eri tuotetta neljältä eri tuotantolinjalta siten, että tuotantoeria oli yhteensä kahdeksan. Jokaisesta tuotantoerästä valmistettiin 20 näytettä kullekin menetelmälle. Jokaiselle menetelmälle tehtiin yhteensä 160 mittausta. Kun näytteet oli mitattu, niin giljotiinimenetelmän tuloksille laskettiin leikkausmoduuli. Kahden kappaleen leikkauslujuuden ja

palkkitestin laitteisto laskee automaattisesti leikkauslujuuden ja leikkausmoduulin. Tulokset yhdistettiin yhdeksi taulukoksi ja tehtiin menetelmien keskiarvojen eroja havainnollistava t-testi.

1.1 Paroc Group Oy

Paroc tuottaa mineraalikivestä valmistettuja kivivilla eristeratkaisuja rakennus-, offshore- ja meriteollisuuteen. Paroc on markkinaosuudella mitattuna markkinajohtaja Suomessa, Ruotsissa ja Baltian maissa. Parocilla on yhteensä seitsemän tehdasta Suomessa, Ruotsissa, Venäjällä, Puolassa ja Liettuassa. Suomen tehdas sijaitsee Paraisilla ja Parocin pääkonttori Helsingissä. Parocin tuotteet ovat tulleet kuluttajille tutuksi punavalkoraidallisesta pakkauksestaan. (Kuva 1) (Paroc Group Oy, 2022)



Kuva 1. Punavalkoraidallinen pakkaus

Vuonna 2018 Paroc myytiin Yhdysvaltalaiselle Owens Corningille. Owens Corningin tuottaa eristeitä, katto- ja lasikuitumateriaaleja. Parocin oston myötä Owens Corning laajensi toimintaansa Euroopan markkinoille ja kivivillan tuotantoon. Paroc jatkaa oston myötä osana Owens Corning konsernia, mutta Paroc liiketoiminta ja tavaramerkki säilyvät. Owens Corningin pääkonttori

sijaitsee Toledossa Ohiossa ja yrityksen liikevaihto vuonna 2020 oli 7,1 miljardia dollaria. Yritys työllistää yhteensä n. 19 000 ihmistä 33 eri maassa. (Paroc Group Oy, 2018; Owens Corning, 2021.)

2 Kivivilla

2.1 Kivivillan valmistus

Kivivillan valmistukseen käytetään emäksisiä vulkaanisia kivilajeja kuten basalttia, gabroa, anortosiittia ja dolomiittia. Vulkaaninen kivi sulatetaan tehtaan uuneissa kivisulaksi 1500 °C lämpötilassa. Sulanut kivimassa valutetaan nopeasti pyörivään linkoon, jossa sula kivimassa venyy ilmavirran vaikutuksesta pitkiksi, mutta ohuiksi kuiduiksi. Kuitujen keskipaksuus on 3-12 µm ja keskipituus 2-4 mm. Kuidutuksen yhteydessä kivisulaan lisätään orgaanista sideainetta, joka pitää kuituja paikoillaan ja yksittäisistä kuiduista saadaan aikaan mattomainen rakenne. Sideainetta lisätään yleensä 2-4 % tuotteen painosta. Sideaineen lisäksi tuotteeseen voidaan lisätä erilaisia lisäaineita. Näiden tavoitteena on parantaa tuotteen ominaisuuksia kuten palo-ominaisuuksia ja kosteuden kestoa. Kuitumatto siirtyy seuraavassa vaiheessa karkaisu-uuniin, jossa tuote puristetaan haluttuun paksuuteen ja kuumennetaan n. 250 °C lämpötilaan, jolloin sideaine kovettuu, sitoo kuidut toisiinsa ja tuote saa lopulliset ominaisuutensa. Lopullisen tuotteen tilavuudesta 95-99 % on ilmaa, vaikka tuotteen painosta 96-98 % on kivimassaa. Kun kivivillamatot ovat jäähtyneet, ne leikataan sopiviin mittoihin ja pakataan. (Siikanen, 2009.)

2.2 Kivivillan leikkausominaisuudet

Kivivillan leikkausominaisuuksia mitatessa näytekappaleisiin kohdistetaan pystysuora leikkausrasitus, joko suoraan näytekappaleeseen tai näytteeseen kiinnitettyjen jäykkien tukien välityksellä. Menetelmistä piirtyy voima-siirtymäkäyrä, jonka avulla voidaan määrittää näytteen leikkauslujuus ja leikkausmoduuli.

Leikkausmoduuli, G on leikkausjännitys suhteessa muodonmuutokseen, kun niiden suhde on lineaarinen. Leikkausmoduulin arvosta G selviää kuinka näyte vastustaa muodonmuutosta. Korkean G arvon omaava tuote vastustaa

muodonmuutosta voimakkaasti eli näyte vaatii suuremman voiman, jotta näytteessä tapahtuisi muodonmuutosta. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2013.)

Leikkauslujuus, τ , on näytteeseen kohdistuva maksimivoima, joka aiheuttaa näytteeseen murtuman voimansuuntaisessa tasossa. Voima suhteutetaan tuotteen pinta-alaan, jotta näytteet ovat vertailukelpoisia. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2013.)

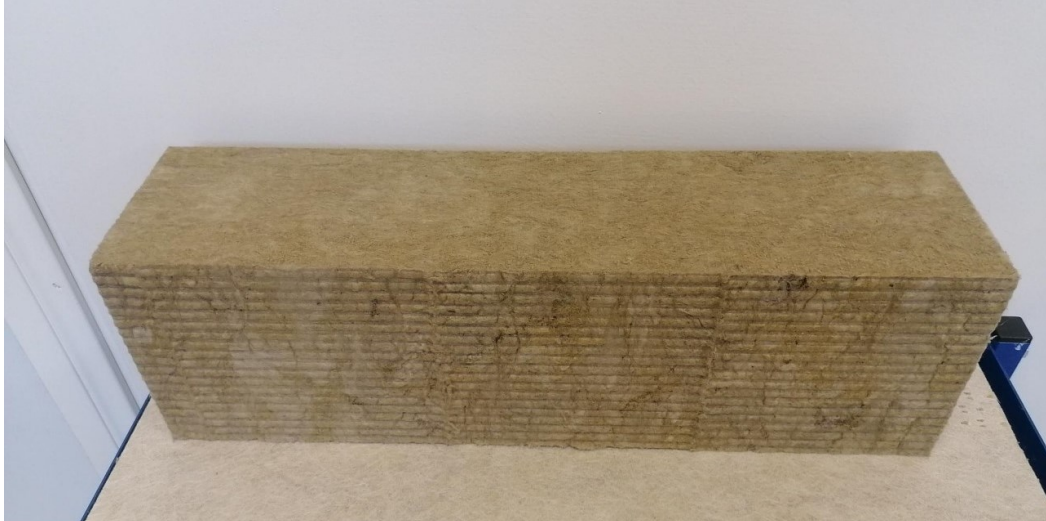
3 Menetelmät

Työssä vertaillaan kolmea eri menetelmää: Giljotiinia, kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmää ja palkkitestiä. Kustakin menetelmästä määritetään leikkauslujuus ja leikkausmoduuli eri venymäalueilla.

3.1 Palkkitesti

Menetelmällä määritetään sandwich-rakenteen tarkoitetun konstruktiivisen villan leikkausmoduuli ja leikkauslujuus standardin EN 14509 mukaan. Sandwich rakenteella tarkoitetaan sitä, että villan ala- ja yläpuolelle liimataan pellit ja yhdessä nämä muodostavat sandwich rakenteen. Näytepalkkia puristetaan kuormituslaitteessa neljästä eri kohtaa, joiden kokonaisjänneväli on 850 mm niin kauan, kunnes palkki murtuu. Mikäli palkki murtuu liimauskohdasta, on kyseisen näytteen tulos hylättävä. Tuloksista lasketaan leikkauslujuus ja leikkausmoduuli tuotteelle. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2014.)

Näytelevystä sahataan lamelli levyn pituussuunnassa eli näyte käännetään 90° levyristeisiin verrattuna (Kuva 2). Tällöin kuiturakenteet ovat pystyssä, kun levyristeessä kuiturakenne on vaakatasossa. (Walli, 2012) Tällöin näytteen leveytenä toimii tuotteen linjapaksuus ja näytteen paksuus saadaan sahaamalla levyn leveyssuunnasta haluttu leveys. Tuotelevystä sahataan näytelamelli, jonka pituus on 1000 mm, leveys on tuotteen linjapaksuus ja paksuus on 100 mm. Näytepalkkien dimensiot mitataan laserin avulla standardin EN 12085 mukaan.



Kuva 2. Näytekappale lamellisuunnassa

Näytteiden koestamista varten näytteen vastakkaisiin pintoihin liimataan 0,6 mm paksut pellit. Pellit ovat kooltaan 1000 mm x linjapaksuus x 0,6 mm ja ne liimataan näytteisiin niin, että ne peittävät pinnat mahdollisimman tarkasti. Liiman leikkausmoduulin on oltava suurempi kuin koestettavan näytteen leikkausmoduuli. Peltien liimaus tapahtuu samanaikaisesti levittämällä liimaa peltien päälle. Alapelti asetetaan liimaustelinettä vasten liimauspinta ylöspäin. Näyte asetetaan alapellin päälle ja yläpelti asetetaan näytteen päälle liimapuoli alaspäin. Näytteiden väliin asennetaan vanerilevy, joka jakaa näytteiden päälle asetettavan kuorman tasaisesti. Näytteiden päälle asetetaan tasaisesti viisi 20 kilogramman painoa. Näytekappaleiden annetaan kuivua vähintään 6 h ennen koestusta. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2014.)

Koestuslaitteisto piirtää koestuksen aikana voima-siirtymä käyrän, jonka avulla lasketaan koekappaleiden leikkauslujuus ja leikkausmoduuli.

Palkkitestin leikkauslujuus τ lasketaan kaavan 1 mukaan.

$$\tau = \frac{F_{max}}{2 * b_c * e}$$

1

missä, F_{max} on maksimi murtokuorma (N), b_c on palkin villan leveys (mm) ja e on peltien keskiöväli

Palkkitestin leikkausmoduuli G lasketaan kaavan 2 mukaan.

$$G = \frac{\Delta F * L_{tuki}}{5,83 * b_c * d_c * \Delta ws} \quad 2$$

missä, G on leikkausmoduuli (MPa), ΔF on murtokuorma (N), L_{tuki} on tukien keskiöjännväli (mm), b_c on palkin villan leveys (mm), d_c on palkin villan paksuus (mm), Δws on taipuman leikkauksen osuus, joka lasketaan kaavalla 3

$$\Delta ws = \Delta w_{mid} - \Delta w_B \quad 3$$

missä Δw_{mid} on palkin todellinen taipuma keskellä (kaava 4) ja Δw_B on taipuman taivutuksen osuus (kaava 6)

$$\Delta w_{mid} = w_{mid} - \Delta ws \quad 4$$

missä w_{mid} on taipuma palkin keskellä (mm), Δws on palkin tukien painuma (kaava 5)

$$\Delta ws = \frac{(ws1 + ws2)}{2} \quad 5$$

Missä, $ws1$ on tuen B1 puristuma (mm) ja $ws2$ on tuen B2 puristuma (mm)

$$\Delta w_B = \frac{\Delta F * L_{tuki}^3}{56,99 * B_s} \quad 6$$

missä, B_s = palkin taivutusjäykkyys (kaava 7)

$$B_s = \frac{E_{F1} * b_1 * t_1 * E_{F2} * b_2 * t_2 * e^2}{(E_{F1} * b_1 * t_1) + (E_{F2} * b_2 * t_2)} \quad 7$$

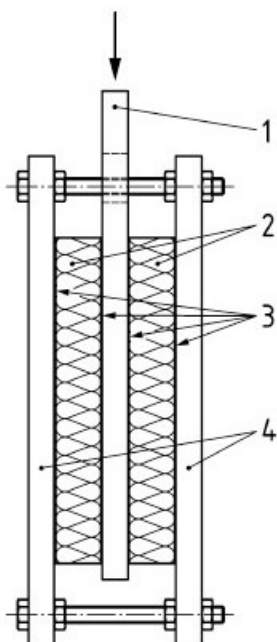
missä, E_{F1} on yläpellin kimmokerroin (N/mm²), b_1 on yläpellin leveys (mm), E_{F2} on alapellin kimmokerroin (N/mm²), b_2 on alapellin leveys (mm), e on peltien keskiöväli (mm) (kaava 8)

$$e = D - \frac{(t_1 + t_2)}{2} \quad 8$$

Missä D on palkin kokonaiskorkeus (mm), t_1 on yläpellin paksuus (mm) ja t_2 on alapellin paksuus (mm).

3.2 Kahden kappaleen leikkauslujuus

Kahden kappaleen leikkauslujuuden mittaus perustuu standardiin EN12090. Menetelmän periaatteena on mitata kivivillatuotteen leikkauslujuus ja leikkausmoduuli mekaanisen lujuuden koestuslaitteella. Näytekappaleeseen kohdistetaan leikkausrasitus kappaleisiin kiinnitettyjen tukien välityksellä kuvan 3 mukaisesti:



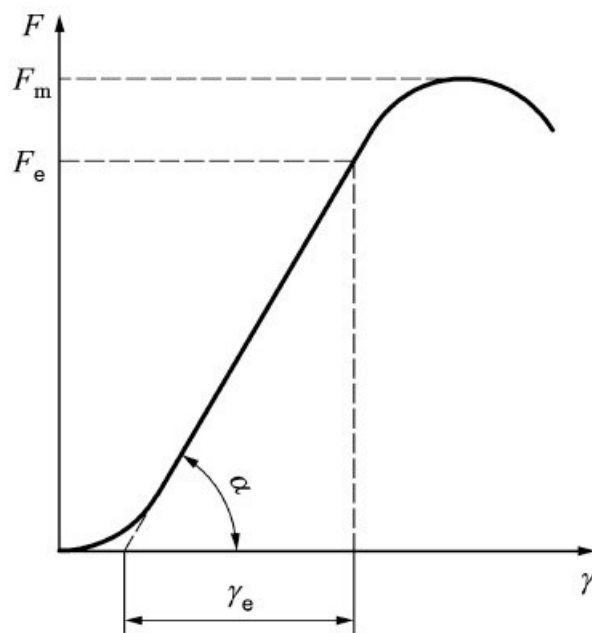
Kuva 3. Kahden kappaleen leikkauslujuus koekappale. Kuvassa 1) kuormituslevy, 2) näyte, 3) liima, 4) näytetuki (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2013)

Näytekappaletta varten tarvitaan kaksi suorakulmaista koekappaletta, joiden pituus on 200 mm ja leveys 100 mm. Paksuutena toimii tuotteen alkuperäinen

tuotepaksuus. Koekappaleen dimensiot mitataan standardin EN 12085 mukaisesti.

Koekappaleet liimataan kolmeen tukilevyyn, jotka voivat olla joko metallia tai vaneria. Liiman leikkauslujuuden ja leikkausmoduulin on oltava suurempia kuin testattavan tuotteen. Koska kyseessä on lamellituote, on näytettä käännettävä liimausta varten 90 °. Liiman annetaan kuivua muutaman tunnin ja näytekappale asetetaan koestuslaitteeseen siten, että kuormituslevy on lähes kiinni keskimmaisessä tukilevyssä. Mikäli näytekappaleen murtuma tapahtuu liimakerroksessa, on tulos hylättävä.

Koestuslaitteisto piirtää mittauksesta voima-siirtymäkäyrän kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 4. Voima-siirtymäkäyrä. Kuvassa F on voima (N), γ on siirtymä (mm), α on tangentin kulma, F_e on voiman muutos (N) ja γ_e on siirtymän muutos

Laskettavista arvoista leikkauslujuus (τ) lasketaan kaavan 9 mukaisesti.

$$\tau = \frac{F_m}{2 * l * b} * 10^6$$

9

missä τ on leikkauslujuus (kPa), F_m on maksimivoima (kN), l on koekappaleiden pituuksien keskiarvo (mm) ja b on koekappaleiden leveyksien keskiarvo (mm)

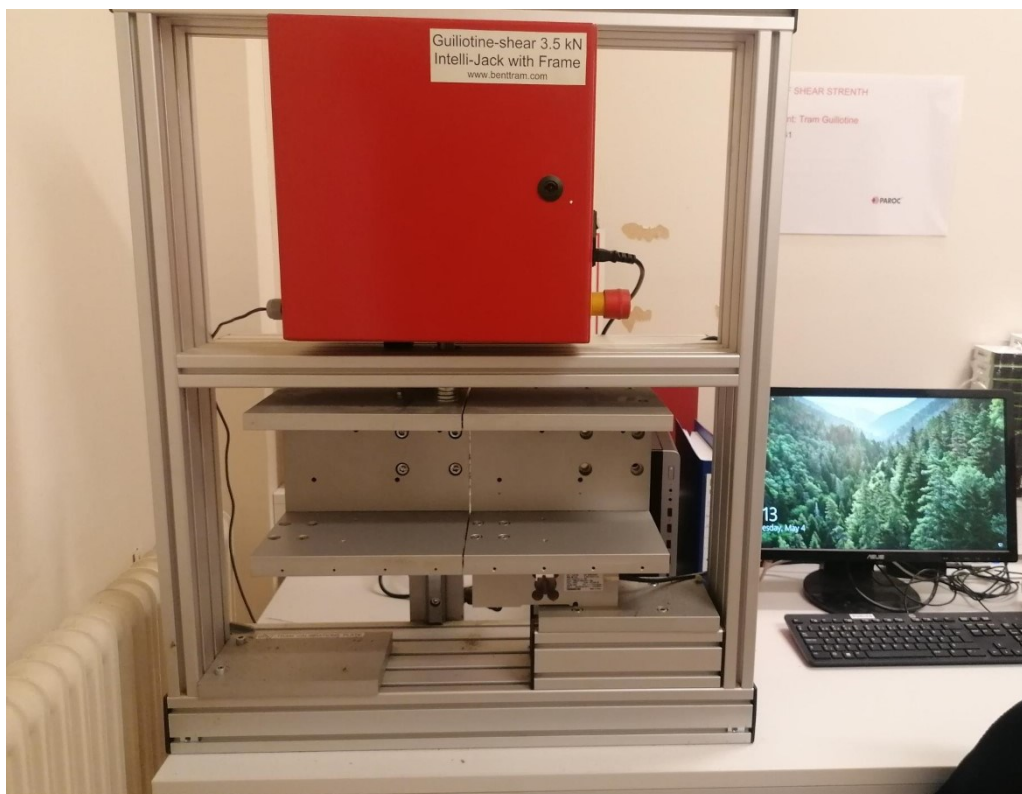
Leikkausmoduuli (G) kuvaa leikkausjännitystä jaettuna kappaleessa tapahtunut muutos, kun niiden välinen suhde on lineaarinen. Leikkausmoduuli G lasketaan kaavan 10 mukaisesti.

$$G = \frac{d * \tan \alpha}{2 * l * b} * 10^3 \quad 10$$

missä G on leikkausmoduuli (MPa), $\tan \alpha$ on voima-siirtymäkäyrän kulmakerroin (kN/m), d on koekappaleiden paksuuksien keskiarvo (mm), l on koekappaleiden pituuksien keskiarvo (mm), b on koekappaleiden leveyksien keskiarvo (mm)

3.3 Giljotiinimenetelmä

Giljotiinimenetelmä on Parocin itse kehittämä menetelmä, jossa koelaitteiston (Kuva 5) toinen puoli laskeutuu pystysuunnassa ja luo leikkausrasituksen näytekappaleeseen ja piirtää tietokoneelle voima-siirtymäkäyrää, jonka avulla lasketaan näytekappaleen leikkauslujuus ja leikkausmoduuli. Koska kyseessä on Parocin oma menetelmä, joten sille ei ole mitään standardia, mutta laskennassa sovelletaan kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmään kehitettyä standardia EN 12090.



Kuva 5. Giljotiinilaitteisto

Menetelmää varten sahataan näytekappale, joka on mitoiltaan 500 mm x n.152 mm x tuotteen linjapaksuus mm. Näytekappaleiden dimensiot mitataan standardin EN 12085 mukaan. Mittausten jälkeen näytteet ovat valmiita koestukseen. Näytekappale käännetään koestusta varten 90 °, jolloin koestus tapahtuu lamellisuunnassa.

Leikkauslujuus lasketaan sovelletusti standardin EN 12090 mukaan. Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmässä leikkauslujuus tulee pystysuorasti, jolloin laskennallisesti pinta-ala toimii ala, joka on liimattu vanereita vasten. Giljotiinimenetelmässä pinta-ala lasketaan samasta suunnasta. Tällöin leikkauslujuutta laskettaessa koekappaleen paksuus korvaa koekappaleen pituuden. Leikkauslujuus lasketaan kaavan 11 mukaisesti.

$$\tau = \frac{F_m}{d * b} * 10^6 \quad 11$$

missä τ on leikkauslujuus (kPa), F_m on maksimivoima (kN), d = koekappaleen paksuus (mm) ja b = koekappaleen leveys (mm)

Leikkausmoduulin laskennassa standardia EN 12090 sovelletaan samalla tavalla kuin leikkauslujuuden kanssa. Näytteen pinta-alana on näytteen paksuuden ja leveyden tulo. Leikkausmoduuli lasketaan kaavan 12 mukaisesti.

$$G = \frac{l * \tan \alpha}{d * b} * 10^3 \quad 12$$

missä G on leikkausmoduuli (MPa), $\tan \alpha$ on voima-siirtymäkäyrän kulmakerroin (kN/m), d on koekappaleen paksuus (mm), l on koekappaleen pituus (mm), b on koekappaleen leveys (mm).

4 Käytetyt materiaalit ja valmistelu

Työssä testattiin neljää eri tuotetta kolmelta eri tuotantolinjalta. Yhteensä tuote-eriä oli kahdeksan. Kooste testatuista tuotteista on taulukossa 1.

Taulukko 1. Testatut tuote-erät

	Linja 1	Linja 2	Linja 3
Tuote 1	X	X	X
Tuote 2	X	X	X
Tuote 3	X		
Tuote 4		X	

Tuotteet saapuivat Paraisten R&D laboratorioon tammikuun 2022 aikana.

4.1 Näytteiden sahaus

Näytteet saapuivat laboratorion tiloihin 1200 mm x 1200 mm tai 2400 x 1200 mm levyinä. Pitkät levyt (2400 mm) sahattiin käsisahalla puoliksi, jotta levyjä olisi helpompi käsitellä ja sahata. Ennen näytteiden sahausta levyjen reunoista sahattiin 100 mm levyinen pala pois. Levyjen reunojen on todettu olevan mekaanisesti heikompi kuin levyjen sisäosat. Reunojen poistamisella lisättiin tulosten luotettavuutta.

Jokaisesta tuote-erästä sahattiin vannesahalla 20 kappaletta 1000 mm x 100 mm kokoisia palkkeja ja 20 kappaletta 500 mm x n. 152 mm kokoisia näytteitä giljotiiniin. Kahden kappaleen leikkauslujuutta varten sahattiin 40 kpl 100 mm x 200 mm näytekappaleita, jotka ohennettiin 100 mm paksuuteen. Ohennus tapahtui sahaamalla näytteen molemmilta puolilta yhtä suuri osuus pois.

Sahaus suunniteltiin niin, että näytekappaleita sahattiin mahdollisimman harvasta levystä. Levyjen leikkauslujuuksissa voi olla eroja levyjen välillä, näin pienennettiin tulosten vaihtelevuutta ja lisättiin tulosten luotettavuutta.

Sahausten jälkeen näytteet merkittiin asianmukaisilla tiedoilla. Merkittäviä tietoja olivat: Tuotenimi, menetelmä jolla testataan ja näytenumero. Merkintöjen jälkeen näytekappaleet mitattiin.

4.2 Näytteiden mittaus

Näytteiden dimensiot mitattiin, jotta voidaan määrittää näytteiden pinta-ala sekä laskettavat arvot. Näytteiden mittaus tapahtui mittapöydällä (Kuva 6).



Kuva 6. Mittapöytä

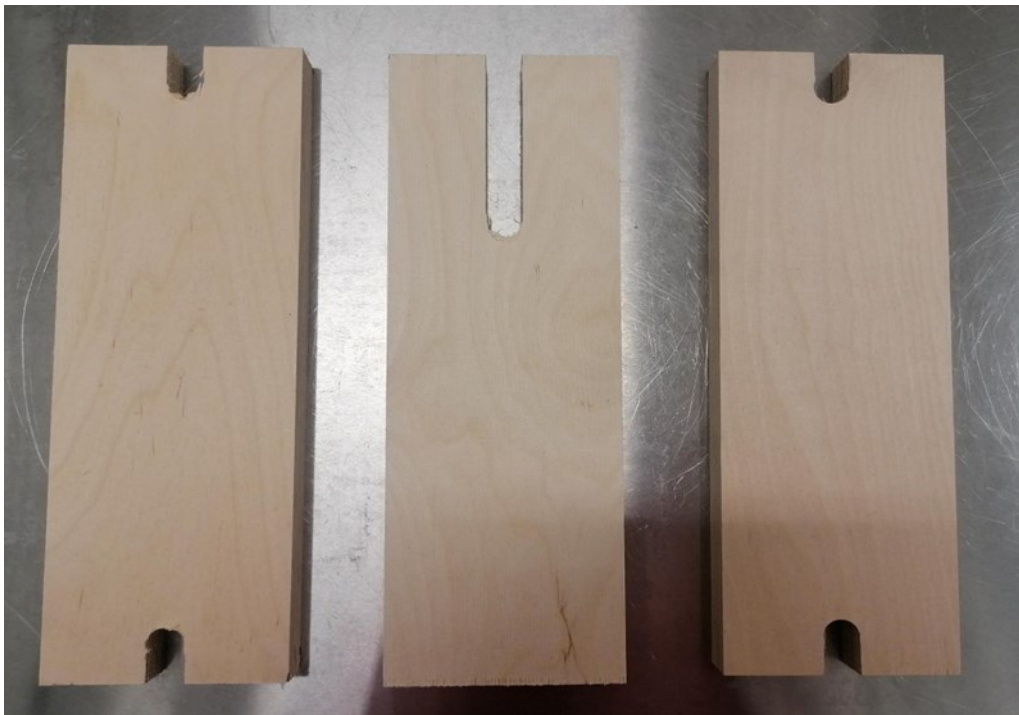
Dimensioiden mittauksessa käytettiin Danish Sensor Engineering ODS 445 laseria. Laser mittasi dimensiot 1 μm tarkkuudella 400 mm asti. Kaikki dimensiot jotka olivat yli 400 mm mitattiin mittapöydällä olevien mittaviivainten avulla.

Mittaus mittaviivaimilla tehtiin silmämääräisesti ja mittauksen tarkkuus on 1 mm. Dimensiot tallennettiin Excel taulukkoon.

4.3 Näytteiden esivalmistelu

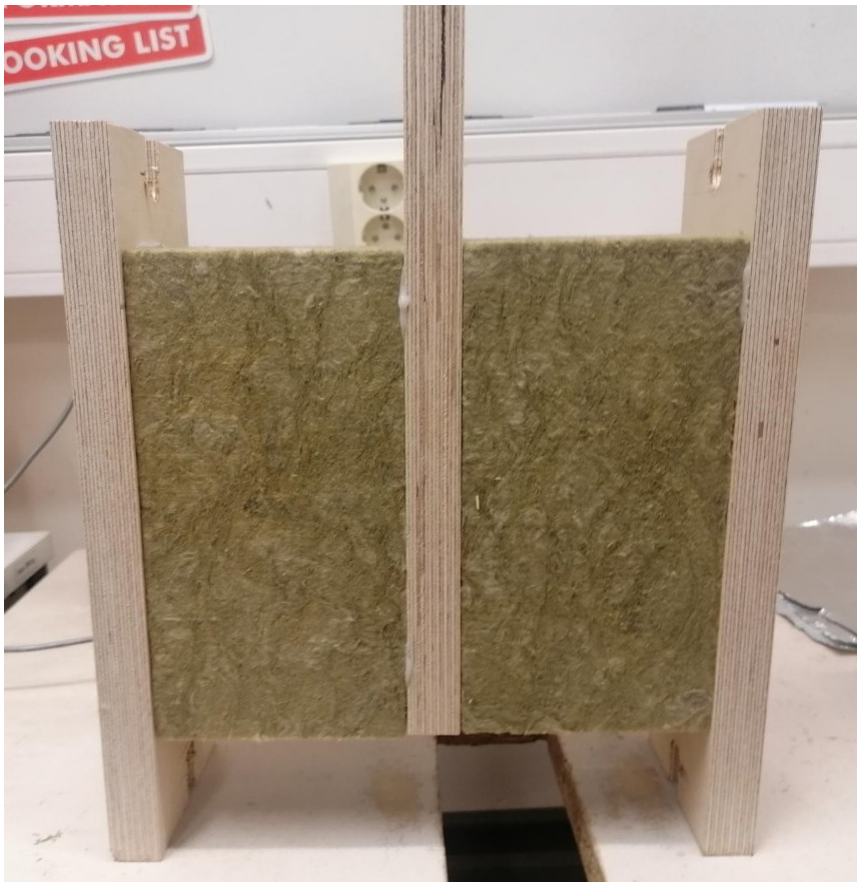
Näytteiden esivalmisteluihin kuului kaikki vaiheet näytteiden dimensioiden mittauksen ja koestuksen välillä. Tässä työssä näytteiden esivalmisteluihin kuului liimauksia. Giljotiinimenetelmä oli poikkeus, sillä siinä ei tarvinnut tehdä mitään esivalmisteluja.

Kahden kappaleen leikkauslujuudessa kaksi näytekappaletta liimattiin Henkelin kuumaliimalla kolmeen vaneriin. (Kuva 7) Päätyvanerit olivat leveydeltään 100 mm ja pituudeltaan 300 mm. Vanereiden kumpaankin pätyyn oli sahattu 20 mm pitkät ja 10 mm leveät urat. Keskivaneri oli leveydeltään 100 mm ja pituudeltaan 300 mm. Vanerin toisessa päässä oli 90 mm pitkä ja 10 mm leveä ura.



Kuva 7. Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän tukivanerit

Ennen liimaamista näytekappaletta käännettiin 90° leveyssuunnassa, jotta koestus tapahtuisi lamellisuunnassa. Näytekappaleiden liimaamiseen käytettiin kuumaliimaa. Liimatessa kuumaliimapistoolin lämpötila oli n. 170 °C, joten työskennellessä kuumaliiman kanssa oli käytettävä hanskoja. Näin vältetään mahdollisilta palovammoilta. Vanereista saattoi saada viiltoja tai tikkuja käsiin, joten hanskojen käyttö vanereita käsiteltäessä oli suositeltavaa. Näytekappaleet liimattiin ensin päätyvanereihin, niin että kumpaankin päähän jäi yhtä paljon tilaa ja kumpikaan ura ei peittynyt. Päätyvanereiden liimaamisen jälkeen näytekappaleet liimattiin keskivaneriin niin että koekappaleiden pohja oli samalla tasolla keskivanerin pohjan kanssa ja näyte ei peittänyt uraa. Liiman annettiin kuivua vähintään kaksi tuntia ennen koestusta. Lopputuloksena syntyi yksi koekappale, joka pysyi pystyssä päätyvanereiden avulla ja keskivaneri oli päätyvanereita korkeammalla (Kuva 8).



Kuva 8. Valmis näytekappale

Palkkitestistä varten palkit oli liimattava suunnilleen samankokoisiin peltilevyihin. Peltilevyjen pituus oli vakio eli 1000 mm ja paksuudeltaan myös vakio eli 0,6 mm. Peltien leveys vaihteli testattavan tuotteen paksuuden mukaan. Palkit käännettiin 90° leveyssuunnassa, jolloin ne olivat lamellisuuntaisia mikä tarkoittaa, että tuotteen linjapaksuus vastaa pellin leveyttä. Peltien liimaamiseen käytettiin Kestopur 1 C 10 liimaa, joka on nestemäinen polyuretaani-liima ja kovettuu hapen vaikutuksesta. Liima on haitallista hengitettynä ja voi aiheuttaa hengitysvaikeuksia hengitettynä. Iholle joutuessaan liima voi ärsyttää ihoa ja aiheuttaa allergisen reaktion. Vakavimmillaan liima saattaa vahingoittaa elimiä pidempiaikaisessa altistumisessa sekä epäillään aiheuttavan syöpää (Kiilto Oy, 2019). Liimatessa oli puettava hengitysmaski ja reppu, jolla ilma vaihtui ilman, että altistui liimalle. Paljaat ihokohdat peitettiin pitkällä takilla ja nitrilihanskoilla. Peltejä siirrellessä noudatettiin varovaisuutta, sillä peltien reunat olivat terävät ja saattoivat aiheuttaa haavoja käsiin.

Liimauksessa pellit peitettiin tasaisesti liimalla ja alapelti asetettiin liimaustelinettä vasten liimapuoli ylöspäin. Näyte asetettiin liimatun pellin päälle lamellisuunnassa. Yläpelti asetettiin näytekappaleen päälle liimapinta alaspäin. Yläpellin päälle asetettiin kuormaa jakava vanerilevy, jonka päälle voitiin asettaa uusi näyte. Yhteen telineeseen voitiin asettaa kolme näytettä. Kun telineessä oli maksimissaan kolme näytettä, asetettiin päällimmäisen näytteen päälle kuormaa jakava vanerilevy ja vanerilevyn päälle tasaisesti viisi 20 kg painoa. Palkkien kuivausteline on esitetty kuvassa 9. Palkkien annettiin kuivua seuraavaan päivään asti ennen koestusta.



Kuva 9. Palkkien kuivausteline

4.4 Näytteiden koestus

4.4.1 Giljotiinimenetelmä

Giljotiinimenetelmässä käytettiin Tram Guillotine shear 3,5 kN laitteistoa. Näytekappale käännettiin 90° leveyssuunnassa niin, että näytekappaleen pintaura näkyy. Kuva 10 esittää näytekappaleen asettelusta giljotiiniin ja koestuksen alkutilanteen.



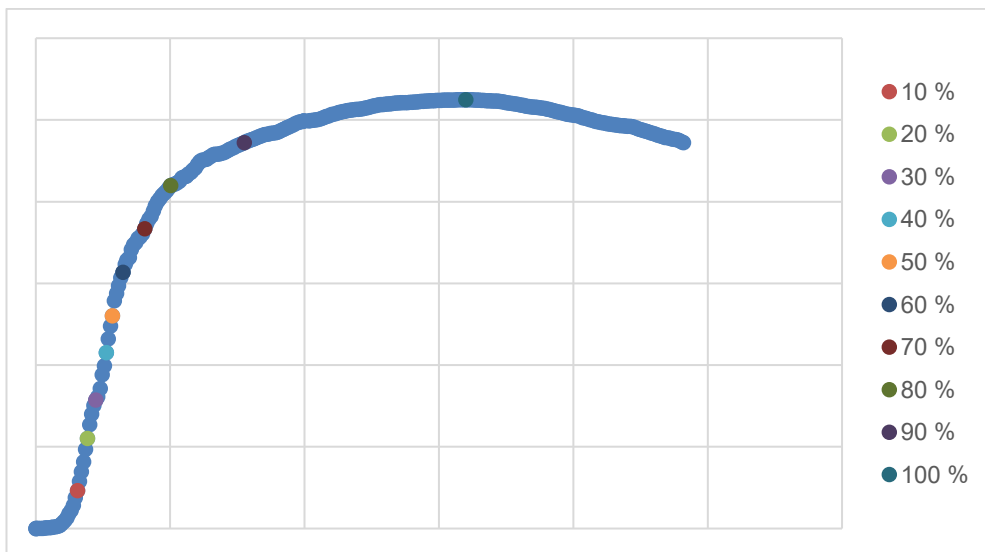
Kuva 10. Giljotiinin alkutilanne

Koestuksessa koestusnopeus oli 200 mm/min. Vasen puoli laskeutui ja loi leikkausvoimaa niin kauan kunnes näytekappaleeseen syntyi leikkausvoiman aiheuttama murtuma (Kuva 11). Kun näytteeseen oli muodostunut murtuma ja leikkausvoima ei enään noussut, niin laitteisto automaattisesti keskeytti koestuksen ja palautui alkutilanteeseen.



Kuva 11. Giljotiinin leikkausmurtuma

Näytteen koestuksen lopputuloksena tietokoneelle piirtyi voima-siirtymäkäyrä, jonka avulla laskettiin näytekappaleen leikkauslujuus ja leikkausmoduuli eri venymäalueilla. Giljotiinin voima-siirtymäkäyrä ei ollut täysin lineaarinen, vaan se teki koko matkansa ajan pieniä poikkeamia kuten Kuvio 1 tuotteen 1.1 yhdestä näytteestä esittää.



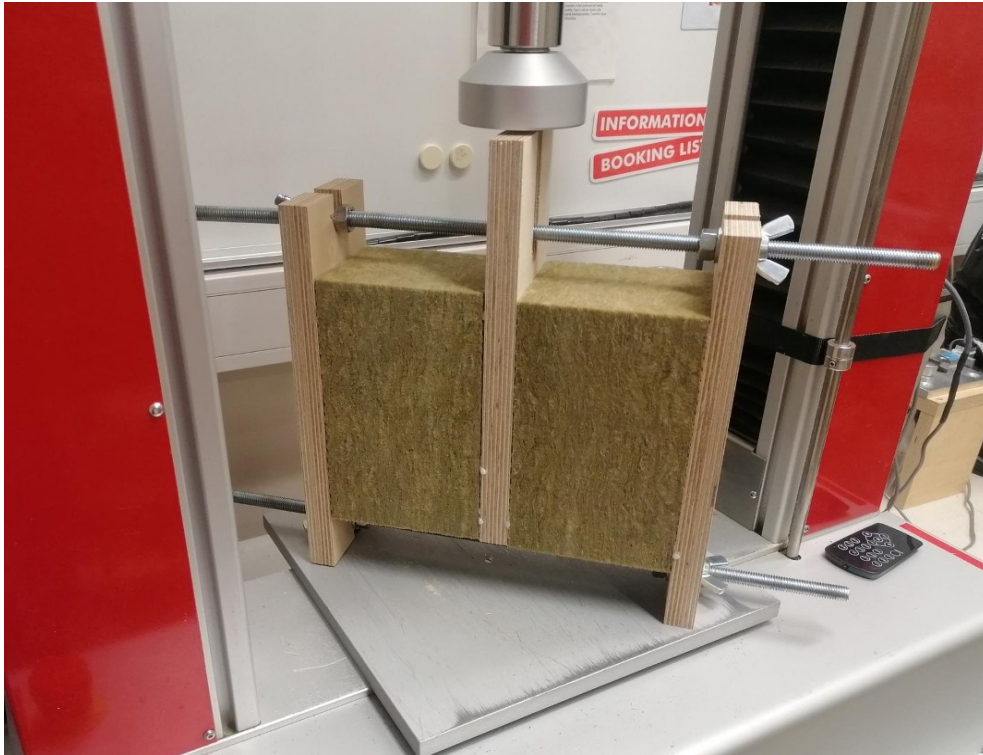
Kuvio 1. Giljotiinin voima-siirtymäkäyrä. Prosenttipisteet ovat tietty prosenttiosuuksia maksimivoimasta.

Kuvio on piirretty datapisteiden avulla ja kuviossa on esitetty kukin prosenttiosuus maksimivoimasta erivärisellä pisteellä. Prosenttipisteiden eri välit muodostivat venymäalueet, joille moduulia laskettiin. Prosenttipisteet on asetettu mahdollisimman lähelle laskennallista prosenttiosuutta. Tämä poikkeama aiheutti virhettä laskuissa ja nosti näytteiden välistä keskihajontaa. Kuvioista nähdään myös, että kyseisen näytteen osalta lineaarinen alue on 10-70 %, jonka jälkeen käyrä alkoi selkeästi kaareutua.

4.4.2 Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmä

Kahden kappaleen leikkauslujuuden ja leikkausmoduulin määrittämiseen käytettiin Tram UCT 50 kN mekaanisen lujuuden testilaitteistoa. Laitteisto esivalmisteltiin asettamalla metallinen levy pohjatasoksi näytettä varten. Yläosaan kiinnitettiin pistekuormalevy, joka puristi näytettä alaspäin.

Näytekappaleen päälle ja pohjaan asetettiin kierretangot, jotka ovat pituudeltaan pidempiä kuin koekappaleen kokonaispituus. Näytteen yläosan kierretanko asetettiin päätyvanereiden ja keskivanerin uriin ja tanko kiinnitettiin päätyvanereihin siipimutterien ja mutterien avulla. Näytteen alaosan kierretanko asetettiin pohjan päätyvanereiden uriin ja kiinnitettiin vanereihin muttereiden ja siipimuttereiden avulla. Näytekappale asetettiin koestuslaitteiston pohjalevyn päälle ja pistekuormalevy ajettiin mahdollisimman lähelle näytteen keskivaneria. Kuvassa 12 on esitetty koestuksen alkutilanne.



Kuva 12. Kahden kappaleen leikkauslujuus alkutilanne

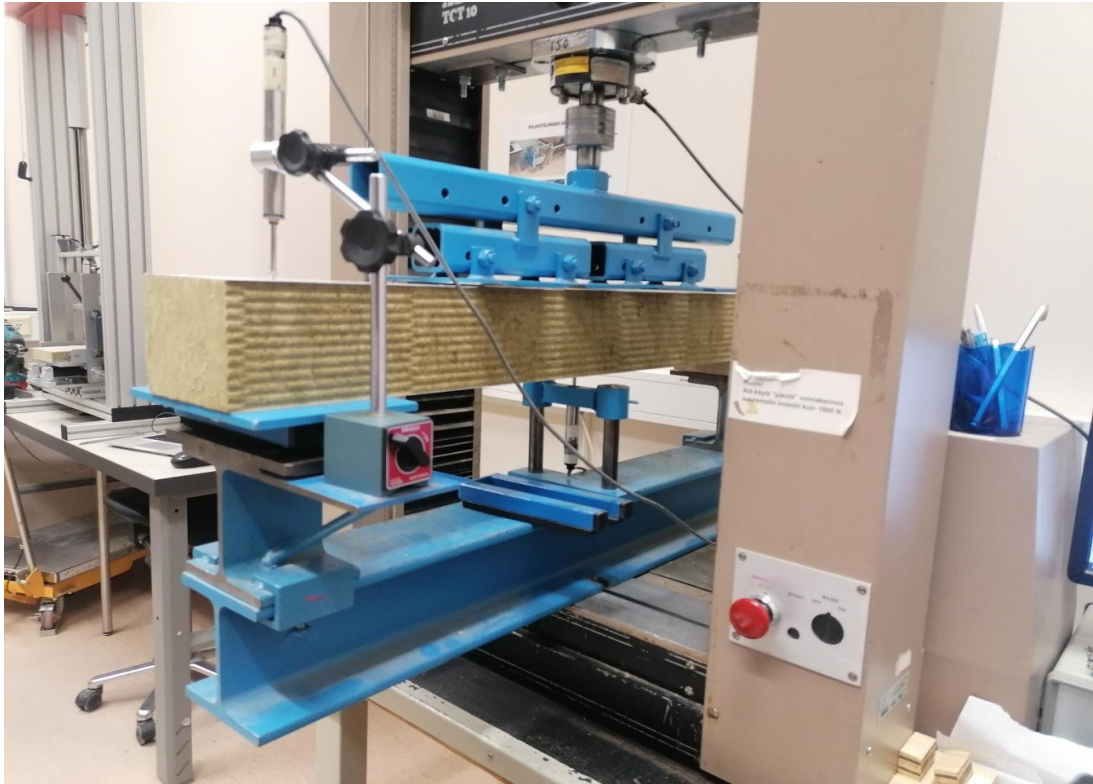
Koestuksessa koestusnopeus oli 3 mm/min. Pistekuormalevy puristaa tukivaneria niin kauan kunnes näytekappaleessa tapahtui leikkausvoiman aiheuttama murtuma (Kuva 13). Murtuman synnyttyä laitteisto keskeytti koestuksen automaattisesti ja siirtyi alkutilanteeseen. Lopputuloksena syntyi voima-siirtymäkäyrä, josta laitteisto automaattisesti laski näytekappaleen leikkauslujuuden ja leikkausmoduulin. Laitteisto laski leikkausmoduulin voima siirtymäkäyrän jyrkimmän 20 % kohdalta. Tässä kohtaa leikkausmoduuli on suurin.



Kuva 13. Kahden kappaleen leikkauslujuus leikkausmurtuma

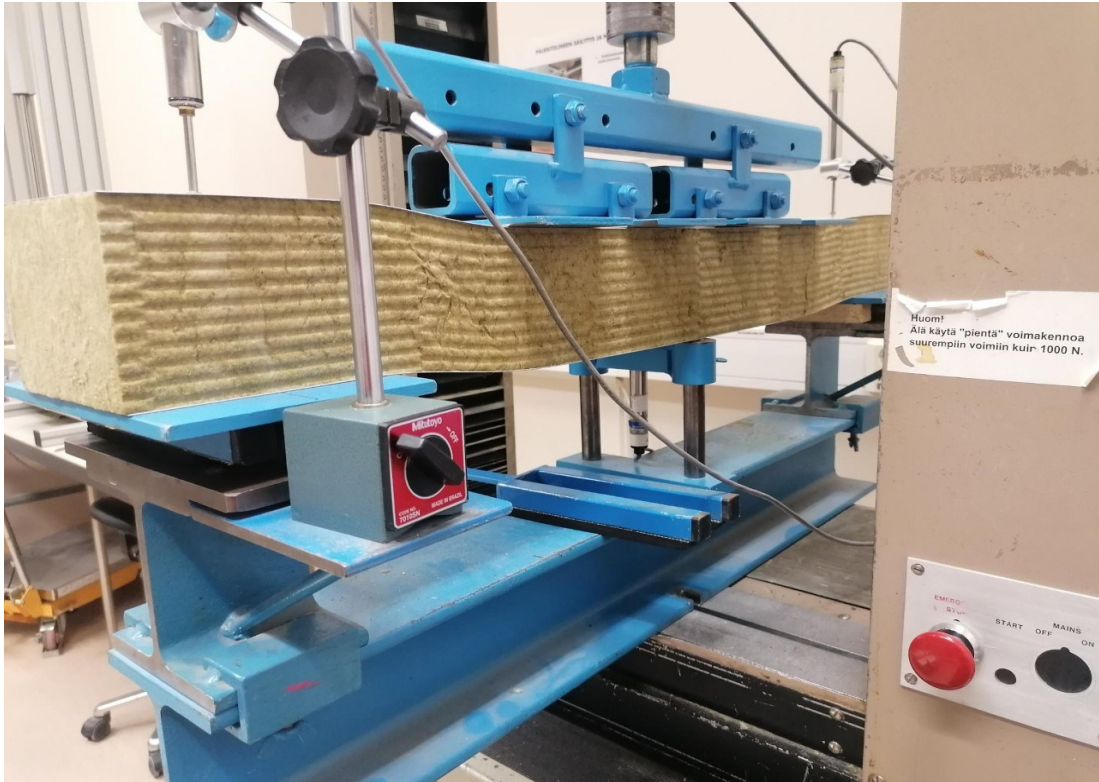
4.4.3 Palkkitesti

Palkkien koestamiseen käytettiin Alwetron TCT 10 laitetta. Laitteeseen kiinnitettiin kuormituslaitteisto. Laitteen alaosaan kiinnitettiin kuormituslaitteiston runko, jonka molemmissa päissä oli pienet levyt pyörötangon päällä. Rungon keskellä sijaitsi anturi, joka mittasi palkin taipumaa. Yläosaan kiinnitettiin kuormituslaatat, jotka koestuksessa puristivat palkkia alaspäin. Näytepalkki asetettiin pyörötangon päällä olevien levyjen päälle alapelti levyä vasten. Kuormituslaatat ajettiin mahdollisimman lähelle näytepalkin yläpinnan peltiä. Palkin yläpinnan kumpaankin päähän asetettiin anturit, jotka mittasivat palkin taipumaa. Koestuksen alkutilanne on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Palkkitesti alkutilanne

Koetuksessa palkin koestusnopeus oli 10 mm/min niin kauan, kunnes palkki murtui (Kuva 15). Palkin murruttua laitteisto keskeytti koestuksen automaattisesti. Lopputuloksena piirtyi voima-siirtymäkäyrä, josta laitteisto automaattisesti laski näytepalkille leikkauslujuuden ja leikkausmoduulin. Leikkausmoduulin arvo laskettiin 20 % venymäalueella, jonka leikkausmoduuli on suurin.



Kuva 15. Palkkitesti leikkausmurtuma

4.5 Tulosten laskeminen

Näytteiden koestuksen jälkeen laitteiston tallentama mittausdata siirrettiin omaan excel taulukkoon. Jokaiselle tuote-erälle ja mittausmenetelmälle oli oma excel taulukko. Rinnakkaisnäytteiden mittausdata tallennettiin samaan tiedostoon, mutta eri sivuille tulosten vertailtavuuden vuoksi.

Jokaiselle tuote-erälle ja menetelmälle tehtiin samat alkutoimet. Näytteistä piirrettiin voima-siirtymäkäyrä, josta nähtiin lineaarinen venymäalue. Mittausdatasta määritettiin kyseisen näytteen maksimivoima. Maksivoiman avulla laskettiin tietty prosenttiosuus maksivoimasta. Voimat laskettiin 10 % välein 10 % ylöspäin. Laskennallisten voimien avulla mittausdatasta etsittiin voiman arvo, joka on lähimpänä tietyn prosenttiosuuden voiman laskennallista arvoa. Kun lähin arvo löytyi datasta, niin leikkausvoiman arvo ja sitä vastaava siirtymä tallennettiin uudeksi taulukoksi. Uuden taulukon avulla voitiin laskea siirtymä ja voiman muutokset tietyllä venymäalueella. Venymäalueella

tarkoitetaan voima-siirtymäkäyrällä kahden prosenttipisteen väliä käyrällä.

Esimerkiksi voiman muutos venymäalueella 10 % - 50 % on esitetty kaavassa 13.

$$\Delta F = F(50 \%) - F(10 \%) \quad 13$$

missä, ΔF on voiman muutos, $F(50 \%)$ on 50 % maksimivoimasta ja $F(10 \%)$ on 10 % maksimivoimasta

Kun voiman ja siirtymän muutokset eri venymäalueilla on laskettu, niin kullekin näytekappaleelle laskettiin leikkausmoduuli eri venymäalueilla ja leikkauslujuus kappaleessa 3 esitetyillä kaavoilla.

Yksittäisen tuote-erän tulokset koottiin yhteen taulukkoon. Palkkitestin ja kahden kappaleen leikkauslujuuden leikkausmoduulien arvoina käytettiin laitteiston itse laskemaa arvoa, joka noudattaa standardeja. Tuloksille tehtiin kahden riippumattoman otoksen t-testi, jolla tarkistettiin onko nollahypoteesi oikea. Nollahypoteesina, H_0 , on, että kahden menetelmän väliset keskiarvot ovat yhtä suuret. Vaihtoehtoisena hypoteesina, H_1 , on, että keskiarvot eivät ole yhtä suuria. Merkitsevyystasoksi asetettiin 0,05. Testi antoi tuloksena t(tunnusluvut) arvon. Mikäli tämä arvo oli pienempi kuin t-kriittinen arvo, niin H_0 oli oikea eli keskiarvot olivat yhtä suuret ja mikäli arvo oli pienempi niin H_0 hylätään ja vaihtoehtoinen hypoteesi hyväksyttiin. Lisäksi t-testi antoi tuloksena p-arvon, joka ilmaisee todennäköisyyttä virheelliseen päätelmään, kun H_0 hylätään P-arvon ollessa alle 0,05 niin keskiarvojen välillä on eroja. Keskiarvojen eroja voidaan luokitella p-arvon avulla vielä kolmeen eri tasoon. P-arvon ollessa alle 0,05, niin ero on tilastollisesti melkein merkitsevä, p-arvon ollessa alle 0,01, niin ero on tilastollisesti merkitsevä ja p-arvon ollessa alle 0,001, niin ero on tilastollisesti erittäin merkitsevä. (Taanila, 2020)

5 Tulokset

Taulukkoon 2 on koottu jokaisen menetelmän moduulilaskennan keskiarvot ja keskihajonta kullekin tuote-erälle. Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän ja palkkitestin leikkausmoduulien arvo on menetelmän laitteiston itse laskema arvo. Giljotiinimenetelmästä taulukkoon on merkitty korkein leikkausmoduulin keskiarvo kullakin tuotteella.

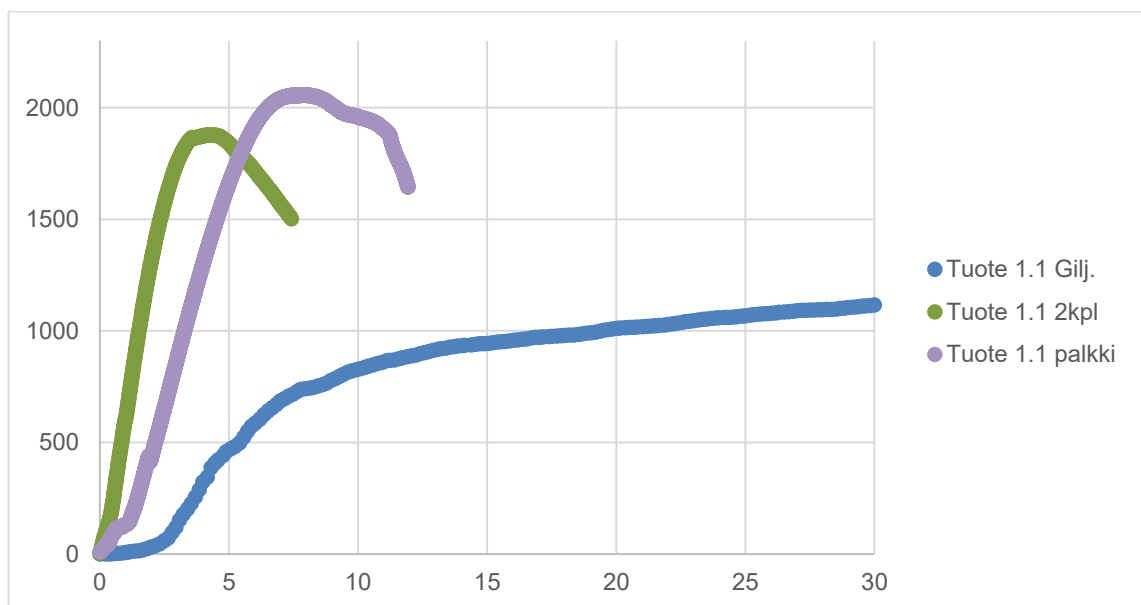
Taulukko 2. Menetelmien leikkausmoduulit ja keskihajonnat

	Gilj. ka. (MPa)	Gilj. s	2 kpl leikkauslujuus menetelmä ka. (MPa)	2 kpl leikkauslujuus s	Palkki ka. (MPa)	Palkki s
Tuote 1.1	4,48	0,98	1,90	0,23	4,97	0,35
Tuote 1.2	3,48	0,54	1,39	0,12	3,33	0,23
Tuote 1.3	3,97	0,72	1,45	0,15	3,35	0,24
Tuote 2.1	12,43	3,71	3,77	0,53	9,94	0,46
Tuote 2.2	8,33	1,37	3,40	0,34	7,84	0,47
Tuote 2.3	10,68	2,43	3,79	0,61	8,32	0,43
Tuote 3.1	2,75	0,23	1,33	0,13	2,88	0,18
Tuote 4.2	3,87	0,49	1,42	0,10	3,81	0,39

Taulukosta huomataan, että kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmä antaa kullekin tuote-erälle heikoimman leikkausmoduulin keskiarvon. Palkkitestin ja giljotiini antavat suurin piirtein saman suuruisia keskiarvoja. Pienenä poikkeuksena on tuote 2, jossa giljotiinin keskiarvo on hieman korkeampi kuin palkkitestissä. Giljotiinimenetelmän keskihajonta on huomattavasti suurempi kuin muilla menetelmillä, joka korostuu korkeamman moduulin omaavilla

tuotteilla kuten tuotteella 2. Selitys korkealle keskihajonnalle voi olla menetelmän liian korkea koestusnopeus tai vastaavasti liian harvakseltaan otetut mittapisteet. Giljotiinin moduulilaskenta tehtiin menetelmästä saadun datan perusteella ja voiman mittapisteiden väli oli suurimmillaan yli 130 N. Näin suuri muutos mittapisteiden välillä aiheuttaa epätarkkuutta laskentaan, nostaa giljotiinin leikkausmoduulien keskihajontaa ja lisää virheen mahdollisuutta tulosten tulkinnassa.

Jokainen menetelmä piirtää omanlaisensa voima-siirtymäkäyrät. Kuviossa 2 on yhdistetty yhden näytteen voima-siirtymäkäyrä kustakin menetelmästä tuotteella 1.1.



Kuvio 2. Voima-siirtymäkäyrä kullakin menetelmällä

missä vihreä käyrä on kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän voima-siirtymäkäyrä, violetti on palkkitestin voima-siirtymäkäyrä ja sininen on giljotiinin voima-siirtymäkäyrä.

Giljotiinin voima-siirtymäkäyrä on selkeästi loivempi kuin kahden muun menetelmän. Palkkitesti ja kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän käyrät nousevat lineaarisesti lähes nolasta lähelle maksimivoimaansa, kun taas giljotiinin lineaarinen nousu alkaa noin 3 mm siirtymän jälkeen.

Maksimivoimaltaan giljotiini on myös matalammalla tasolla kuin muilla menetelmillä. Giljotiinilla on silti korkeimmat leikkausmoduuliarvot. Giljotiinin korkeampi leikkausmoduuli johtuu näytekappaleen koosta. Giljotiinin näyte on niin paljon isompi kuin kahden kappaleen leikkauslujuus menetelmän, että murtuman aiheuttaminen vaatii pienempää voimaa kuin pienempään näytteeseen. Palkkitestiin giljotiinia on vaikeampi verrata, koska palkkitestissä leikkausvoima kohdistetaan peltilevyjen kautta näytteeseen.

Tuotteiden välisillä leikkausmoduulien arvoilla on huomattavia eroja. Moduulien erot selittyvät tuotteiden tiheydellä. Mitä suurempi tuotteen tiheys, sitä suurempi tuotteen leikkausmoduuli on. Tuotteella 2 on suurin tiheys verrattuna muihin tuotteisiin ja leikkausmoduuli on suurin. Linjojen välillä on myös huomattavissa eroja. Linja 1 antaa korkeimmat moduuliarvot. Linja 2 antaa heikoimmat arvot. Eroja menetelmien keskiarvojen eroista on käsitelty tarkemmin kappaleessa 5.2.

5.1 Tulokset eri venymäalueella

Leikkausmoduulin arvoihin vaikutti näytekappaleen kyky vastustaa muodonmuutosta eli suurin moduuliarvo tulee silloin kun voimaa kasvaa eniten suhteessa siirtymään. Näytteen kulmakerroin on tällöin suurimmillaan. Voima-siirtymäkäyrän kaareutuessa kulmakerroin ja leikkausmoduuli pienenee. Kaareuman aiheuttaa alkava murtuma näytekappaleessa. Koestusnopeus on menetelmille vakio, jolloin siirtymä minuutissa on vakio. Siirtymän ollessa vakio voima muuttuu siten, että koestuslaitteisto pitää siirtymänopeuden yhtä suurena. Kun näytteeseen syntyy murtuma, niin voima ei kasva enään yhtä nopeasti tuottaakseen yhtä nopean siirtymän. Näytekappale ei pysty vastustamaan muodonmuutosta samalla tavalla kuin koestuksen alussa. Taulukkoon 3 on koottu giljotiinimenetelmän leikkausmoduulin tulokset jokaisella tuote-erällä eri venymäalueilla.

Taulukko 3 Giljotiinin leikkausmoduulit eri venymäalueilla

	G10_ 30	G10_ 50	G10_ 60	G10_ 70	G20_ 50	G20_ 60	G20_ 70	G30_ 50	G30_ 70
Tuote 1.1	4,99	4,61	4,04	3,22	4,64	3,92	3,05	4,48	2,79
Tuote 1.2	3,70	3,42	3,00	2,46	3,48	2,95	2,35	3,32	2,15
Tuote 1.3	4,71	3,99	3,42	2,90	3,97	3,30	2,75	3,66	2,46
Tuote 2.1	11,73	11,49	10,00	8,14	12,43	10,17	7,90	12,18	7,30
Tuote 2.2	7,62	7,89	7,17	5,99	8,33	7,26	5,85	8,75	5,51
Tuote 2.3	8,94	9,57	8,86	7,57	10,48	9,31	7,61	10,68	7,22
Tuote 3.1	3,18	2,85	2,46	2,01	2,75	2,32	1,87	2,78	1,73
Tuote 4.2	4,55	3,89	3,41	2,71	3,87	3,30	2,55	3,63	2,30

Taulukosta huomataan, että pääsääntöisesti korkeimmat leikkausmoduuliarvot tulevat lyhyillä venymäalueilla eli tutkittavan venymäalueen pituus on 20-30 %. Korkeimmat arvot ovat pääsääntöisesti venymäalueen alkupäässä. Moduulien arvot tippuvat huomattavasti, kun venymäalueen pituus kasvaa yli 40 % tai venymäalueen päätöspiste on yli 60 %. Sama trendi oli havaittavissa niin palkkitestin kuin kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän osalta.

5.2 T-testien tulokset ja tulkinta

T-testissä vertailtiin menetelmien keskiarvoja toisiinsa. H_0 pidettiin sitä, että menetelmien väliset keskiarvot ovat samat. Vaihtoehtoinen hypoteesi oli, että keskiarvot eivät ole samoja, joka astuu voimaan, mikäli H_0 joudutaan hylkäämään. Aluksi merkitsevyystasoksi asetettiin 0,05. Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän ja giljotiinin keskiarvojen ero oli niin suuri, että

analyysi tehtiin 0,01 merkitsevyytasolla. Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän ja giljotiinitestin t-testin tuottamat p-arvot 0,01 merkitsevyytasolla on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän - giljotiini p-arvot

	G10_30	G10_50	G10_60	G10_70	G20_50	G20_60	G20_70	G30_50	G30_70
Tuote 1.1	$4 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-16}$	$7 \cdot 10^{-18}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$6 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Tuote 1.2	$1 \cdot 10^{-19}$	$2 \cdot 10^{-23}$	$3 \cdot 10^{-18}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-19}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Tuote 1.3	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-23}$	$7 \cdot 10^{-17}$	$1 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-17}$	$4 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-16}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$7 \cdot 10^{-13}$
Tuote 2.1	$2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-15}$	$4 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-15}$	$6 \cdot 10^{-14}$	$4 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-12}$
Tuote 2.2	$7 \cdot 10^{-18}$	$2 \cdot 10^{-22}$	$2 \cdot 10^{-24}$	$6 \cdot 10^{-20}$	$1 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-21}$	$1 \cdot 10^{-17}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-12}$
Tuote 2.3	$3 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-14}$	$8 \cdot 10^{-17}$	$9 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-16}$	$4 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-14}$	$4 \cdot 10^{-14}$
Tuote 3.1	$4 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-23}$	$1 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-23}$	$6 \cdot 10^{-17}$	$7 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Tuote 4.2	$2 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-25}$	$4 \cdot 10^{-21}$	$3 \cdot 10^{-19}$	$8 \cdot 10^{-23}$	$8 \cdot 10^{-18}$	$1 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-15}$	$5 \cdot 10^{-12}$

Taulukosta huomataan, että p-arvot ovat hyvin pieniä. H_0 voidaan tällä perusteella hylätä ja hyväksyä vaihtoehtoinen hypoteesi jokaisen tuote-erän ja leikkausvenymän osalta. Merkitsevyytason ollessa 0,01 voidaan todeta 99 % todennäköisyydellä, että kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän ja giljotiinin tulosten keskiarvojen välillä on eroa jokaisen tuotteen, linjan ja venymäalueen osalta ja ero on kaikissa tapauksissa tilastollisesti erittäin merkittävä. Taulukkoon 5 on koottu giljotiinin eri venymäalueiden keskiarvojen ja kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän keskiarvon erotus.

Taulukko 5. Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän - giljotiini keskiarvojen erotus

	G10_ 30	G10_ 50	G10_ 60	G10_ 70	G20_ 50	G20_ 60	G20_ 70	G30_ 50	G30_ 70
Tuote 1.1	3,088	2,713	2,134	1,321	2,743	2,018	1,151	2,581	0,889
Tuote 1.2	2,314	2,034	1,613	1,073	2,095	1,565	0,966	1,933	0,762
Tuote 1.3	3,264	2,536	1,972	1,455	2,521	1,854	1,300	2,209	1,015
Tuote 2.1	7,536	7,290	5,806	3,949	8,231	5,976	3,707	7,981	3,100
Tuote 2.2	4,213	4,487	3,770	2,585	4,925	3,861	2,443	5,344	2,103
Tuote 2.3	5,149	5,778	5,063	3,777	6,689	5,518	3,816	6,883	3,425
Tuote 3.1	1,847	1,514	1,124	0,674	1,416	0,990	0,538	1,444	0,393
Tuote 4.2	3,129	2,472	1,995	1,297	2,448	1,885	1,137	2,213	0,886

Giljotiinimenetelmä antaa taulukon 4 mukaan selkeästi korkeampia keskiarvoja kuin kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmä. Ero kapenee mitä pidempi giljotiinin venymäalue on. Ero kapenee myös, kun venymäalueen aloituspiste asetetaan myöhempään pisteeseen. Keskiarvon erotuksia vertailtaessa ei muita selkeitä trendejä ole havaittavissa ja erot ovat tilastollisesti erittäin merkitseviä.

Palkkitestin ja giljotiinimenetelmän t-testissä käytettiin merkitsevyytensä 0,05. T-testin tuottamat p-arvot on esitetty taulukossa 6. Solujen arvot, jotka ovat yli 0,05 on värjätty vihreällä. Näiden solujen osalta H_0 jää voimaan.

Taulukko 6. Palkkitestin - giljotiinin p-arvot

	G10_30	G10_50	G10_60	G10_70	G20_50	G20_60	G20_70	G30_50	G30_70
Tuote 1.1	0,959	0,090	0,000	0,000	0,166	0,000	0,000	0,046	0,000
Tuote 1.2	0,015	0,384	0,007	0,000	0,274	0,010	0,000	0,956	0,000
Tuote 1.3	0,000	0,000	0,639	0,000	0,001	0,746	0,000	0,157	0,000
Tuote 2.1	0,101	0,047	0,898	0,000	0,006	0,632	0,000	0,004	0,000
Tuote 2.2	0,426	0,840	0,000	0,000	0,153	0,008	0,000	0,147	0,000
Tuote 2.3	0,236	0,014	0,135	0,009	0,001	0,020	0,019	0,000	0,000
Tuote 3.1	0,114	0,625	0,000	0,000	0,057	0,000	0,000	0,470	0,000
Tuote 4.2	0,016	0,536	0,006	0,000	0,687	0,002	0,000	0,357	0,000

Lyhyiden venymäalueiden osalta keskiarvot menetelmien välillä on tilastollisesti yhtä suuret yli puolella tuote-eristä. Pitkillä venymäalueilla ja 70 % asti jatkuvilla venymäalueilla keskiarvot menetelmien välillä ovat eri suuria. 70 % jatkuvilla venymäalueilla ero tilastollisesti erittäin merkitsevä. Taulukkoon 7 on koottu giljotiinin eri venymäalueiden ja palkkitestin keskiarvojen erotus. Taulukkoon vihreällä on merkitty solut, joiden p-arvo oli yli 0,05.

Taulukko 7. Palkkitestin - giljotiini keskiarvojen erotus

	G10_30	G10_50	G10_60	G10_70	G20_50	G20_60	G20_70	G30_50	G30_70
Tuote 1.1	0,015	-0,360	-0,939	-1,752	-0,330	-1,054	-1,922	-0,492	-2,184
Tuote 1.2	0,371	0,091	-0,330	-0,871	0,152	-0,378	-0,977	-0,010	-1,181
Tuote 1.3	1,360	0,632	0,068	-0,450	0,617	-0,050	-0,604	0,304	-0,890
Tuote 2.1	1,790	1,544	0,060	-1,797	2,485	0,230	-2,038	2,236	-2,646
Tuote 2.2	-0,228	0,046	-0,671	-1,856	0,484	-0,580	-1,998	0,903	-2,338
Tuote 2.3	0,619	1,249	0,533	-0,753	2,159	0,989	-0,714	2,353	-1,104
Tuote 3.1	0,297	-0,036	-0,425	-0,876	-0,133	-0,560	-1,012	-0,105	-1,156
Tuote 4.2	0,738	0,082	-0,395	-1,093	0,058	-0,506	-1,253	-0,177	-1,504

Giljotiinimenetelmän keskiarvot asettuvat palkkitestin keskiarvojen molemmille puolille kuitenkin siten, että giljotiinin keskiarvo on korkeampi venymäalueen alkupäässä. Venymäalueen mennessä yli 60 % giljotiinin keskiarvot ovat pienempiä kuin palkkitestin keskiarvo.

5.3 Giljotiinin etujen arviointi

Giljotiinin käyttöönotolla voidaan saavuttaa useita etuja niin ajallisesti kuin taloudellisestikin. Itse menetelmänä giljotiini on helppokäyttöinen. Näytteet eivät tarvitse esikäsittelyä ja laitteistoon ei tarvitse lisätä alkutiedoiksi muuta kuin näytteiden mitat. Tämän kappaleen aikana käsitellään giljotiinista saavutettavia etuja niin työajallisesti kuin taloudellisesti.

5.3.1 Ajalliset säästöt

Koko näytteenkäsittelyprosessissa on jaoteltavissa viisi työvaihetta, jotka pätevät kaikilla kolmella menetelmällä. Nämä ovat: Suunnittelu, sahaus, mittaus koestus ja raportointi. Lisäksi palkkien ja kahden kappaleen leikkauslujuuden näyteprosessiin kuuluu liimaus. Työajan lasku on tehty yhdelle näytesetille, joka sisältää kolme rinnakkaisnäytettä.

Työn vaiheista suunnitteluun, sahaukseen, mittaukseen ja raportointiin voidaan kuvitella menevän sama aika kullakin menetelmällä. Kuhunkin menetelmään käytetty aika ja menetelmien välisiä eroja on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Menetelmiin käytettävä työaika

Työvaihe	Giljotiini	Palkki	Kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmä
Suunnittelu	60 min	60 min	60 min
Sahaus	20 min	20 min	20 min
Näytekappaleiden mittaus	20 min	20 min	20 min
Liimaus	-	45 min	15 min
Koestus	10 min	25 min	20 min
Raportointi	60 min	60 min	60 min
Yhteensä	170 min	230 min	195 min

Taulukosta huomataan kuinka paljon työaikaa säästetään liimauksen osalta ja liimaukseen kuluva aika kertaantuu jokaisen setin yhteydessä. Liimauksessa ei huomioida näytteiden kuivumiseen kuluva aikaa, koska näytteet eivät tarvitse kuivuessaan valvomista ja kyseisen ajan voi käyttää muihin työtehtäviin.

Koestuksen osalta giljotiini on selkeästi nopeampi kuin muuta menetelmät.

Taulukon perusteella voidaan arvioida, että giljotiini säästää noin tunnin verran aikaa verrattuna palkkitestiin ja noin puoli tuntia verrattuna kahden kappaleen leikkauslujuuteen, kun valmistellaan ja koestetaan yksi näytesetti.

5.3.2 Taloudelliset säästöt

Menetelmien väliset taloudelliset säästöt voidaan jaotella palkkoihin ja materiaalikustannuksiin. Arvioidaan ensin työajan säästöistä muodostuvat palkkasäästöt vuositasolla. Työntekijän palkaksi asetetaan 18 €/h, joka tarkoittaa noin 3000 € bruttopalkkaa kuukaudessa. Bruttopalkkaan lisätään työnantajalle tulevia sivukustannuksia. Sivukustannusten kerroin bruttopalkkaan on noin 1,5. Laskentaan huomioidaan ainoastaan laadunhallinnan kautta tulevat näytesetit. Projektien kautta tulevia työtilauksien määrää ei voida arvioida. Taloudellinen säästöarvio on siis minimisäästöt mitä tultaisiin giljotiinimenetelmän avulla säästämään. Vuositasolla laadunhallinnan näytesettejä tulee laboratorioon tutkittavaksi noin sata, joten palkoissa säästetään vuositasolla verrattuna palkkitestiin kaavan 14 mukaisesti.

$$1 \text{ h} * 100 * (18 \text{ €/h} * 1,5) = 2700 \text{ €} \quad 14$$

Ja verrattuna kahden kappaleen leikkauslujuteen (Kaava 15):

$$\left(\frac{25 \text{ min}}{60 \text{ min/h}} \right) * 100 * (18 \text{ €/h} * 1,5) = 1156,25 \text{ €} \quad 15$$

Materiaalien osalta säästöt syntyvät palkkien osalta peltilevyistä ja liimasta.

Peltilevyjen neliöhinta vuonna 2022 peltien valmistajalta oli 25,50 €/m².

Yleisimmin käytetty pelti on leveydeltään 122 mm, joten yhden pellin pinta-ala on (Kaava 16):

$$\frac{1000 \text{ mm} * 122 \text{ mm}}{1000000} = 0,122 \text{ m}^2 \quad 16$$

Laadunhallinnan näytesettejä tulee arviolta sata vuodessa, mikä tarkoittaa 300 palkkia eli yhteensä 600 peltiä tarvitaan laadunhallinnan näytteisiin. Peltien kokonaispinta-ala 122 mm pellin leveydellä on (Kaava 17):

$$0,122 \text{ m}^2 * 600 = 73,2 \text{ m}^2 \quad 17$$

Peltien hinta on täten (Kaava 18):

$$73,2 \text{ m}^2 * 25,50 \text{ €} = 1866,60 \text{ €} \quad 18$$

Peltien valmistukseen tarvitaan työvoimaa ja työvoiman hinnaksi on arvioitu 442,50 € yhdeltä työpäivältä. 73,5 m² peltimäärän valmistamiseen kuluu kaksi täyttä työpäivää ja työn kustannus on täten 885 €. Kun kaikki kustannukset yhdistää, niin giljotiinin säästöiksi verrattuna palkkitestiin vuositasolla saadaan:

$$2700 \text{ €} + 1866,60 \text{ €} + 885 \text{ €} = 5451,60 \text{ €} \quad 19$$

Tämä summa on minimisäästöt vuositasolla. Projektien määrän vaihtelun myötä säästöt voivat kaksin tai kolminkertaistuaakin. Jokainen projektityö, joka pystytään tekemään giljotiinilla palkkitestin sijasta lisää säästöjä. Lisäksi peltien hinta on ollut nousussa tasaista tahtia ja merkkejä hinnan nousun laantumiselle ei ole joten palkkitestin kustannukset tulevat nousemaan.

Kahden kappaleen leikkauslujuuteen ei voida tarkkaa materiaalikustannusta laskea, sillä kahden kappaleen leikkauslujuutta ei hyödynnetä laadunhallintaan. Projekteista tulevia kustannuksia ei taas voida arvioida vuositasolla, sillä projektien määrää vuositasolla ei voida arvioida.

6 Yhteenveto

6.1 Johtopäätökset

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää konstruktiivisen villan leikkausmoduulimäärityksen menetelmää, niin että tämä ominaisuus saadaan määriteltä epäsuurana menetelmänä leikkauslujuusmäärityksessä käytettävän giljotiini-testilaitteen avulla.

Tuloksina tässä opinnäytetyössä saatiin giljotiinimenetelmään laskukaava, jolla giljotiinimenetelmälle voidaan laskea leikkausmoduuli eri venymäalueilla. Laskukaava on sovellettu standardista EN 12090.

T-testin avulla tutkittiin mitattavien menetelmien tulosten välisiä keskiarvoja. Kahden kappaleen leikkauslujuuden ja giljotiinin keskiarvojen välillä oli tilastollisesti erittäin merkitsevä ero 0,01 merkittävyydellä jokaisen tuote-erän ja venymäalueen osalta. Keskiarvojen ero pieneni venymäalueen kasvaessa, mutta ero oli silti tilastollisesti erittäin merkitsevä. Palkkitestin ja giljotiinin keskiarvojen välillä oli havaittavissa yhtäläisyyksiä useammalla tuote-erällä ja useammalla venymäalueella, kun merkitsevyydellä asetettiin 0,05. Yksikään venymäalue ei osoittanut kuitenkaan keskiarvojen yhtäsuuruutta kaikilla tuote-erillä vaan korkeintaan viidellä erällä kahdeksasta.

Giljotiinimenetelmä osoitti mittauksien aikana ja tuloksia analysoidessa epätarkkuutta. Menetelmän nopean koestusnopeuden myötä mittapisteen välit kasvoivat hetkittäin suuriksi. Suurimmillaan erot olivat voima-siirtymäkäyrän jyrkimmissä kohdissa eli alueella 10-50 %. Tällä alueella menetelmien keskiarvojen todettiin olevan yhtä suuria yli puolella tuote-eristä, mutta mittauksen epätarkkuuden myötä menetelmien välistä keskiarvojen yhtäsuuruuksia ei voida vahvistaa.

Giljotiinimenetelmän todettiin säästävän aikaa verrattuna palkkitestiin ja kahden kappaleen leikkauslujuuteen. Yhden setin tekemisessä giljotiini säästää noin

tunnin verrattuna palkkitestiin ja noin 25 minuuttia kahden kappaleen leikkauslujuuteen verrattuna.

Taloudelliset säästöt vuositasolla olivat noin 5500 €. Projektimäärien vaihtelun myötä säästetty rahasumma niin työssä kuin materiaaleissa voi kaksin tai kolminkertaistua. Giljotiinimenetelmä lisää myös työntekijän tehokkuutta säästetyn ajan myötä, kun kyseisen ajan voi hyödyntää muihin työtehtäviin ja projekteihin.

6.2 Jatkokehitys

Työn tulosten perusteella giljotiinimenetelmän kehitystä kannattaa jatkaa. Tulokset varsinkin palkkitestiin vertailtaessa olivat lupauksia antavia, mutta giljotiinimenetelmän epätarkkuuden myötä työssä saatuja tuloksia ei voida vahvistaa. Uuden menetelmän kannalta on tehtävä lisää koestuksia ja koota isompia näytemääriä analysoitavaksi. Giljotiinimenetelmän tarkkuutta voitaisiin lisätä pienentämällä koestuksen leikkausnopeutta 200 mm/min vähintään 100 mm/min tai 50 mm/min. Leikkausnopeutta vähentämällä saataisiin lisää datapisteitä ja moduulilaskenta tarkentuisi ja näytteiden välinen keskihajonta saataisiin pienemmäksi. Tarkentuneilla tuloksilla voidaan varmistua t-testin tuloksista ja joko vahvistaa tai hylätä tämän työn myötä saatuja tuloksia ja päätelmiä. Leikkausnopeuden hidastamisella ei olisi kuitenkaan merkittäviä vaikutuksia ajallisesti menetelmien välillä. Taloudelliset säästöt pienenisivät hiukan, mutta eivät merkittävästi sillä taloudelliset erotukset menetelmien välillä syntyvät materiaalikustannuksista. Leikkausmoduulin laskentaa varten näytteiden venymäaluetta voisi lyhentää alueelle 10-50 % ja venymäaluetta voisi tarkentaa 5 % tarkkuudelle kuitenkin siten, että venymäalue on aina vähintään 20 % mittainen, mutta ei yli 40 %.

Menetelmien välille voitaisiin myös luoda menetelmäkerroin, jolla mittausmenetelmien välinen ero voidaan todeta. Tämän työn tuloksilla voidaan todeta, että giljotiinin ja kahden kappaleen leikkauslujuusmenetelmän välillä keskiarvojen erot ovat merkityksellisen suuret, joten kahden kappaleen

leikkauslujuusmenetelmälle voitaisiin määrittää kerroin, jolla todetaan ero ja keskiarvot saataisiin yhtä suureksi tietyllä tai tietyillä venymäalueilla. Mikäli lisämittaukset tuovat eroja giljotiinin ja palkkitestin keskiarvoihin, niin sama kertoimen määrittäminen voidaan tehdä palkkitestille.

Kun menetelmälle saavutetaan riittävän hyvä tarkkuus ja menetelmien välinen keskiarvo voidaan todeta olevan sama tai keskiarvojen erotus on pystytty määrittämään luotettavasti, niin giljotiinilaitteistoon voidaan luoda automaattinen leikkausmoduulin laskenta. Laskenta toimisi samoilla keinoilla kuin palkkitestissä ja kahden kappaleen leikkauslujuuden leikkausmoduulin määrittämisessä.

6.3 Loppusanat

Tämä opinnäytetyö on ollut erittäin mielenkiintoinen ja opettavainen kokonaisuus. Menetelmäkehitys on pitkä prosessi ja toivottavasti tämän työn avulla saadaan varmistus sille, että giljotiinimenetelmän kehitystä kannattaa jatkaa. Toivonkin näkeväni giljotiinimenetelmän Parocin jokapäiväisessä käytössä tulevaisuudessa. Koko opinnäytetyö on opettanut minulle valtavasti, mutta haluan nostaa esiin kehitykseni tilastollisen analyysin parissa. Tämä työ on antanut mahdollisuuden oppia, tehdä ja tulkita erilaisia tilastollisia analyyseja pintaa syvemältä. Koen tämän työn edistäneen taitojani matkalla kohti asiantuntijuutta. Haluan kiittää koko Parocin R&D tiimiä tämän työn mahdollistamisesta ja uskoa se minun tehtäväkseni. Erityiskiitokset työn ohjaajalle Bror Engströmmille ja R&D labran esimiehelle Riikka Saariselle kaikista neuvoista ja kannustuksesta työn aikana. Haluan kiittää myös vanhempiani ja avovaimoa kaikesta tuesta ja kannustuksesta mitä tämän työn aikana olen saanut.

Lähteet

Kiilto Oy. 2019. *Käyttöturvallisuustiedote Kestopur 1C 10*. 2019.

Owens Corning. 2021. 2021 INVESTOR FACT SHEET. [Online] 2021. [Viitattu: 10. Tammikuu 2022.]

https://s21.q4cdn.com/855213745/files/doc_downloads/fact-sheet/2021/2021-Investor-Relations-Fact-Sheet_vF.pdf.

Paroc Group Oy. 2018. Owens Corning ostaa Paroc Groupin. [Online] 2018. [Viitattu: 10. Tammikuu 2022.] <https://www.paroc.fi/paroc-yrityksena/uutiset-ja-media/uutisarkisto/2017/owens-corning-ostaa-paroc-groupin>.

Paroc Group Oy. 2022. Paroc yrityksenä. [Online] 2022. [Viitattu: 10. Tammikuu 2022.] <https://www.paroc.fi/paroc-yrityksena>.

Siikanen, Unto. 2009. *Rakennusaineoppi 7. painos*. s.l. : Rakennustieto Oy, 2009.

Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2013. EN 12090 Determination of shear behaviour. s.l. : SFS, 2013.

Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2014. *Itsekantavat metalliohutlevypintaaiset eristävät sandwich-elementit. Tehdasvalmisteiset tuotteet. Tuotestandardi*. s.l. : SFS, 2014.

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2013. *Thermal insulating products for building applications. Determination of shear behaviour. 2*. Syyskuu 2013.

Taanila, Aki. 2020. Kahden riippumattoman otoksen vertailu. [Online] 2020. [Viitattu: 2. Toukokuu 2022.] <https://tilastoapu.wordpress.com/tag/kahden-riippumattoman-otoksen-t-testi/>.

Walli, Mats. 2012. Lamellieristeiden hyödyntäminen loivissa kattorakenteissa. [Online] 2012. [Viitattu: 13. Tammikuu 2022.] https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41015/Walli_Mats.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

