

Timo Rautiainen

OVEN ELEMENTTIEN OPTIMOINTI

Opinnäytetyö
Materiaalitekniikan koulutusohjelma


Toukokuu 2015




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

| | |
|---|---|
|  | Opinnäytetyön päivämäärä 8.5.2015 |
| Tekijä(t) Timo Rautiainen | Koulutusohjelma ja suuntautuminen Materiaalitekniikan ko. |
| Nimeke Oven elementtien optimointi | |
| Tiivistelmä Työ on tehty River Plast Oy:n Puumalassa sijaitsevalle toimipisteelle. Yritys valmistaa kuorma-autojen perävaunujen ovia lujitemuovista alihankintana muille yrityksille. Tuotannossa on havaittu pieniä ongelmia ovien valmistuksessa, sillä ovissa esiintyy pientä peilaamista. Yrityksen toimitusjohtaja uskoo, että pinnanlaatuongelma poistuu uuden rakenteen myötä. Työn tavoitteena oli uudella rakenteella poistaa havaittu pinnanlaatuongelma. Sillä oli kuitenkin oltava sama jäykkyys kuin vanhalla rakenteella. Toiveena oli myös, että uusi rakenne olisi helpompi valmistaa kuin nykyisin käytetty ratkaisu. Työssä on tehty testejä ja simulointia. Ensin oven pintalaminaatista on tehty kymmenen kappaletta vetokokeita, jotta saataisiin selvitettyä sen kimmokerroin simulointia varten. Sen jälkeen ovelle on tehty kolmipistetaivutustesti. Testin tarkoituksena oli määrittää rakenteen mekaanisia ominaisuuksia. Simulointiosuudessa ensin mallinnettiin kolmipistetaivutuksessa käytetty kappale, jolle simuloitiin sama kolmipistetaivutustesti uudelleen. Tätä mallia korjailtiin niin pitkään, kunnes simuloidusta testistä saatiin samanlaisia tuloksia kuin oikeasta kolmipistetaivutuksesta. Täten saadaan luotettava malli, jolle tehdään uudet rakennevaihtoehdot. Opinnäytetyön toimeksiantajalle esiteltiin neljä rakenneratkaisua. Yrityksen toimitusjohtaja valitsi näistä yhden vaihtoehdon, joka ratkaisee edellä esitetyn ongelman. River Plast Oy selvittää, käykö uusi rakennevaihtoehto asiakkaille. Lisäksi yritys valmistaa oven, jossa on käytetty uutta rakennetta ja teettää sille lopuksi mekaanisia testejä. | |
| Asiasanat (avainsanat) Lujitemuovi, vetokoe, kolmipistetaivutustesti, simulaatio | |
| Sivumäärä 27+10 | Kieli Suomi |
| Huomautus (huomautukset liitteistä) | |
| Ohjaavan opettajan nimi Markku Kemppe | Opinnäytetyön toimeksiantaja River Plast Oy |

DESCRIPTION

| | |
|--|--|
|  | Date of the bachelor's thesis 8.5.2015 |
| Author(s) Timo Rautiainen | Degree programme and option Material Engineering |
| Name of the bachelor's thesis Door element optimization | |
| Abstract <p>The thesis was assigned by River Plast Oy's Puumala's plant. Puumala's plant manufactures reinforced plastic doors for trailer trucks to other companies. There has been some problems with the door surface quality, because it reflects light in some parts. The CEO of the company thinks the problem would be solved by optimizing door elements.</p> <p>The main goal of the thesis is to create a new structure for doors so the surface quality problems would be solved. The new structure should be as stiff as the company already uses. New structure should also be manufactured more easily.</p> <p>The thesis includes making tests and simulation. Thesis included making ten tensile tests for surface laminate, so the modulus of elasticity of the surface laminate were solved for simulation. Second test was single-point load test for a piece of a door. The purpose of the test was to clarify mechanical properties of the door.</p> <p>The information of these both tests was added to simulation part. At first, the same test piece used in single-point load test was modelled for simulation. Then the same single-point load test was simulated for that piece. This model piece was fixed so long that the simulation gave same results as the real single-point load test. This is to ensure that the model will give reliable results. New structures were designed on that model.</p> <p>Four new structure options were presented to the CEO of the River Plast Oy. The CEO chose one of the options, because he thinks it would fix the door surface quality problem. River Plast Oy will negotiate with the customers about the new structure option. Company will manufacture a door with the new structure option and makes some mechanical tests for it.</p> | |
| Subject headings, (keywords) Reinforced plastic, tensile test, single-point load test, simulation | |
| Pages 27+10 | Language Finnish |
| Remarks, notes on appendices | |
| Tutor Markku Kemppe | Bachelor's thesis assigned by River Plast Oy |

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 5 |
| 2 | RIVER PLAST OY | 5 |
| 3 | KÄYTETYT MATERIAALIT | 6 |
| 3.1 | Alumiini | 6 |
| 3.2 | Komposiitit | 6 |
| 3.3 | Lujitemuovi | 7 |
| 3.3.1 | Muovit | 7 |
| 3.3.2 | Kuidut | 8 |
| 3.4 | Lasikuitu | 9 |
| 3.5 | Polyuretaani | 10 |
| 3.6 | Sandwich-rakenne | 10 |
| 4 | TEORIAA TESTEISTÄ JA MALLINNUKSESTA | 11 |
| 4.1 | Vetokoe | 11 |
| 4.2 | Kolmipistetaivutuskoe | 12 |
| 4.3 | CAD | 13 |
| 4.3.1 | Elementtimenetelmä | 13 |
| 5 | OVI | 14 |
| 6 | TESTIKAPPALEET | 15 |
| 7 | TULOKSET JA TULOKSIEN ANALYSOINTI | 17 |
| 7.1 | Vetokoe | 18 |
| 7.2 | Kolmipistetaivutustesti | 20 |
| 7.3 | Simulaatiomallin vertailu ja tulos | 22 |
| 8 | ERI KEHITYSVAIHTOEHDOT | 24 |
| 9 | TYÖN TULOS | 25 |
| 10 | POHDINTAA | 26 |
| | LÄHTEET | 28 |

LIITTEET

- 1 Vetokokeen tulokset
- 2 Vetosauvojen venymät millimetreinä
- 3 Vetosauvojen venymät prosentteina
- 4 Kolmipistetaivutuskokeen tulokset
- 5 Kuva simulaatiomallista

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena on käsitellä oven elementtien optimointia. Opinnäytetyö tehdään River Plast Oy:n Puumalassa sijaitsevaan toimipisteeseen. Puumalan toimipiste on erikoistunut rekka-autojen perävaunujen ovien valmistamiseen. Ovet tehdään lujitemuovia ja alumiinia yhdistelemällä, jonka on havaittu aiheuttavan ongelmia pinnanlaatuun. Oven pinnassa esiintyy peilaantumista tietyillä kohdin rakennetta. Toimeksiantaja uskoo, että ongelmat ratkeaisivat oven elementtejä muuntamalla.

Tarkoituksena on pohtia ovelle rakenne, jonka myötä ilmenneet ongelmat minimoitaisiin, ilman että jäykkyys heikkenisi. Rakenteen on oltava myös helppo ja nopea valmistaa. Ideoinnilla on rajoituksina kaksi asiaa: ensimmäinen asia on se, että hartseihin ei tarvitse puuttua. Toimeksiantaja on selvittänyt asiaa niiden osalta ja nykyisin käytetty hartsi on todettu riittävän hyväksi. Toinen asia on se, että valmistusmateriaaleja ei vaihdeta.

Toimintasuunnitelmana on se, että ensin tehdään ovesta testikappaleita. Näille tehdään veto- ja kolmipistetäivutuskokeita. Vetokokeen tarkoituksena on saada pintalaminatille kimmokerroin. Kolmipistetäivutuskokeen tarkoituksena on saada selvitettyä lähtötaso mekaanisille ominaisuuksille, joiden on oltava vähintään samat uudessa rakenteessa. Sen jälkeen mallinnetaan SolidWorks-mallinnusohjelmaa käyttäen kolmesta viiteen erilaista tulevaa elementtirakennetta. Lopuksi mallinnetuille rakenteille tehdään simulointeja, joilla pyritään todentamaan mekaanisilta arvoilta paras rakenne. Näistä paras rakenne ehdotetaan toimeksiantajalle, joka mahdollisesti käyttää sitä ovissa.

2 RIVER PLAST OY

River Plast Oy on perustettu vuonna 1995. Yritys on lähtöisin Puumalasta, jossa se on keskittynyt valmistamaan lujitemuovituotteita ajoneuvoteollisuuteen. Tuotteet valmistetaan injektiovakuumitekniikkaa käyttäen. Tätä tekniikkaa käyttäen yritys saa säännöteltä hartsin määrän tarkemmin tuotteisiinsa. River Plast Oy:n asiakkaat sijaitsevat Pohjoismaissa ja Baltian maissa. /1./

Yritys on laajentunut 2014 hankkimalla Imatralla sijaitsevan Plastilon Oy:n, joka valmistaa lujitemuoviputkia. Kaupan myötä River Plast Oy avasi toimipisteen Imatralla. /1./

3 KÄYTETYT MATERIAALIT

3.1 Alumiini

Alumiini on yleisin metalli maankuoressa heti hapen ja piin jälkeen. Alumiinia esiintyy eniten päiväntasaajan tuntumassa. Suurin osa alumiinista on sitoutuneena bauksiitissa, jossa sitä on noin 25 %. /13./

Alumiini on erittäin kevyt ja luja materiaali. Sitä on helppo muokata, ja se kestää hyvin happoja, emäksiä ja kylmää. Näiden lisäksi sillä on hyvä sähkön- ja lämmönjohtokyky. Alumiinia käytetäänkin näistä ominaisuuksista johtuen erittäin paljon teollisuudessa joko puhtaana tai seoksena. /13./

3.2 Komposiitit

Komposiitti liittää kaksi tai useampaa materiaalia yhdeksi kokonaisuudeksi. Materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät ole lienneet tai sulautuneet toisiinsa. Tarkoituksena on materiaaleja yhdistämällä maksimoida materiaalien hyvät ominaisuudet ja minimoida huonot. Komposiitin ominaisuudet riippuvat käytettävien materiaalien ominaisuuksista. /2./

Komposiitit voidaan jakaa kahteen ryhmään, anisotrooppisiin ja isotrooppisiin komposiitteihin. Anisotrooppisissa komposiiteissa materiaaliominaisuudet ovat eri suunnissa erilaiset. Näihin kuuluvat kuitulujitetut komposiitit, laminaattikomposiitit ja sandwich-rakenteiset komposiitit. Isotrooppisissa komposiiteissa taas materiaaliominaisuudet ovat kaikissa suunnissa samanlaiset. Isotrooppisia komposiitteja ovat partikkelilujitteiset materiaalit ja multiakksiaalikankaat. /10./

Komposiittien eduiksi luetaan keveys, hyvä korroosionkesto ja jäykkyys. Tarpeen tullen ne voidaan valmistaa myös sähköä eristäväksi tai johtavaksi. Komposiiteilla on

myös erinomainen muokattavuus ja on mahdollista valmistaa suuria kappaleita yhtenä kokonaisuutena. Haittapuoliksi lasketaan raaka-aineiden ja valmistuksen korkea hinta ja kiinnitys muihin komponentteihin. Lisäksi analysointi voi olla hankalaa ja ongelmaksi muodostuu myös kierrätys. /2./

3.3 Lujitemuovi

Lujitemuovi on yksi komposiittien alaryhmistä. Muoveilla yleensä ei ole kovin hyvät tekniset ominaisuudet. Tästä syystä muovin kanssa käytetään erilaisia lujitteita, jotta saadaan teknisiä ominaisuuksia paremmiksi. /7, s. 135./ Lujitemuovien yhteydessä lujitettavaa materiaalia kutsutaan matriisiksi. Lujitteena käytetään yleensä kuituja, joista on kerrottu tarkemmin kappaleessa 3.2.2.

3.3.1 Muovit

Muovit ovat suurimolekyylisiä, synteisireaktiossa syntyviä aineita eli polymeerejä. Näihin on sekoitettu tavallisesti pieni määrä lisäaineita, joita ovat apu-, seos- ja täysaineet. Apuaineilla pyritään helpottamaan muovituotteen valmistusta ja seos- ja täysaineilla muokkaamaan lopputuotteen ominaisuuksia. /3, s. 18./

Muovit jaetaan kahteen pääryhmään, kesto- ja kertamuoveihin, muovattavuusominaisuuksien perusteella. Kestomuovien molekyylit ovat pitkiä polymeerejä, joiden välillä ei ole kemiallisia sidoksia. Molekyyliden sidosvoimat heikkenevät, kun niitä lämmitetään ja vahvistuvat jäädytettäessä. Täten kestumuveja voidaan muokata toistuvasti lämmön ja paineen avulla. Kestumuoveja ovat esim. polyeteenit, polypropeenit ja polyamidit. /3, s. 18./

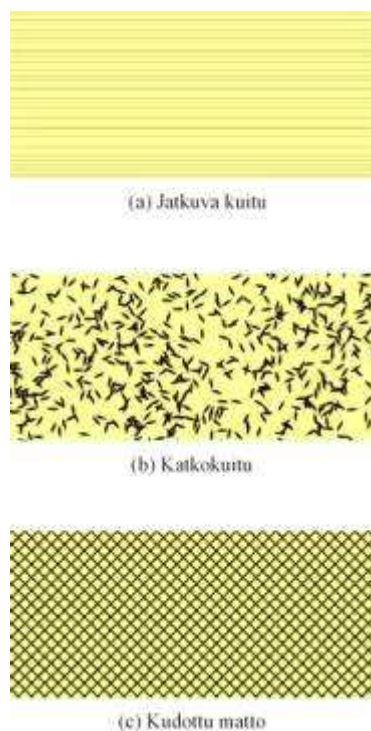
Kertamuovien perusraaka-aine on hartsi. Hartsi kovettuu muoviksi kovettumisreaktiossa, joka tarvitsee yleensä lämmön tai muun ulkoisen energian tai kovetteen. Kovetusreaktio on eksotermien eli lämpöä tuottavaa. Siinä hartsin tilavuus pienenee jonkin verran. Tätä kutsutaan kovettumiskutistumaksi. Kertamuovien suurin ero kestumuveihin on se, että niitä ei voi kierrättää. /3, s. 18./

3.3.2 Kuidut

Kuidut voivat esiintyä epäjatkovana tai jatkuvana kuituna sekä kudottuna mattona. Epäjatkovana kuidun osuuden kaikista lujitteiden käyttömuodoista arvioidaan olevan yli 60 %. Epäjatkovat kuidut voivat olla katkokuituna eli hakkeina tai jauhettuina kuituina. Nämä valmistetaan yleensä lasi-, hiili- tai aramidikuidusta. Haittapuolena epäjatkovalla kuidulla on se, että niiden suuntautuminen on vaihtelevaa ja on hankalaa määrittää materiaalille haluttu kuitujen suuntaus. /3, s. 123–124./

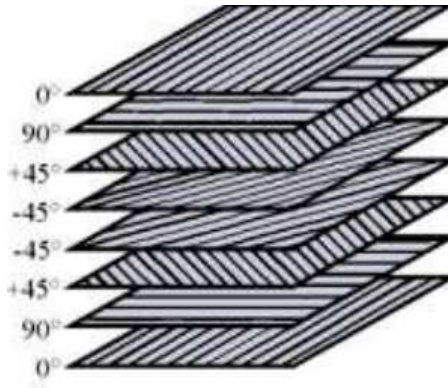
Hake on määrämittaan katkottua jatkuvaa kuitua. Hakkeiden pituus on yleensä 1-100 mm. Hakkeet sekoitetaan kerta- tai kestopuoveihin, ja niistä valmistetaan katkokuitumattoja, -kankaita sekä pintahuopia. /3, s. 123./

Jatkuvia kuituja käytetään lujittamiseen joko kuitukimppuina tai lankoina, jotka on valmistettu useasta ohuesta jatkuvasta kuidusta eli filamentista. Langan tai kuitukimppun filamenttiluku vaihtelee muutamasta kymmenestä useisiin tuhansiin. Jatkovien kuitujen suuntaaminen on helpompaa kuin epäjatkovien kuitujen. Tästä syystä johtuen jatkuvilla kuiduilla lujitettujen materiaalien vetolujuus on n. 50 % ja kimmomoduuli 10 % suurempia kuin epäjatkovilla kuiduilla lujitettuna. /3, s. 123–124./



KUVA 1. Teollisuudessa käytettyjä kuitutyyppjä /2/

Kudottujen kuitumattojen avulla valmistetaan multiakksiaalikankaita. Ne ovat kankaita, jotka ovat punottu useasta kuitumatosta. Ne ovat asetettu eri kulmiin, jotta saadaan kankaalle tasavertaisemmat ominaisuudet eri suunnille. Näitä kankaita käytetään, kun halutaan materiaalin kestävä vääntöä tai taivutusta.



KUVA 2. Esimerkkikuva kankaiden suuntautumisista /2/

3.4 Lasikuitu

Kaupallisesti ja teollisesti merkittävin lujite on lasikuitu. Sen osuus kaikesta lujitekäytöstä on runsas 95 % /3, s.74-75/. Lasikuitu on monipuolinen ja helppokäyttöinen teollisuusmateriaali. Sen hyviä puolia ovat muun muassa keveys, lujuus, palonkesto ja mitapysyvyys. Materiaalia käytetään paljon esimerkiksi vene- ja urheiluteollisuudessa. Lasikuitua käytetään myös, kuten tässäkin tapauksessa, rekkojen koreissa ja sen osissa. Tämä johtuu siitä, että lasikuitu on kevyttä ja se ei ruostu. Sen huonoina puolina on, kuten kaikilla komposiittimateriaaleilla, vaikea kierrätettävyys. /4./

Kaupallisesti valmistettavia lasityyppejä on muutamia erilaisia. 99 prosenttia valmistetuista lasikuiduista on E-lasikuitua. Se on näistä yleisin, koska sen sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet ovat hyvät. C-lasi on kehitetty kestävämpiä olosuhteita. S-lasikuitu on kehitetty lentokoneteollisuutta varten. Sen vetolujuus ja kimmokerroin ovat E-lasin vastaavia paremmat, mutta käyttöä rajoittaa sen kalleus. A-lasikuitu on vanhin lasikuitutyyppi, jota ei enää valmisteta sen huonon vedenkestävyyden takia. Seuraavalla sivulla on esitetty taulukko näiden lasikuitujen ominaisuuksista. /3, s. 75/.

TAULUKKO 1. Lasikuitujen ominaisuudet /3, s.75/

| | | A | C | E | S |
|--|-------------------|------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | p % | 72,0 | 64,5 | 55,0 | 65,0 |
| Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ | p % | 2,0 | 4,0 | 4,5 | 25,0 |
| CaO | p % | 10,0 | 13,5 | 21,5 | – |
| MgO | p % | 2,0 | 3,0 | 0,5 | 10,0 |
| Na ₂ O+K ₂ O | p % | 14,5 | 10,0 | < 1,0 | – |
| B ₂ O ₃ | p % | – | 5,0 | 7,5 | – |
| Ominaispaino | g/cm ³ | 2,45 | 2,45 | 2,54 | 2,48 |
| Taitekerroin | nD | – | 1,541 | 1,549 | 1,523 |
| Vetolujuus (erilliskuitu) | GPa | 3,1 | 3,3 | 3,6 | 4,6 |
| Vetolujuus (370 °C) | GPa | – | – | 2,6 | 4,4 |
| Kimmo kerroin | GPa | 72 | 70 | 75 | 86 |
| Pehmenemispiste | °C | 700 | 690 | 850 | 990 |

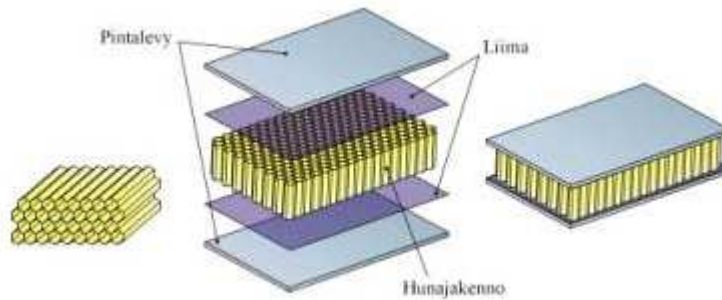
3.5 Polyuretaani

Polyuretaani on eristemateriaali, jonka pääraaka-aineet ovat isosyanaatti, polyoli ja punneaine. Sen yleisin käyttökohde on lämmön eristys. Se eroaa muista eristemateriaaleista siten, että sen puristus-, veto- ja leikkauslujuutta voidaan käyttää hyödyksi. Täten polyuretaania voidaan käyttää myös sandwich-rakenteissa. Polyuretaanin hyväksi puoleksi lasketaan myös keveys ja veden ja kosteuden sietokyky. Materiaalista valmistetaan eristeiden lisäksi esimerkiksi patjoja, pehmusteita ja istuimia. /5./

3.6 Sandwich-rakenne

Sandwich-rakenne esiintyy tutkittavassa ovirakenteessa. Sandwich-rakenne muodostuu kahdesta pintakerroksesta ja niiden väliin jäävästä ytimestä, jotka on kiinnitetty toisiinsa muodostaen yhteisen kokonaisuuden. Tässä tapauksessa ylemmän ja alemman pintakerroksen muodostavat lasikuitulaminaatit ja ydinaineena on polyuretaani.

Sandwich-rakennetta esiintyy yleisesti seinä- ja kattoelementeissä. Rakenteen avulla saadaan keveyttä, lujuutta ja hyvää lämmöneristystä. /6./



KUVA 3. Esimerkkikuva sandwich-rakenteesta /2/

4 TEORIAA TESTEISTÄ JA MALLINNUKSESTA

4.1 Vetokoe

Vetokokeella saadaan tietoa kappaleen lujuus-, sitkeys- ja jäykkyysominaisuuksista. Kokeessa venytetään koekappaletta pituussuunnassa vakionopeudella ja mitataan samalla venytystä vastaavaa voimaa. Mitatusta voimasta ja venymästä saadaan selville kuvaajat jännitykselle σ ja venymälle ε . /7, s. 190./ Oheiset kaavat vetokokeeseen liittyen ovat kirjasta Muovitekniikan perusteet (1999), sivulta 191.

Jännitys σ lasketaan kaavalla,

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

jossa σ on vetojännitys (MPa), F on testissä mitattu voima (N) ja A on poikkipinta-ala (mm^2).

Venymä ε lasketaan kaavalla,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (2)$$

jossa ΔL_0 on kappaleen venytetty pituus (mm) ja L_0 alkuperäinen pituus (mm). Venymä ε voidaan ilmoittaa laaduttomana suhteena tai prosentteina.

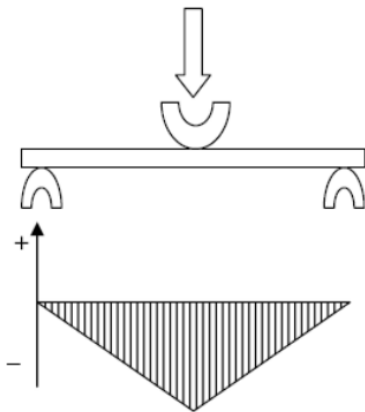
Vetokoe antaa tuloksena jännitys-venymäkuvaajan. Sen lineaariselta alkuosalta voidaan määrittää vetokimmokerroin eli kimmomoduuli E_t . Tämä kuvaa kappaleen voimia vastustaa muodonmuutoksia. Kimmomoduuli E_t voidaan laskea kaavalla,

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3)$$

jossa σ_1 on jännitys (MPa) määritettynä venymän arvolla $\varepsilon_1 = 0,0005$ ja σ_2 on jännitys (MPa) määritettynä venymän arvolla $\varepsilon_2 = 0,0025$.

4.2 Kolmipistetaivutuskoe

Taivutustestillä saadaan selville koekappaleiden käyttäytyminen taivutuksessa. Testillä saadaan selvitettyä mm. taivutuslujuus, -moduuli ja muodonmuutos tietyissä olosuhteissa. Testi eroaa vetokokeesta siten, että testikappaleen yläpinta supistuu ja alapinta laajenee. Täten kappaleen yläpintaan muodostuu puristusjännitys ja alapinnalle vetojännitys.



KUVA 4. Kolmipistetaivutus ja taivutusmomenttijakauma /8/

Kuvassa 4 on esimerkkitapaus kolmipistetaivutuksesta. Kappale lepää kahden tuen päällä ja tukien puolestavälistä tulee z- suuntainen kuormitus. Kuvassa näkyy myös taivutusmomenttijakauma, joka on suurimmillaan voiman kohdalla. Kappaletta kuormitetaan tasaisella nopeudella. Kuorman kasvaessa myös taipuma kasvaa.

Ohessa on esitelty laskukaavoja, joilla voidaan laskea testistä saatavia arvoja. Kaavat ovat peräisin standardista, joka käsittelee taivutustestien tekemistä sandwich-rakenteille /9, s. 2-3./. Testillä saadaan selvitettyä ydinaineen leikkausjännitys. Se saadaan lasket-
tua kaavalla,

$$\tau = \frac{P}{(d+c)b} \quad (4)$$

jossa τ on ydinaineen leikkausjännitys (MPa), P kuorma (N), d sandwich-rakenteen paksuus (mm), c ytimen paksuus (mm) ja b sandwichin leveys (mm).

Pintalaminaatin taivutusjännityksen saa laskettua kaavalla,

$$\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b} \quad (5)$$

jossa σ on pintalaminaatin taivutusjännitys (MPa), t sen paksuus (mm) ja L tukiväli (mm).

4.3 CAD

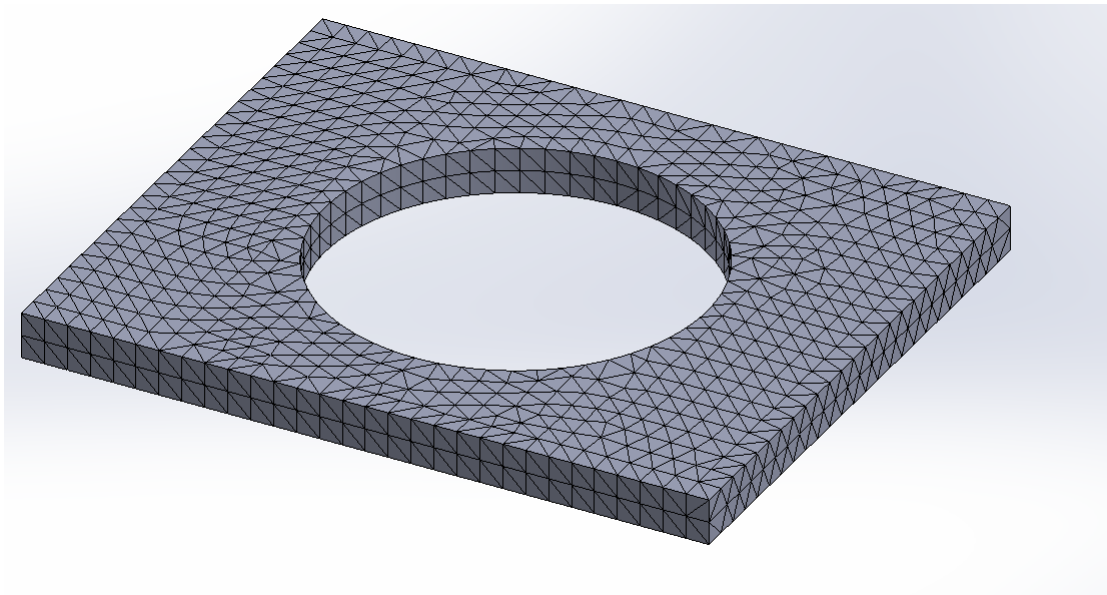
CAD tulee sanoista Computer-aided design, joka tarkoittaa tietokoneavusteista suunnittelua. Yleisimpiä CAD-ohjelmia ovat AutoCad, Inventor ja SolidWorks. Tietokoneella suunniteltaessa saavutetaan monia etuja. Mallinnetusta 3D-mallista voidaan esimerkiksi tehdä piirustuksia, lähettää malli NC-koneiden koneistettavaksi, tehdä simulointia tai 3D-tulostaa oikeaksi kappaleeksi.

4.3.1 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmää käytetään, kun kappaleelle tehdään lujuusoppia hyödyntävää simulointia. Se on numeerinen ratkaisumenetelmä, jota on käytetty 1950-luvulta saakka. Menetelmä kehittyi tietokoneiden mukana erittäin nopeasti 1960- ja 1970-luvuilla, jolloin syntyi suuri määrä eri rakennetyyppien käsittelyyn sopivia valmisohjelmistoja. /14, s. 2-3./

Elementtimenetelmän perusajatuksena on se, että tutkittava rakenne jaetaan haluttuun määrään mielivaltaisen kokoisia ja muotoisia elementtejä. Elementtien liitoskohtia toisiin elementteihin, runkoon tai rakenteen reunaan kutsutaan solmuiksi. Solmu voi olla rakenteen ja elementin tyypistä riippuen piste tai viiva. /14, s.7./

Kunkin elementin fysiikka käsitellään erillisenä tehtävänä, joko tarkasti tai likimääräisesti. Elementtien ratkaisut yhdistetään koko rakenteen ratkaisuksi, jossa on joukko tuntemattomia solmusiirtymiä ja solmukuormituksia. Sen jälkeen ohjelmisto pyrkii ratkaisemaan tuntemattomat solmusiirtymät ja solmukuormitukset. Täten saadaan ratkaistua likimääräisesti rakenteessa esimerkiksi siirtymiä, rasituksia ja jännityksiä. Tulosten tarkkuus paranee sen myötä, mitä enemmän elementtejä ja solmuja rakenteeseen on määritetty. /14, s.7./



KUVA 5. 3D-malli, jossa näkyy elementtiverkko

5 OVI

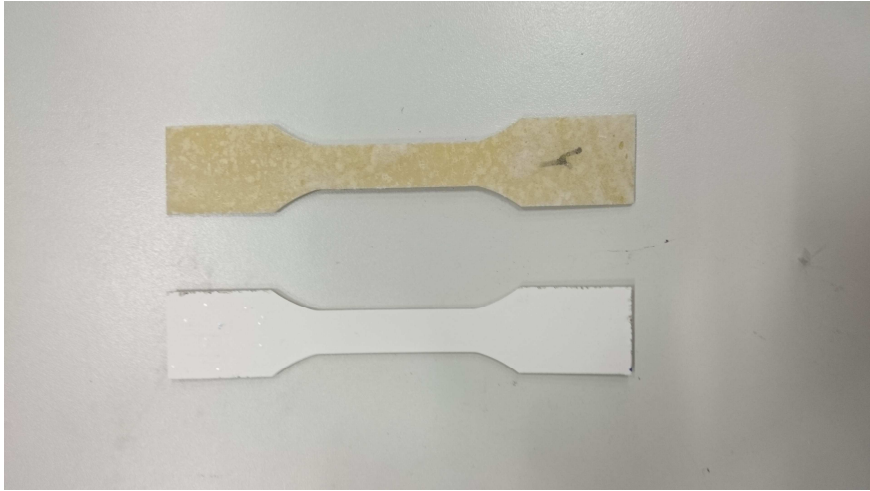
Ovessa on käytetty sandwich-rakennetta. Ydinaineena on polyuretaani, jonka ylä- ja alapinnalla on laminaatit. Laminaatti koostuu lasikuidun ja polyesterin yhdistelmästä. Laminaatissa on käytetty katko- ja jatkuvakuituista lasikuitua. Ovea on jäykistetty alumiinilla ja lasikuidusta tehdyllä multiakksiaalikulidulla. Laminaatin valkoinen pinta on saatu aikaan käsittelyaineella.



KUVA 6. Ovi

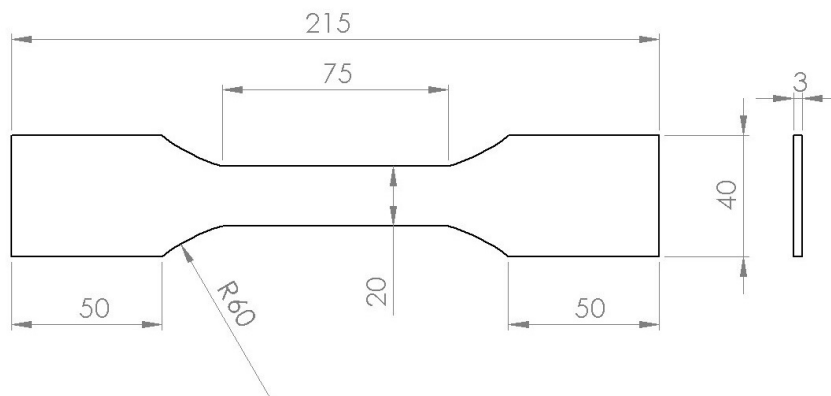
6 TESTIKAPPALEET

River Plast Oy:lta saaduista näytepaloista tehtiin testikappaleet vetokokeeseen ja kolmipistetaivutuskokeeseen. Vetokokeeseen halusimme vain laminaattikerroksen, joten laminaattikerros leikattiin sirkkelillä irti PUR-kerroksesta. Laminaattikerroksista leikattiin n. 20 kappaletta vetokoesauva-aihoita, joista puolet on leikattu oven pystysuunnasta ja toiset puolet oven leveysuunnasta. Kappaleista tämän jälkeen koneistettiin standardien SFS-EN ISO 527-4 -mallisia vetokoesauvoja. Näistä valittiin viisi virheettömän näköistä sauvaa kummastakin ryhmästä, joille tehdään vetokokeet. Kuvissa 7 ja 8 näkyvät vetokoesauvat molemmilta puolilta ja niiden mitat.



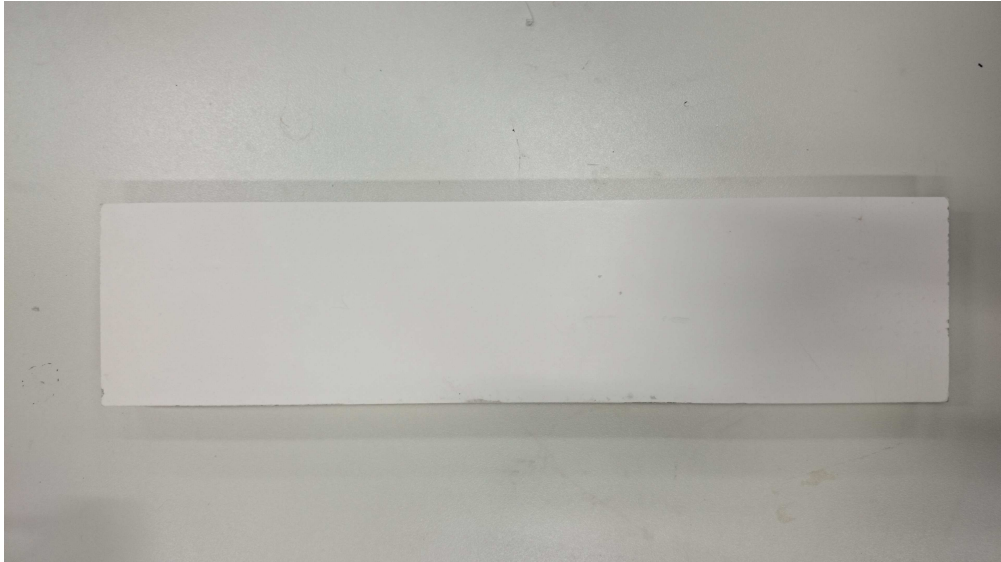
KUVA 7. Vetokoesauvat molemmilta puolilta

Standardia jouduttiin kiertämään hieman laitteiston vuoksi. Sauvan keskialueen pituus on määritelty standardissa 50 ± 0.5 millimetriä, mutta jouduimme koneistamaan 75 millimetrin pituiseksi. Tämä johtui vetokoneen ekstensometristä, sillä se antaisi luotettavampia tuloksia, jos keskialue olisi hieman pitempi.



KUVA 8. Koneistettujen vetosauvojen mitat

Kolmipistetaivutuskokeen kappale on tehty oven reunasta. Siinä on alumiinia ja multi-aksaalikuitua, joten tästä johtuen oli tärkeää tehdä koekappale juuri oven reunasta. Pala on 120 mm leveä ja 500 mm pitkä. Kuvissa 9 ja 10 näkyvät kolmipistetaivutuskappale ylhäältä ja sivusta.



KUVA 9. Kolmipistetaivutuskappale ylhäältä



KUVA 10. Kolmipistetaivutuskappale sivulta

7 TULOKSET JA TULOKSIEN ANALYSOINTI

Vetokokeet ja kolmipistetaivutus suoritettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun konelaboratoriossa. Testit tehtiin Shimadzu-merkkisellä koelaitteistolla. Laitteiston käyttöönottoon ja testien suorittamiseen sain apua henkilökunnalta, jotta testit sujuisivat hyvin.

7.1 Vetokoe

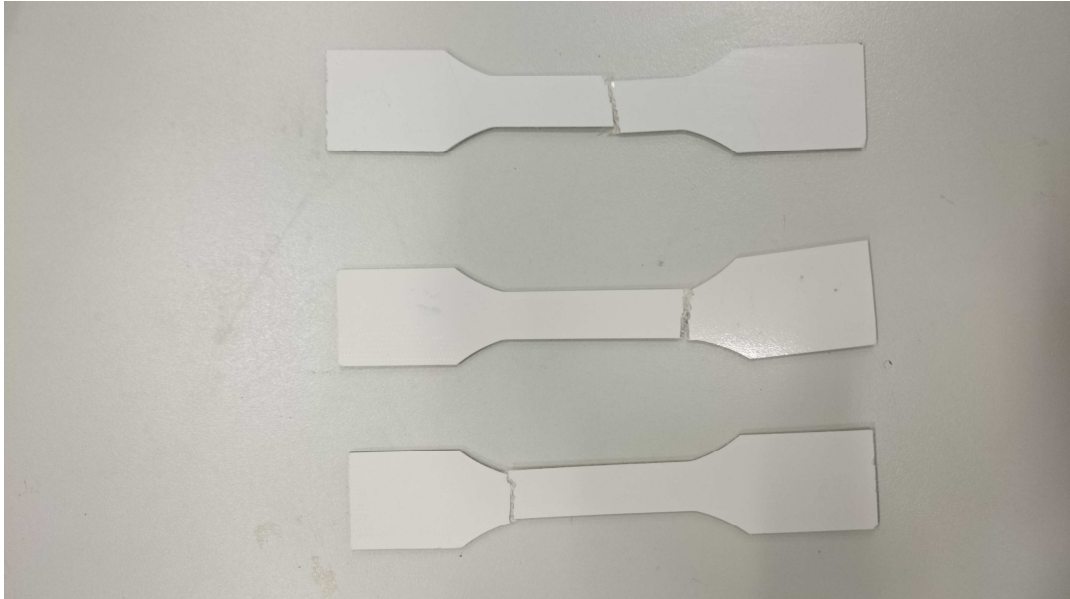
Vetokokeen tarkoituksena on saada määritettyä laminaattikerrokselle kimmokerroin simulaatiovaihetta varten. Täten saadaan simulaatiosta tarkempia ja luotettavampia tuloksia. Koe tehtiin standardin SFS-EN ISO 527-4 mukaisesti. Kappaleiden vetonopeus oli 2 mm/min.

Testeistä käy ilmi, että oven leveyssuunnasta leikatut palat olivat hieman jäykempiä ja venyivät enemmän ennen lopullista murtumista. Taulukossa 2 näkyy prosentteina leveyssuuntaisten ja pituussuuntaisten palojen ominaisuuksien erot prosentteina ja kappaleiden ominaisuuksien keskiarvo. Liitteessä 1 näkyy yksityiskohtaiset tulokset eri sauvoille.

TAULUKKO 2. Kappaleiden mekaanisten ominaisuuksien erot prosentteina

| | Kimmokerroin (N/mm ²) | Maks. voima (kN) | Murtojäännitys (N/mm ²) | Murtovenymä (%) |
|------------------|--------------------------------------|------------------------|--|--------------------|
| Leveyssuunta | 6508 | 3.86 | 64.33 | 1.18 |
| Pituussuunta | 6102 | 3.20 | 53.25 | 0.92 |
| Ero prosentteina | 6,30 | 17,00 | 17,00 | 22,00 |
| Keskiarvo | 6305 | 3.53 | 58.79 | 1.05 |

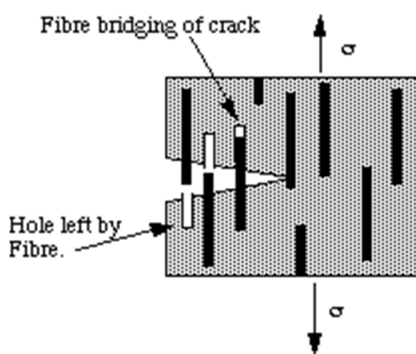
Vetotestien murtumakohta oli melko suora vetosuuntaa vastaan. Seitsemän kappaletta kymmenestä murtui kavennuksen alakohdasta, yksi murtui kavennuksen yläkohdasta ja loput kaksi keskeltä. Kuvassa 11 näkyy vetokoesauvojen murtumakohdat.



KUVA 11. Vetokoesauvojen murtumakohdat

Vetokoetulokset ovat lähelle toisiaan. Suuria poikkeamia ei esiintynyt. Kappaleiden samankaltaiset ominaisuudet eri suunnista johtuivat siitä, että kappaleessa käytettiin katkokuitua ja jatkuvaa kuitua, joita ei voi suunnata tiettyyn suuntaan.

Syy, miksi jotkut kappaleet osoittautuivat testissä paremmin kuin toiset, johtui laminaatin paremmasta kuitujen suuntautumisesta. Kun kuidut ovat asettuneet vedon suuntaisesti, aiheuttaa tämä aiheuttaa ns. pull-out -efektin. Kun materiaalia kuormitetaan, sen pinnalle tulee särö. Kuormituksesta aiheutuva särö etenee matriisissa, eli polyesterissä, lasikuituun asti. Kuormituksesta tuleva energia etenee säröä pitkin kuidun ja matriisin rajapinnalle ja pyrkii erottamaan ne. Kuormituksen kasvaessa lopulta niin suureksi, että kuitu katkeaa. Kun kuitu katkeaa, sen ulosveto matriisista sitoo energiaa sitkistäen materiaalia. /11./

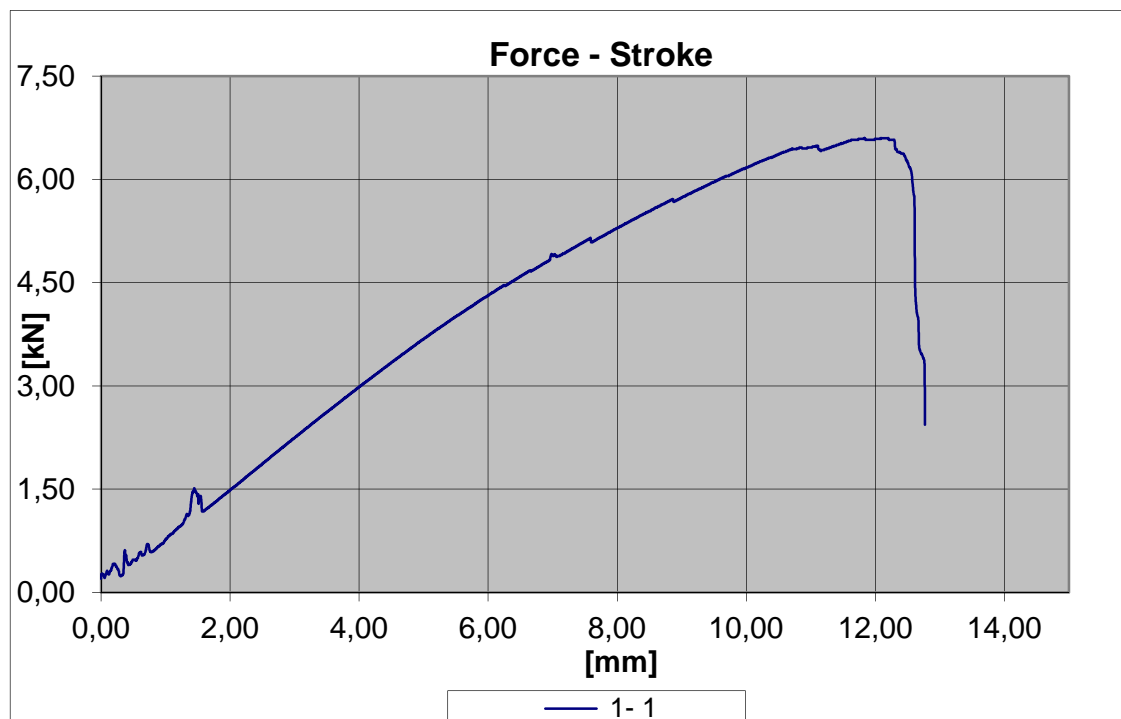


KUVA 12. Havainnekuva pull-out -efektistä /12/

Syitä kappaleiden välisiin eroihin eroihin kuitujen suuntautumisten lisäksi on muun muassa materiaalin sisältämät virheet, kuten huokokset, säröt ja lovet [11]. Toinen syy on vetokokeen ekstensiometrin hetkittäinen ”hyppiminen” vetokokekappaleessa. Vetokuormituksen kasvaessa materiaalin säröily aiheutti ekstensiometrin ”hyppimisen”, jolloin tuloksiin voi tulla pientä hetkittäistä heittoa. Todennäköisin syy ominaisuuksien vaihtelulle on katkokuitujen suuntautuminen. Niitä ei voi suunnata, joten tästä syystä ne ovat sijoittuneet satunnaisiin suuntiin, jolloin tekniset ominaisuudet vaihtelevat kappaleittain jonkin verran.

7.2 Kolmipistetaivutustesti

Kolmipistetaivutustestin tarkoituksena on selvittää rakenteen lujuusominaisuuksia ja hyödyntää niitä simulaatiovaiheessa. Testi on tehty standardin ASTM C393-00 mukaisesti. Testissä käytetty taivutusnopeus oli 5 mm/min. Alatukien välinä oli 450 millimetriä. Kuvassa 13 näkyy kolmipistetaivutuksen voima-venymä-käyrä millimetreinä ja liitteessä 4 käyrä jännityksen suhde venymäprosenttiin.



KUVA 13. Kolmipistetaivutuksen voima-venymä-käyrä

Kuvasta 13 käy ilmi, että voima-venymä-käyrä on edennyt melko tasaisesti. Testaus on aloitettu 200 Newtonista edeten lopulta lähelle 7000 Newtonia. Kappaleen taipuma on kasvanut sitä mukaa, kun voimakin on kasvanut. Käyrän alkupäässä esiintyy pientä epätasaisuutta, joka voi johtua valmistuksessa käytetyn pinnoitteen säröilystä. 5000 Newtonin kohdilla näkyy myös pientä heittoa, joka voi johtua laminaatin irtoamisesta polyuretaanista. Kappale murtui lopulta 6600 Newtonin kohdalla, jolloin taipuma oli 12,8 millimetriä.

TAULUKKO 3. Kappaleen mekaaniset ominaisuudet

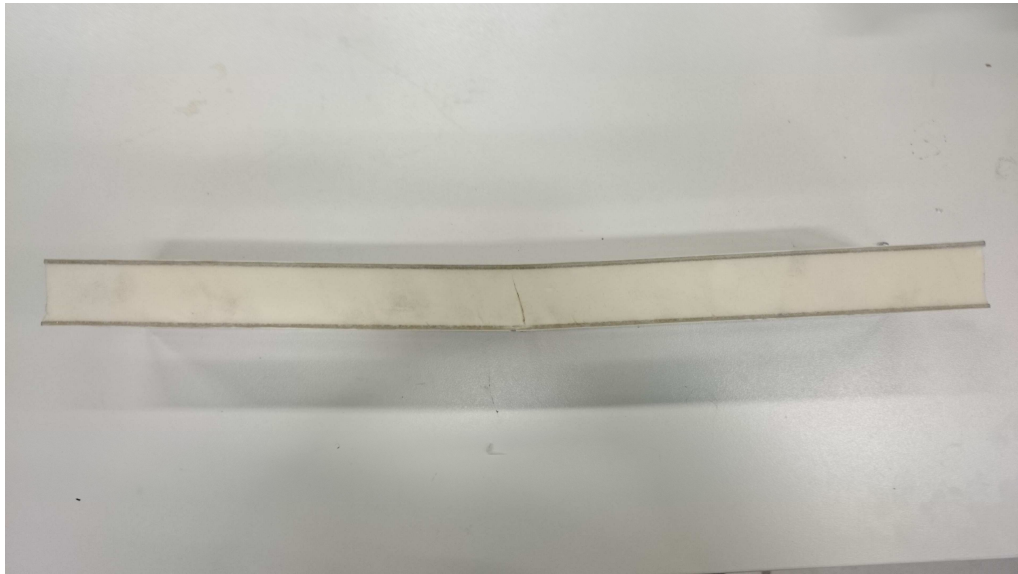
| Maks. voima (N) | Maks. poikkeama (mm) | Murtovenymä (%) | Ydinaineen leikkausjännitys (N/mm ²) | Laminaatin taivutusjännitys (N/mm ²) | Rakenteen taivutuslujuus (N/mm ²) |
|-----------------|----------------------|-----------------|--|--|---|
| 6600,0 | 12,8 | 1,3 | 0,81 | 52,34 | 26,89 |



KUVA 14. Testikappale kolmipistetaivutuksen jälkeen ylhäältä päin

Kappale murtui tukien puolestavälissä, kuten oli odotettu. Rakenteen murtuma tuli alemmalle laminaatilla, joka oli siitä jatkunut polyuretaaniin. Ylempi laminaatti oli kuitenkin kestänyt rasituksen. Tästä voi päätellä, että rakenne murtui vetojännityksen vuoksi, ei puristusjännityksen. Jos rakenteen murtuma olisi lähtenyt ylälaminaatista liikkeelle, silloin rakenne olisi murtunut puristusjännityksen vuoksi. Odotettua oli

myöskin se, että kappale oli testin jälkeen vähän käyrä, sillä se taipui siltä puolelta enemmän, missä ei ollut alumiinivahvikkeita.



KUVA 15. Testikappale kolmipistetaivutuksen jälkeen sivulta päin

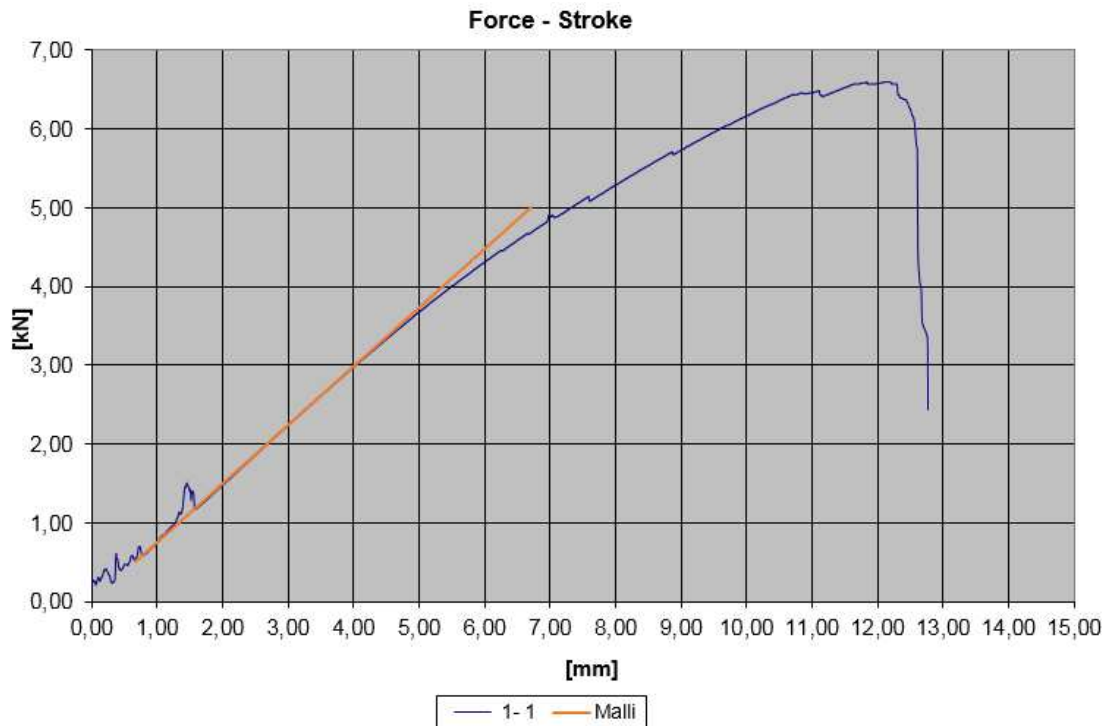
7.3 Simulaatiomallin vertailu ja tulos

Testien jälkeen seuraava vaihe opinnäytetyössä oli simulaatiomallin vertailu kolmipistetaivutustestin tulokseen. Tämän vaiheen tarkoituksena on osoittaa, että mallinnettu malli ovesta on todenmukainen ja materiaalien arvot vastaavat todellisia arvoja. Tämä vaihe on tärkeä, sillä jos malli osoittautuu epäluotettavaksi, sille ei voida tehdä uusia rakennevaihtoehtoja. Simuloituihin tuloksiin ei täten voitaisi luottaa.

Tätä vaihetta varten oli luotu SolidWorks-ohjelmaa käyttäen täysin samankaltainen malli ovesta, mitä oli käytetty kolmipistetaivutustestissä. Kun malli oli tehty, pyrittiin simuloimaan samalle mallille kolmipistetaivutus ja katsomaan, eroavatko simulaation ja oikean kokeen arvot toisistaan. Mitä vähemmän arvot poikkeavat toisistaan, sitä luotettavampana mallia voidaan pitää.

Malliin on syötetty polyuretaanille, alumiinille ja lasikuitulaminaatille oikeat kimmomoduularvot, jotta saatiin mahdollisimman tarkat arvot simulaatiosta. Tässä vaiheessa oli tärkeää, että vetokokeet lasikuitulaminaatille oli tehty, jotta saataisiin mahdollisimman tarkka kimmomoduularvo mallia varten.

Kuvassa 16 näkyy kolmipistetaivutustestin voiman ja taipuman välinen suhde ja simuloitujen testin tulokset. Mallille tehdyn testin käyrä on täysin samanlainen oikean testin kanssa noin 3000 Newtonin voimaan asti. Mallia voidaan pitää luotettavana kyseiseen voimaan asti, ja sille voidaan testata uusia rakennevaihtoehtoja.



KUVA 16. Mallin ja kolmipistetaivutustestin käyrien vertailu

Käyrien välinen poikkeama alkaa 3000 Newtonin kohdalla. Syy, miksi mallin käyrä on luotettava 3000 Newtoniin asti, johtuu ohjelmistosta ja oikean kappaleen rakenteesta. SolidWorksilla ei ole mahdollista simuloida täysin vastaavaa käyrää, kuin miten se oikeasti käyttäytyy. Sen antamat tulokset ovat lineaarisia, eli vaikka simulointi olisi tehty 6000 Newtonin voimalla, käyrä ei olisi notkahtanut vaan pysynyt suorana.

Poikkeama johtuu myös oikean kappaleen rakenteesta. 3000 Newtonin kohdalla polyuretaanivaahdotelevy alkoi murtumaan rakenteesta. SolidWorksilla simuloitessa ei ole mahdollista simuloida kappaleen hajoamista tai säröilyä, joten ohjelmisto ei ottanut näitä tekijöitä simulaatiossa huomioon.

TAULUKKO 4. Mallin ja kolmipistetaivutustestin arvojen vertailu

| Voima (N) | Testillä selvitetty taipuma (mm) | Simuloitu taipuma (mm) | Taipumien ero prosentteina (%) |
|-----------|----------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| 1500 | 2,0 | 2,0 | 0 |
| 3000 | 4,0 | 4,0 | 0 |
| 4500 | 6,35 | 6,0 | 5,8 |

Taulukko 4 havainnollistaa, mihin voimaan asti mallia voidaan pitää luotettavana. Vertailuvoimiksi on valittu 1500, 3000 ja 4500 Newtonia. 1500 ja 3000 Newtonin voimilla taipumilla ei ole yhtään eroa, mutta 4500 Newtonin kohdalla eroa on 0,31 millimetriä. Prosentteina eroa on noin 5. Taulukosta 5 voidaan täten päätellä, että mallia voidaan pitää luotettavana 3000 Newtoniin asti.

8 ERI KEHITYSVAIHTOEHDOT

Rakenteen pohjalta on suunniteltu ja mallinnettu neljä erilaista rakennevaihtoehtoa. Kaikista rakenteista on pyritty saamaan yksinkertaisempia ja helpompia valmistaa kuin nykyisin käytetty ratkaisu. Pinnanlaatuongelmaan on myös pyritty kehittämään toimiva ratkaisu. Vaihtoehdossa muuttuvina tekijöinä ovat olleet muun muassa alumiinilistojen profiilit, multiakksiaalidikankaiden määrä ja sijainti sekä polyuretaanivaahdon muotojen leikkaaminen. Rakenteissa on pidetty samat materiaalit.

Uusille vaihtoehtoisille rakenteille on tehty samanlainen kolmipistetaivutussimulaatio kuin alkuperäiselle mallille. Simuloiduissa malleissa on pyritty pitämään sama määrä elementtejä ja solmupisteitä. Taulukoissa 5 on listattu simuloituja taipumia eri vaihtoehdolle. Taulukossa 6 on vaihtoehtoisten rakenteiden taipumien erot mallista saatuihin taipumiin prosentteina. Taipumat 1, 2 ja 3 on simuloitu voimilla 1500 N, 3000 N ja 4500 N.

TAULUKKO 5. Taipumat eri vaihtoehdoille

| | Taipuma 1 (mm) | Taipuma 2 (mm) | Taipuma 3 (mm) |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Vaihtoehto 1 | 2,2 | 4,4 | 6,7 |
| Vaihtoehto 2 | 2,6 | 5,1 | 7,7 |
| Vaihtoehto 3 | 2,0 | 4,0 | 6,0 |
| Vaihtoehto 4 | 2,2 | 4,4 | 6,7 |

TAULUKKO 6. Vaihtoehtoisten rakenteiden taipumien erot mallin taipumiin prosentteina

| | Taipumien erot mallin arvoihin prosentteina | | |
|--------------|---|---------------|---------------|
| | Taipuma 1 (%) | Taipuma 2 (%) | Taipuma 3 (%) |
| Vaihtoehto 1 | 9,1 | 9,1 | 10,0 |
| Vaihtoehto 2 | 23,1 | 21,6 | 22,1 |
| Vaihtoehto 3 | 0 | 0 | 0 |
| Vaihtoehto 4 | 9,1 | 9,1 | 10,0 |

Vaihtoehdossa 1 on pyritty vähentämään multiakksiaalikulidun määrää ja vaihdettu sen sijaintia rakenteessa. Lisäksi siitä on poistettu alumiinia. Vaihtoehdossa 2 on vaihdettu alumiiniprofiilia. Vaihtoehdossa 3 on vähennetty alumiinin määrää ja muokattu polyuretaanivaahtoa. Vaihtoehdossa 4 on vähennetty myös alumiinin määrää ja vaihdettu multiakksiaalikulidun sijaintia.

Taulukosta 6 päätellen vaihtoehto 3 olisi paras. Sen taipumaprosentti on sama kuin mallin taipumilla. Vaihtoehdot 1 ja 4 taipuvat hieman enemmän. Toinen vaihtoehto karsitaan suoraan, sillä se taipuu liikaa.

9 TYÖN TULOS

Työssä oli kolme tavoitetta. Tärkein tavoite oli, että uusi rakenne poistaisi ovissa esiintyvän peilausongelman. Toinen tavoite oli, että uudella rakenteella olisi sama jäykkyys

kuin nykyisin käytetyllä rakenteella. Kolmas tavoite oli, että uusi rakenne mahdollisesti olisi helpompi valmistaa.

River Plast Oy päätyi vaihtoehtoon 3. Yrityksen toimitusjohtaja uskoo, että ratkaisu poistaa ovesta esiintyvän peilausongelman. Lisäksi simulaatiomallin mukaan uudessa rakenteessa olisi sama jäykkyys. Uusi ratkaisu olisi myös helpompi valmistaa, sillä alumiinia ei tarvittaisi niin paljoa kuin aikaisemmin.

Simulaatio antaa vain suuntaa sille, miten kappale käyttäytyisi eikä tuloksiin sen takia voi aina luottaa täysin. Sen takia yritys tekee vaihtoehdosta 3 oikean oven ja teettää uudelle ovelle mekaanisia testejä. Yritys neuvottelee lisäksi parhaillaan asiakkaittensa kanssa, voiko vaihtoehdossa esitetyn alumiinilistan heidän mielestään poistaa rakenteesta. Jos uusi rakenne poistaa peilausongelman, jäykkyys pysyy samana uusien testien mukaan ja uusi rakennevaihtoehto käy asiakkaille, yritys käyttää kyseistä rakennetta jatkossa.

10 POHDINTAA

Olen tyytyväinen opinnäytetyön tuloksiin. Sen lisäksi, että yritys voi soveltaa tuotteissaan uutta rakennetta, se sai myös samalla tietoa laminaattien ja entisen ovirakenteen lujuusominaisuuksista. Opinnäytetyön onnistumisen takana on ollut saumatonta kommunikointia River Plast Oy:n kanssa ja Mikkelin Ammattikorkeakoulun henkilökunta, jolta sain apua tarpeen tullen.

Opinnäytetyön tekemisessä oli runsaasti aikaa käytettävissä. Suurin osa tästä ajasta meni SolidWorksin simulaatio-osuuden opetteluun. Ohjelman simulaatio-osuutta ei ole opetettu koulussamme, mutta onneksi Internetistä löytyi paljon opastavia ohjeita.

Uusien ovirakenteiden suunnittelu vei myös hieman aikaa. Se oli haastavaa, sillä alkuperäistä rakennetta ei voinut hirveästi loppujen lopulta muuttaa niin, että se olisi silti ollut yksinkertaisempi ja samalla säilyttänyt saman jäykkyyden. Suunnittelun aikana minulle tuli idea jäykistää ovea alumiinin sijasta hiilikuidulla. Se olisi ratkaissut peilausongelman ja tehnyt valmistuksesta yksinkertaisempaa, sillä alumiinin työstöön ei

olisi tarvinnut enää käyttää aikaa. Tämä vaihtoehto olisi tullut kuitenkin hieman kalliimmaksi yritykselle ja ruuvien liitettävyys olisi ollut hankalampaa, joten idea hylättiin kokonaan.

Jos River Plast Oy haluaisi rakenteen mekaanisia ominaisuuksia paremmiksi, sillä olisi mielestäni kaksi vaihtoehtoa. Se voisi käyttää hieman painavampaa polyuretaanivaahtoa sandwich-rakenteessa. Toinen vaihtoehto olisi käyttää katkokuituisten lasikuitumattojen sijasta jatkuvakuituista lasikuitua, mitä käytetään osittain jo rakenteessa.

Olen yrityksen toiveesta välttänyt kertomasta kahta asiaa. Ensimmäkin, en ole kertonut oven valmistustavasta mitään. Injektiovakuumitekniikka on salassa pidetty valmistustapa, eikä siitä ole hirveästi Internetissäkään tietoa. Toisekseen, en ole opinnäytetyöhön laittanut kuvia enkä ole myöskään tarkasti kuvaillut oven alkuperäistä rakennetta. Olisin muuten kertonut näistä kahdesta asiasta tarkemmin ja laittanut myös kuvia, sillä uskon, että lukijalle olisi varmasti tullut siten parempi käsitys ovesta.

Itse opin opinnäytetyön aikana paljon. Opin paljon uutta lujitemuovituotteista ja pääsin tutustumaan uuteen valmistusmenetelmään. Sain myös tärkeää käytännön kokemusta testien tekemisestä ja opin analysoimaan paremmin testien tuloksia. Osaan lisäksi nyt käyttää SolidWorksia paremmin ja opettelin käyttämään sen simulaatio-osuutta. Kaiken kaikkiaan opinnäytetyö oli kiinnostava ja opettavainen prosessi.

LÄHTEET

- 1) Historia 2015. River Plast Oy. WWW-dokumentti. <http://www.riverplast.fi/yritys/historia/>. Ei päivitystietoa. Luettu 15.2.2015.
- 2) Komposiitit. 2014. Helsingin yliopisto. WWW-dokumentti. <http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/komposiitit/lukijalle.htm>. Ei päivitystietoa. Luettu 9.12.2014.
- 3) Saarela, Olli. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry. 2003.
- 4) Glass Fiber Reinforcements. 2014. Hexcel. WWW-dokumentti. <http://www.hexcel.com/products/aerospace/aglass-fiber>. Ei päivitystietoa. Luettu 10.12.2014.
- 5) Ominaisuudet. 2014. Pueristeet. WWW-dokumentti. <http://www.pueristeet.fi/pu-eristeet/pu-eristeen-edut/>. Ei päivitystietoa. Luettu 10.12.2014.
- 6) Hakkarainen, Tuula & Paloposki, Tuomas. 2014. Polyuretaanieristeiden sandwich-elementtien osallistuminen paloon. PDF-dokumentti. <http://www.spek.fi/loader.aspx?id=882744c4-79c8-47c3-88e6-e666618e0164>. Ei päivitystietoa. Luettu 10.12.2014.
- 7) Kurri, Veijo; Malén, Timo. Sandell, Risto. Virtanen, Matti. Muovitekniikan Perusteet. Helsinki: Opetushallitus Oy. 1991.
- 8) TUT 2014. Lujitemuovitekniikka eri aloilla. PDF-dokumentti. <https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/MAMK/MPDF/Testaus.pdf>. Päivitetty 11.12.2014. Luettu 18.3.2015.
- 9) C393-00. Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions. 1st edition. ASTM International.
- 10) Eskelinen, Harri. 2012. Konstruktioaerale. PDF-dokumentti. <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bk20a2100/luennot/komposiitit.pdf>. Päivitystietoja ei ole. Luettu 29.3.2015
- 11) Lepistö, Tapio 2012. Murtuminen, väsyminen, viruminen ja kuluminen. Luento Mikkelin Ammattikorkeakoulussa keväällä 2012. Moniste.
- 12) Pilling, John 2015. Origin of toughness in composites. WWW-dokumentti. <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/class9/class9b.html>. Päivitystietoa ei ole. Luettu 6.4.2015.
- 13) Lehtinen, Satu; Makkonen, Maarit 2004. Metallit – Alumiini. WWW-dokumentti. <http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/metallinkieratys/alumiini.htm>. Päivitetty 31.5.2004. Luettu 27.4.2015.
- 14) Kemppe, Markku 2013. Elementtimenetelmän perusteet. PDF-dokumentti. Päivitystietoja ei saatavilla. Luettu 27.4.2015.

Vetokoe 31.3.2015

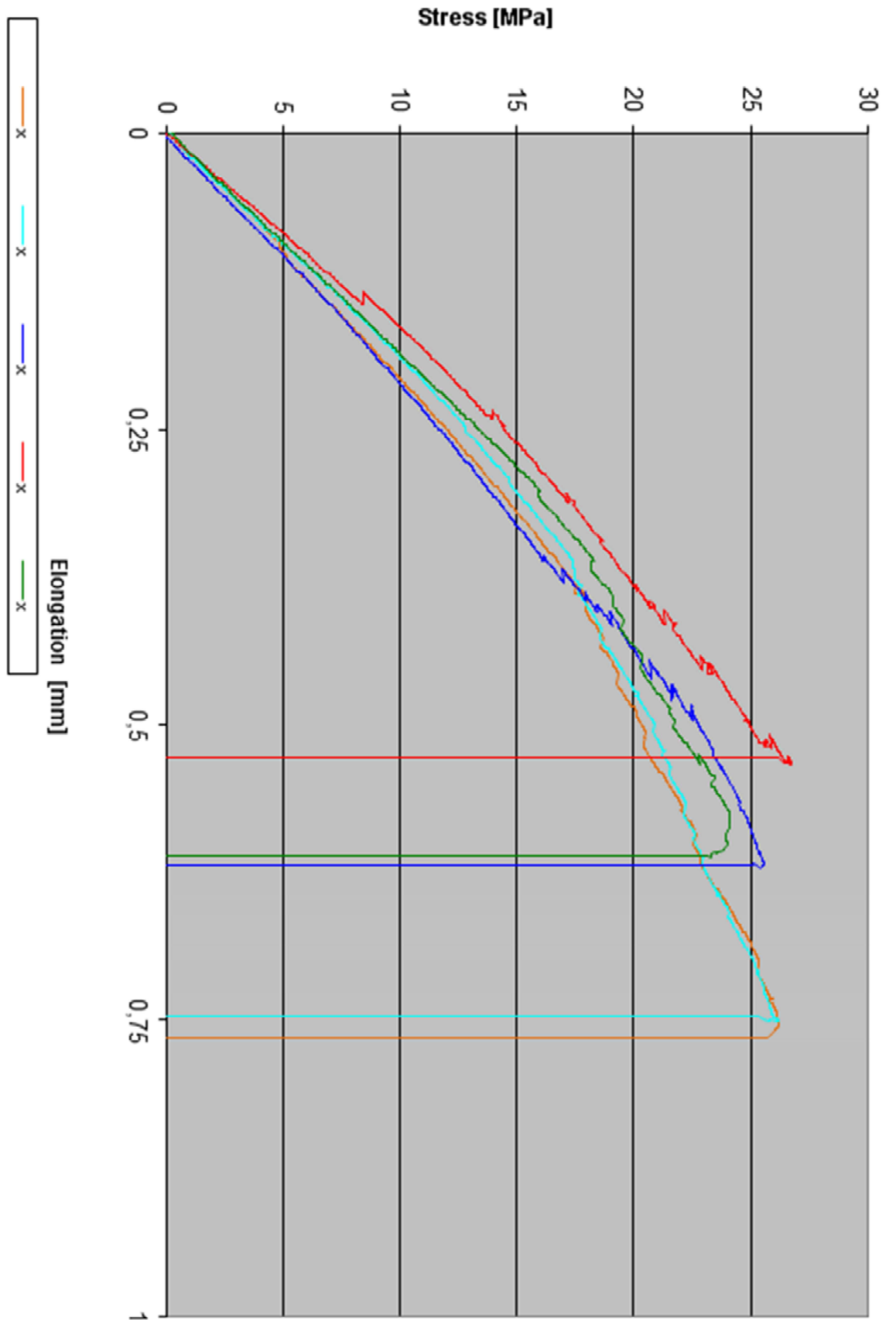
Date : 2015.03.31 Test Mode : Single
 Test Type : Tensile V1 : 2 mm/min

Shape: Plate

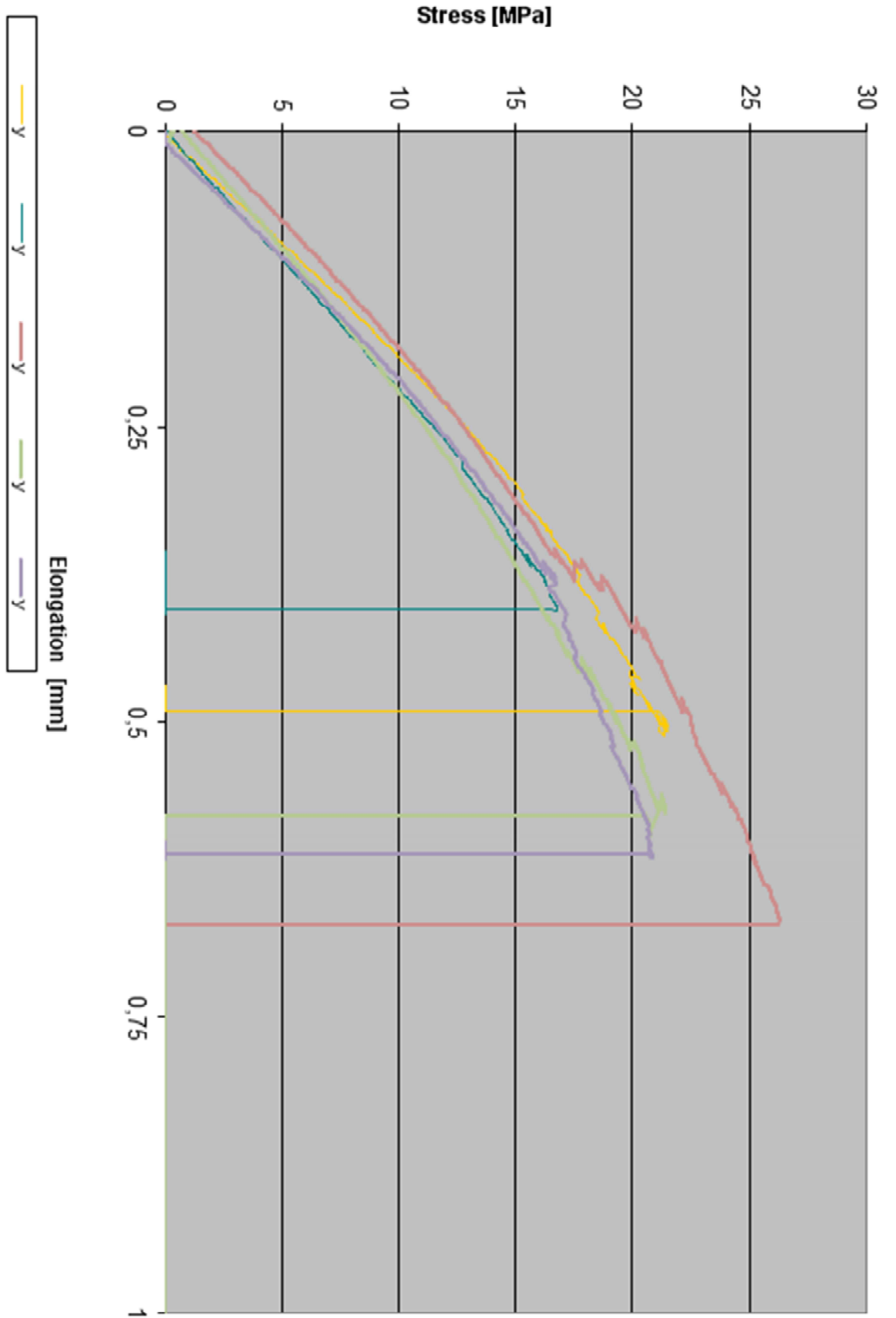
| | Thickness | Width | Gauge Length |
|-------|-----------|---------|--------------|
| Units | mm | mm | mm |
| x | 3.0000 | 20.0000 | 49.9670 |
| x | 3.0000 | 20.0000 | 49.9840 |
| x | 3.0000 | 20.0000 | 49.9580 |
| x | 3.0000 | 20.0000 | 49.8960 |
| x | 3.0000 | 20.0000 | 49.9500 |
| y | 3.0000 | 20.0000 | 49.5850 |
| y | 3.0000 | 20.0000 | 49.8740 |
| y | 3.0000 | 20.0000 | 49.8640 |
| y | 3.0000 | 20.0000 | 49.8700 |
| y | 3.0000 | 20.0000 | 49.8640 |

| Name | Elastic | Max Force | Max Stress | Max Strain |
|--------------------------|--------------|-----------|------------|------------|
| Parameter | 0.05, 0.25 % | | | |
| Units | N/mm2 | kN | N/mm2 | % |
| x | 5678.82 | 3.92500 | 65.4167 | 2.18100 |
| x | 6733.79 | 3.92500 | 65.4167 | 1.53500 |
| x | 6244.75 | 3.83750 | 63.9583 | 0.86100 |
| x | 7248.85 | 4.00000 | 66.6667 | 0.09400 |
| x | 6634.40 | 3.61250 | 60.2083 | 1.23300 |
| Mean | 6508.12 | 3.86000 | 64.3333 | 1.18080 |
| Standard Deviation | 585.802 | 0.14984 | 2.49742 | 0.77653 |
| Maximum | 7248.85 | 4.00000 | 66.6667 | 2.18100 |
| Minimum | 5678.82 | 3.61250 | 60.2083 | 0.09400 |
| y | 6706.88 | 3.20000 | 53.3333 | 0.55800 |
| y | 5819.38 | 2.51250 | 41.8750 | 0.80800 |
| y | 6117.83 | 3.93750 | 65.6250 | 1.29800 |
| y | 5383.61 | 3.20000 | 53.3333 | 0.70700 |
| y | 6483.62 | 3.12500 | 52.0833 | 1.22700 |
| Mean | 6102.26 | 3.19500 | 53.2500 | 0.91960 |
| Standard Deviation | 526.242 | 0.50549 | 8.42476 | 0.32638 |
| Maximum | 6706.88 | 3.93750 | 65.6250 | 1.29800 |
| Minimum | 5383.61 | 2.51250 | 41.8750 | 0.55800 |
| Total Mean | 6305.19 | 3.52750 | 58.7917 | 1.05020 |
| Total Standard Deviation | 566.880 | 0.49637 | 8.27283 | 0.57818 |
| Total Maximum | 7248.85 | 4.00000 | 66.6667 | 2.18100 |
| Total Minimum | 5383.61 | 2.51250 | 41.8750 | 0.09400 |

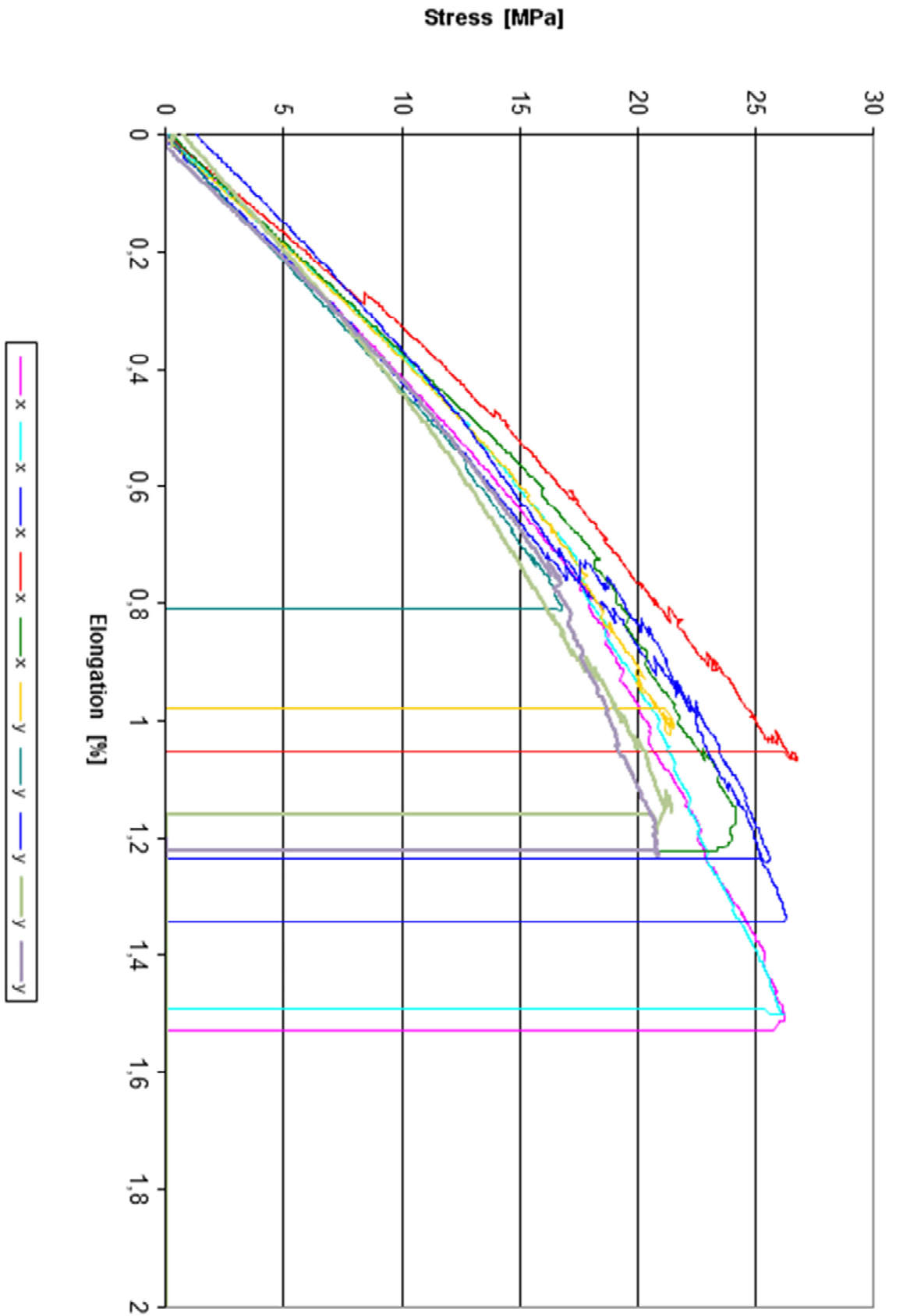
LIITE 2(2)
Vetosauvojen venymät millimetreinä



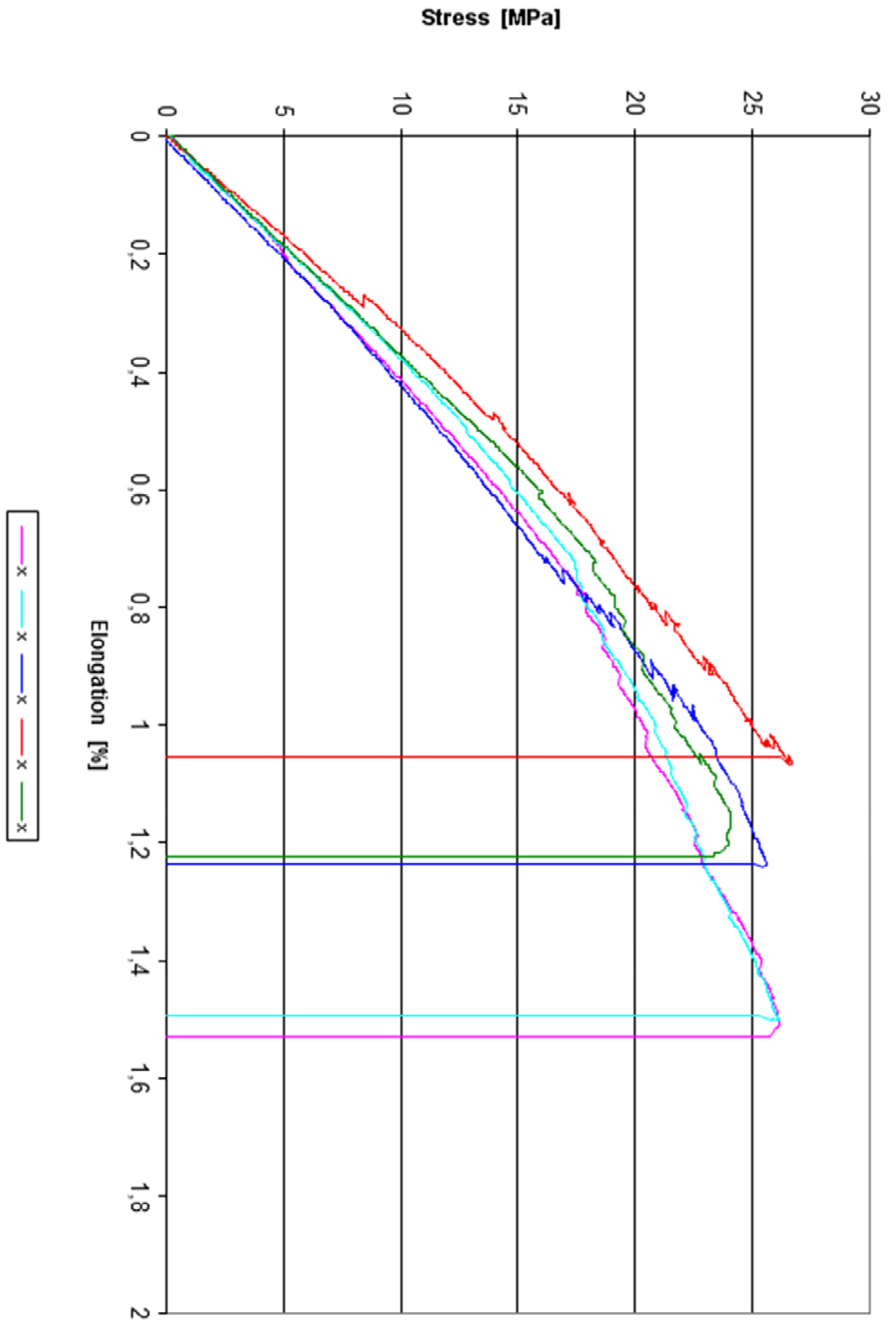
LIITE 2(3)
Vetosauvojen venymät millimetreinä



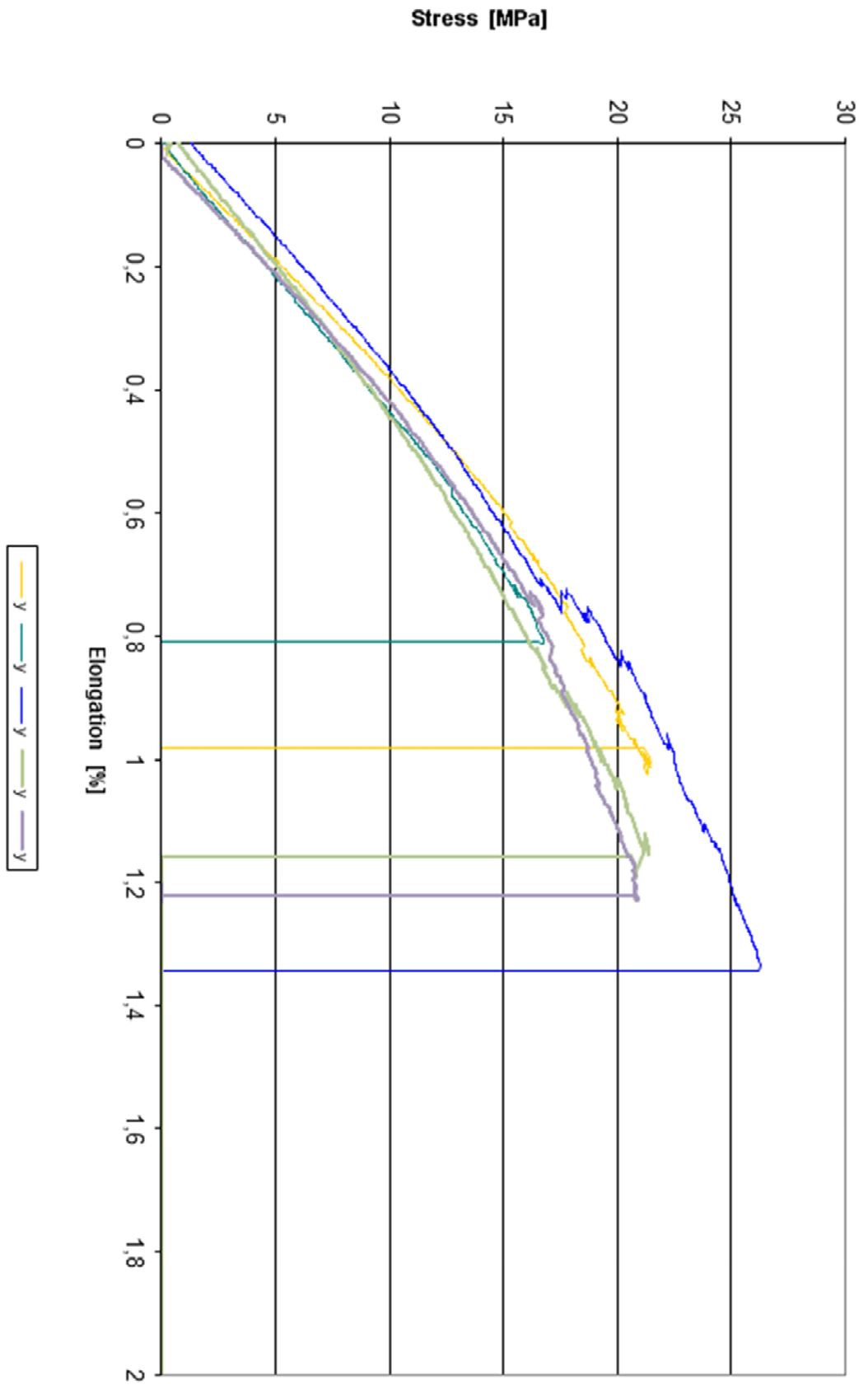
LIITE 3(1)
Vetosauvojen venymät prosentteina



LIITE 3(2)
Vetosauvojen venymät prosentteina



LIITE 3(3)
Vetosauvojen venymät prosentteina



3p-taivutus

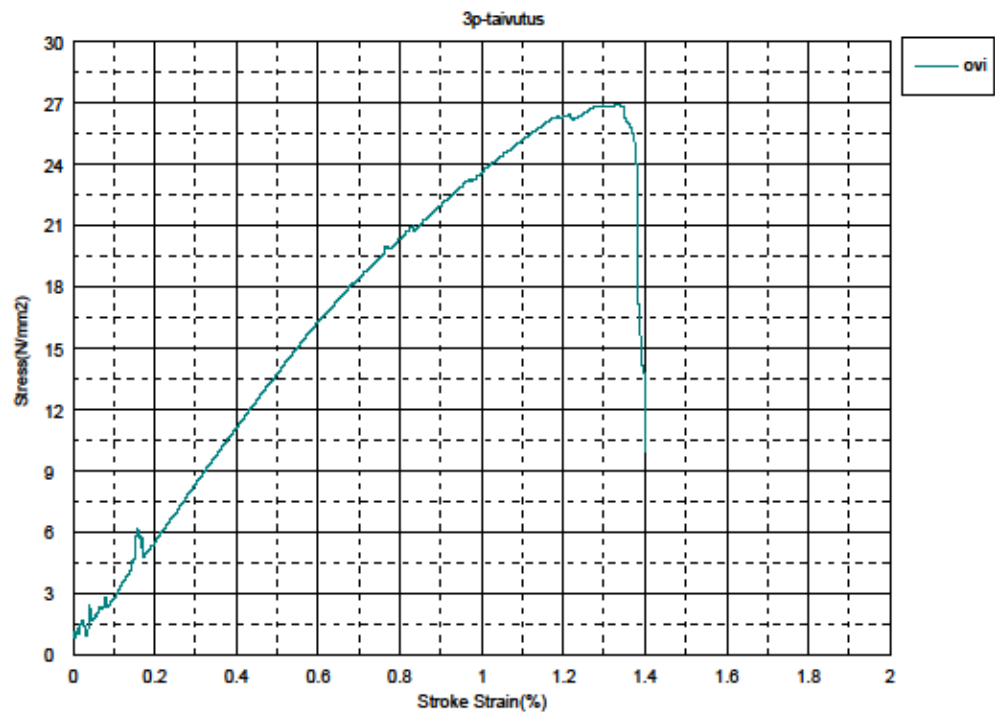
Date : 2015.03.31
Control : Stroke

V1 : 5 mm/min
File Name : 060831

Shape: Plate

| | Thickness | Width | Lower Support |
|-------|-----------|----------|---------------|
| Units | mm | mm | mm |
| ovi | 37.0000 | 121.0000 | 450.0000 |

| Name | Elastic | Max Stress | Max Strain |
|-----------|------------|------------|------------|
| Parameter | 0.1, 0.3 % | | |
| Units | N/mm2 | N/mm2 | % |
| ovi | 2534.23 | 26.8942 | 1.31715 |



Comment

LIITE 5

Kuva simulaatiomallista

Model name: testi
Study name: Static 1(-Default)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 25,0667

