



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

3D-TULOSTIMEN MENETELMÄTUTKIMUS

Sonia Laaksonen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2016
Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka
Älykkäät koneet



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvo- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma
Älykkäät koneet

LAAKSONEN SONIA:
3D-tulostimen menetelmätutkimus

Opinnäytetyö 77 sivua, joista liitteitä 20 sivua
Toukokuu 2016

Tämän opinnäytetyön tilaajana on 3D-Boosti -hanke, joka on Pirkanmaan liiton osittain rahoittama TTY:n, TAMK:n ja SASKYN yhteinen 3D-tulostustoimintaa kehittävä hanke. Tampereen ammattikorkeakoulun konetekniikan laboratoriotiloihin on hankittu Stratasys Objet350 Connex3 3D-tulostin, jonka nestemäistä materiaalia suihkuttava valmistusmenetelmä ja tekniikan mahdollisuudet toivat tarpeen tehdä laitteelle menetelmätutkimusta. Tutkimustulosten perusteella työn on tarkoitus antaa tietoa tulostettavien kappaleiden suunnitteluun.

Menetelmätutkimus keskittyy tulosteiden tarkkuuksiin sekä tekniikan mahdollistavan kumimaisen materiaalin ominaisuuksiin ja mahdollisuuksiin. Tulosteiden toleransseja tutkittiin tekemällä mittauksia kahdenmuotoisille testikappaleille ja samalla tulostusmenetelmän tarkkuutta verrattiin eri tulostustekniikalla valmistettuihin mittapaloihin. Kumimaista materiaalia tutkittiin testaamalla sen kiinnittymistä ja käyttäytymistä liitoskohdissa vetokokeiden avulla. Kumimateriaalin ominaisuuksia tutkittiin myös tarkastelemalla robottikäden tarttujaan liitettävien kappaleiden mahdollisuuksia.

Tutkimusten avulla saatiin selville tulostustarkkuuden olevan riippuvainen liikesuunnasta ja työalustalle asettelun havaittiin vaikuttavan mittoihin. Selvitetyt tavoitemitan prosentuaaliset muutokset ovat kahdessa kolmesta liikesuunnassa valmistajan ilmoittaman tarkkuusalueen $\pm 0,02 - 0,085$ mm sisäpuolella. Vertailu toiseen tulostustekniikkaan osoitti tekniikan olevan osin tarkempi ja osittain epätarkempi liikesuunnasta riippuen. Käytännön testien avulla saatiin selvitettyä kumimaisen materiaalin murtuvan eri tavalla eri liitostyypeillä, mutta kestävyys löytyi yhdistävä tekijä pinnanviimeistelyn ominaisuuksista. Kumimateriaalin pinnanviimeistelyn todettiin mahdollisesti vaikuttavan myös rasi-
tusta vaativien kappaleiden käyttäytymiseen.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Automobile and Transport Engineering
Intelligent Machines

LAAKSONEN SONIA:
Method Study of a 3D Printer

Bachelor's thesis 77 pages, appendices 20 pages
May 2016

This thesis was commissioned by the “3D Boost” project which is partly funded by the Council of Tampere Region. The Mechanical Engineering unit of Tampere University of Applied Sciences has acquired a Stratasys Objet350 Connex3 3D printer into the teaching laboratory facilities. The assignment was to perform a method study for the liquid material jetting technology based machine. The aim of this thesis is to gather and provide information for part designing.

This study concentrates to the accuracy measurements of printed parts and rubber-like building material's properties and possibilities. The dimensional accuracy was investigated with two kind of test parts and measurements were compared to manufacturer's tolerances. Accuracy of the parts were also compared to test parts made with another printing technique. Behavior of the rubber-like material and its adhesiveness in different joint styles were tested with tensile tests. Rubber-like material's properties and endurance were examined with parts that will be combined to a gripper of a robot arm.

By means of the method study the printing accuracy was figured out to be dependent on the direction of motion and part positioning to the building tray. Percentual changes of measurements were inside manufacturer's tolerance area $\pm 0,02 - 0,085$ mm in two out of three direction. Comparison of the test results to another printing technique indicated that the tested material jetting printer is partly superior and partly not depending on the tested direction. With the help of practical tests the behavior and breaking manners of joints made with the rubber-like material were clarified to be dependent on the shape of the joint. Rubber-like material's tests also revealed a connective weakness on the surface finishing which also clarified its suitability to stress demanding destinations.

Key words: 3D printing, material jetting, study

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	POLYJET -TULOSTUSTEKNIikka	6
3	TUTKIMUKSEN KOHDE	8
3.1	Stratasys Objet350 Connex3.....	8
3.2	Menetelmätutkimukset.....	12
4	TOLERANSSIMITTAUKSET.....	13
4.1	Tutkimusmenetelmät	13
4.2	Objet350: 50 x 40 x 10 mm testikappaleiden tulokset.....	15
4.2.1	X-suunta	16
4.2.2	Y-suunta	18
4.2.3	Z-suunta.....	19
4.3	Objet350: D50 x 10 mm testikappaleiden tulokset.....	21
4.3.1	D-suunta	22
4.3.2	Z-suunta.....	23
4.4	Vertailu FDM-tulostustekniikkaan: Fortus 250mc	25
4.4.1	50 x 40 x 10 mm testikappaleet	26
4.4.2	D50 x 10 mm testikappaleet.....	32
4.5	Virhetarkastelu.....	35
5	KUMIMAINEN MATERIAALI	36
5.1	Vetokoe eri liitoksilla.....	36
5.1.1	Päittäisliitos	36
5.1.2	Vinoliitos.....	40
5.1.3	Sormiliitos	42
5.1.4	Liitostyyppien vertailu	43
5.2	Virhetarkastelu.....	47
5.3	Sovelluskokeilu.....	49
5.3.1	Alkutilanne.....	49
5.3.2	Kumityynyillä suojattu kappale	50
5.3.3	Toimivuuden arviointi.....	52
6	YHTEENVETO JA POHDINTA	54
	LÄHTEET.....	57
	LIITTEET	58
	Liite 1. 50 x 40 x 10 mm testikappaleiden mittaustulokset (Objet350)	58
	Liite 2. 50 x 40 x 10 mm testikappaleiden mittaustulokset (Fortus 250mc) ...	65
	Liite 3. D50 x 10 mm testikappaleiden mittaustulokset (Objet & Fortus)	72

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia Tampereen ammattikorkeakoulun konetekniikan laboratoriotiloihin hankitun 3D-tulostimen valmistusmenetelmän ominaisuuksia. Tulosten raportoinnin tarkoituksena on antaa tietoa tulosteiden mittojen suunnittelua ja materiaalivalintoja varten. Tutkimuksen kohteena on Stratasys Objet350 Connex3 3D-tulostin, joka on koulun ensimmäinen materiaalin suihkutukseen perustuva kolmiulotteisia kappaleita valmistava tulostin. Tutkimuksen aihealueet valikoituivat tarpeista selvittää tulosteiden tarkkuutta sekä kumimaisten materiaaliseosten käyttäytymistä.

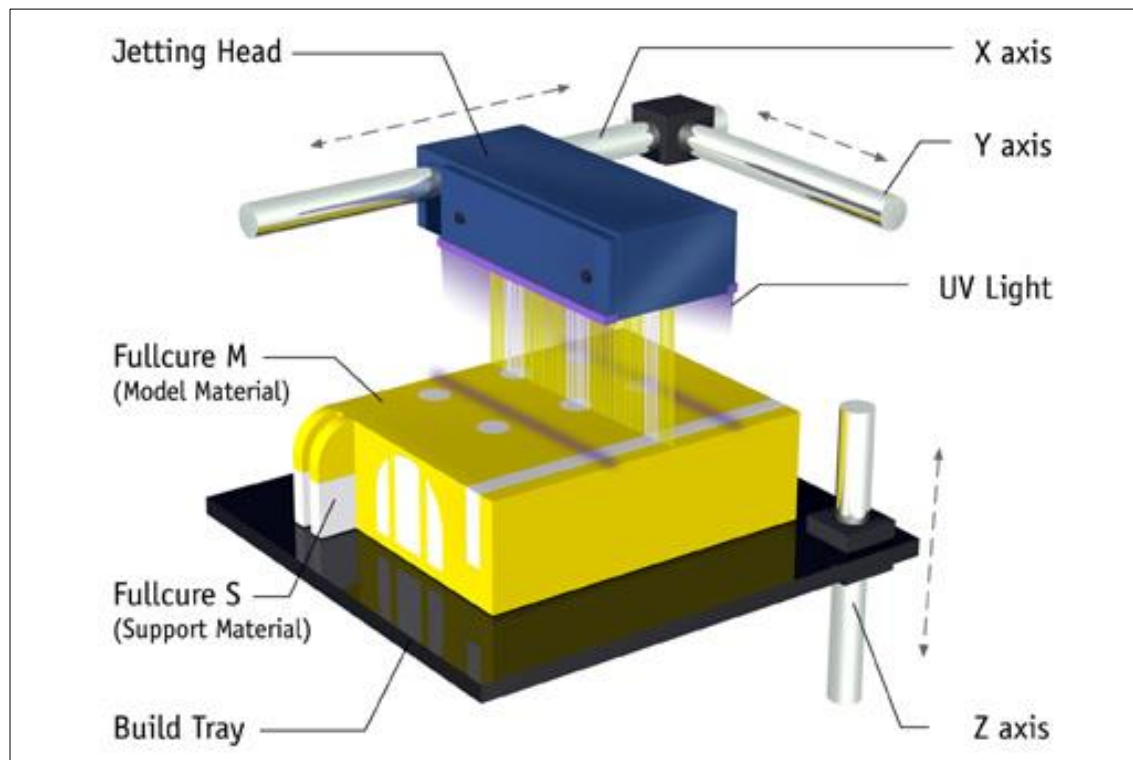
Tulosteiden ulkomittoja tutkittiin kahdenmuotoisten mittapalojen avulla, jotta saadaan selvyys laitteen todellisesta tulostustarkkuudesta. Tutkimuksen avulla haluttiin selvittää miten lähellä saadut mitat ovat valmistajan ilmoittamia toleransseja ja kuinka eri liikesuunnat ja työalustalle asettelu vaikuttavat mittoihin. Tulostustekniikan suorituskykyä haluttiin selvittää vertaamalla tuloksia myös perinteisemmällä, materiaalin pursotukseen perustuvalla tulostustekniikalla tehtyihin mittapaloihin.

Yhtenä tekniikan mahdollistavana materiaalina on kumimainen tulostemateriaali, jota voidaan valmistaa monella eri sekoitussuhteella. Kokeiden avulla haluttiin selvittää, miten kumimateriaali katkeaa eri liitostyyppien vaikutuksesta ja miten seossuhteet vaikuttavat käyttäytymiseen. Kumimateriaalin soveltuvuutta ja kestokykyä rasitusta vaativaan kohteeseen tarkasteltiin sovellustestiä varten tulostettujen kappaleiden avulla.

2 POLYJET -TULOSTUSTEKNIikka

Materiaalia lisäävän tekniikan kehittyessä kolmiulotteisten kappaleiden valmistusmenetelmiä on keksitty useita erilaisia, jotka vaihtelevat materiaalin pursottamisesta sulatukseen ja suihkutukseen. Tässä opinnäytetyössä keskitytään tutkittavan tulostimen toimintaan perustuvaan Polyjet -tulostustekniikkaan.

Polyjet -tulostustekniikka on yksi materiaalin suihkutukseen perustuvista valmistusmenetelmistä. Laitteen tulostuspää suihkuttaa mustesuihkutulostinta vastaavalla tekniikalla työalustalle ohuen kerroksen ns. nestemäistä muovia, joka kovetetaan muotoonsa UV-valon avulla. Tulostuspäässä on useita suuttimia, jotka mahdollistavat eri materiaalien tulostuksen samaan aikaan. Kuvassa 1 on esiteltynä tulostuksen toimintaperiaate. (Gibson ym. 2010, 171; Capinc 2016a).



KUVA 1. Polyjet -tulostustekniikan toimintaperiaate (3D Additive Fabrication, 2014)

Kappaleen valmistus aloitetaan suihkuttamalla kappaleen alle tukimateriaalia, johon itse valmistusmateriaalin ensimmäinen kerros saadaan tarttumaan. Pehmeää ja vesiliukoista tai liuotettavaa tukimateriaalia lisätään myös kappaleen muodosta tai pinnan viimeistelyä riippuen tarvittaviin kohtiin. Tulostettavat kappaleet valmistuvat kerros kerrallaan,

mikä tekee valmistusprosessista suhteellisen nopean. Kaikki kuvassa 1 näkyvän x-liikeakselin suihkutusalueelle mahtuvat kappaleet rakennetaan samalla kertaa, joten usean kappaleen teko tässä suunnassa ei kasvata tulostusaikaa merkittävästi. Tulosteiden koosta tai asettelusta riippuen tulostuspää liikkuu y-liikeakselia pitkin tarvittavan määrän ja kerroksen vaihtuessa z-akseli liikkuu alaspäin.

Suihkutettava rakennusmateriaali muodostuu fotopolymeereistä eli kemiallisin sidoksin toisiinsa liittyneistä molekyyleistä, jotka kovettuvat UV-valon vaikutuksesta. Laitteen käyttämän materiaalin nestemäinen olomuoto mahdollistaa kemialliselta koostumukseltaan erilaisten polymeeriseosten käytön. Usean suuttimen avulla materiaaleja on mahdollista suihkuttaa erikseen saman osakokoonpanon komponentteihin ja eri materiaaleja voi tulostettaessa myös sekoittaa toisiinsa eri sekoitussuhteilla, jolloin käytettävissä on ns. digitaalisia materiaaleja. Näiden ominaisuuksien ansiosta tulostettaviin kappaleisiin saadaan useita materiaali- sekä väri vaihtoehtoja. (Höök 2014, 1, 9; Stratasys 2016b.)

Alla olevassa kuvassa 2 on esimerkkejä kappaleista, joissa on yhdistelty värejä ja materiaaleja samaan kokoonpanoon. Ylempi kappale on kumimaista materiaalia, jossa teksti on tehty eri sekoitussuhteella kuin alusta. Alempi kappale on valmistettu kovasta materiaalista usealla eri värillä.



KUVA 2. Polyjet -tulostustekniikalla valmistettuja avaimenperiä (Laaksonen 2016)

3 TUTKIMUKSEN KOHDE

3.1 Stratasys Objet350 Connex3

Menetelmätutkimuksen kohteena on Tampereen ammattikorkeakouluun hankittu Stratasys Objet350 Connex3 3D-tulostin. Tulostin kuuluu materiaalin suihkutukseen perustuvan Polyjet -toimintamenetelmänsä perusteella valmistajan Objet -sarjaan ja usean materiaalin sekä värin tulostuskyvyn perusteella Connex3 -tuotantoryhmään. Kyseisiä laitteita valmistetaan kahdella eri työalustan koolla: 350 mm tai 500 mm, ja kyseinen laite on nimensä mukaisesti 350 mm työalustalla. (Stratasys 2016a, 2016b.)

Alla olevassa kuvassa 3 on esiteltyä laite kokonaisuudessaan. Kuvassa oikealla on materiaalikaappi, jossa on tilaa yhteensä kahdeksalle materiaalisäiliölle.



KUVA 3. Stratasys Objet350 3D-tulostin (Laaksonen 2016)

Alla olevassa taulukossa 1 on esiteltyä tulostimen tekniset tiedot, sisältäen mahdolliset materiaalivaihtoehdot sekä laitteen ominaisuuksia.

TAULUKKO 1. Stratasys Objet350 Connex3 tekniset tiedot (Stratasys 2016a, muokattu)

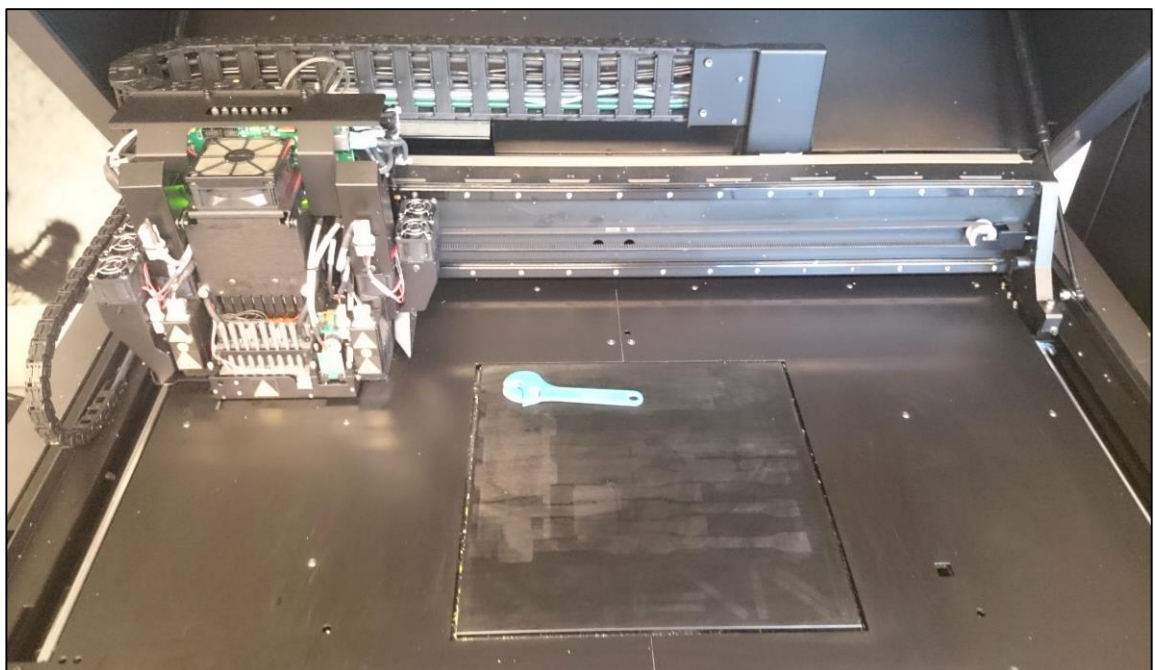
Rakennusmateriaalit	<ul style="list-style-type: none"> • Kova läpinäkymätön (Rigid Opaque) : ”Vero” • Kumimainen (Rubber-like) : ”Tango” • Kova läpinäkyvä (Transparent) • Kestomuovia jäljittelevä (Simulated polypropylene) • Korkeaa lämpötilaa kestävä (High Temperature) • Bio-yhteensopiva (Bio-compatible)
Digitaaliset materiaalit	<ul style="list-style-type: none"> • Digitaalinen ABS • Satoja värejä läpinäkymättömänä sekä läpikuultavana • Kumimainen materiaali eri sekoitussuhteilla • Korkeaa lämpötilaa kestäviä polypropeenisekoituksia
Materiaalivaihtoehdot	Yli 1000
Tukimateriaalit	Vedellä irtoava (SUP705) tai liuotettava (SUP706)
Tulostusalue (X,Y,Z)	342 x 342 x 200 mm
Koko ja paino	1400 x 1260 x 1100 mm; 430 kg (Materiaalikaappi: 330 x 1170 x 640 mm; 76 kg)
Resoluutio	<ul style="list-style-type: none"> • X- ja Y-akseli: 600 dpi • Z-akseli: 1600 dpi
Tarkkuus	<ul style="list-style-type: none"> • $\pm 0,02 - 0,085$ mm (alle 50 mm kappaleilla) • $\pm 0,2$ mm täyden koon kappaleilla
Ohjelmistot	<ul style="list-style-type: none"> • Objet Studio (Käyttöjärjestelmä) • Stratasys Creative Colors Software (Lisäosa värien muokkaamiseen)
Min kerrospaksuus	0,016 mm
Yhteensopivuus	Windows 7/ Windows 8
Liitettävyys	LAN – TCP/IP
Käyttöolosuhteet	Lämpötila 18 – 25 °C; suhteellinen ilmankosteus 30 – 70 %

Kuten taulukon 1 teknisistä tiedoista nähdään, tulostustekniikan ansiosta laitteella on mahdollista tulostaa yli 1000 erilaista materiaalivaihtoehtoa. Tässä menetelmätutkimuksessa keskitytään kovan läpinäkymättömän sekä kumimaisen materiaalin tutkimiseen,

mutta näiden lisäksi mahdollisia rakennusmateriaaleja ja digitaalisia sekoituksia on ominaisuuksiltaan useita erilaisia. Esimerkiksi simuloitu polypropeeni on materiaali, jolla saadaan tulostettua lujia ja samalla taipuisia sekä kestäviä kappaleita. Materiaali jäljittelee polypropeenia eli kestumuovia, josta esimerkiksi muoviämpärit on valmistettu. Toinen erikoisempi rakennusmateriaali on lääketieteen prototyyppiä varten kehitetty ja testattu bio-yhteensopiva materiaali. Valmistajan mukaan tästä materiaalista voi tehdä esimerkiksi pitkä-aikaista ihokosketusta vaativia lääketieteellisiä prototyyppiä. Yhtenä materiaalina on vielä korkeaa lämpötilaa kestävä materiaali, joka on kehitetty jäljittelemään teknisen muovin termisiä ominaisuuksia. Heti tulostuksen jälkeen materiaali kestää 63 – 67 °C lämpötilaa ja uunissa tehtävän jälkikäsittelyn avulla lämmönkestokyky on 75 – 80 °C. (Stratasys 2016b.)

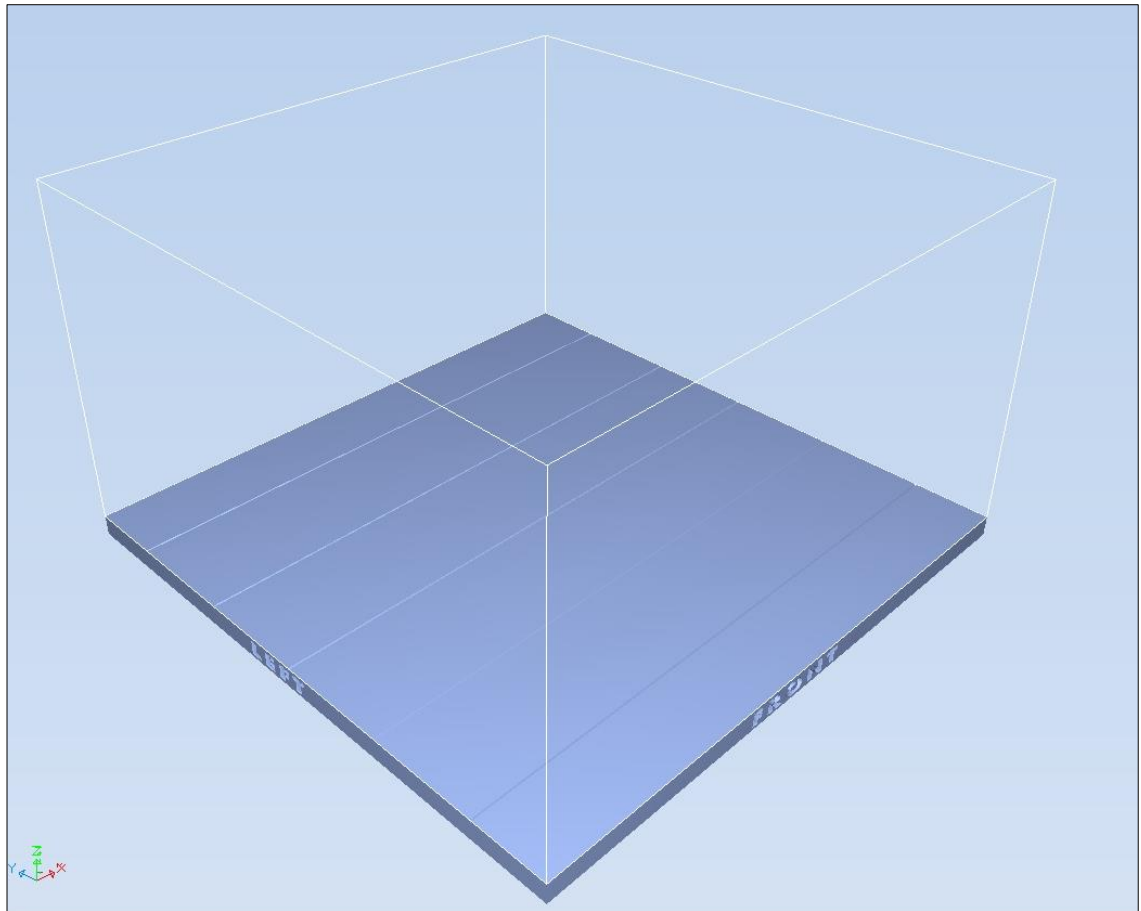
Valmistajan lupaama tulostustarkkuus on alle 50 mm kokoisille kappaleille $\pm 0,02 - 0,085$ mm ja tätä suuremmilla kappaleilla luvataan $\pm 0,2$ mm tarkkuutta. Valmistajan mukaan tarkkuus voidaan luvata vain koville materiaaleille ja se riippuu tulostettavan kappaleen geometriasta, asetetuista parametreista sekä asettelusta työalustalle (Stratasys 2016a).

Tulostusalueen koko on x- ja y-suunnassa maksimissaan 342 mm resoluutiolla 600 dpi. Laitteen z-suunnassa tulostusvaraa on 200 mm ja ohuen kerrospaksuuden ansiosta resoluutio on 1600 dpi (taulukko 1). Työstöalueen rakenne on esiteltyä kuvassa 4, mistä nähdään laitteen työalusta sekä tulostuspää liikeakseleineen.



KUVA 4. Työstöalueen rakenne (Laaksonen 2016)

Laitteen tulostuspää liikkuu x-suunnassa edestakaisin suihkuttaen ja kovettaen materiaalia kerros kerrokselta pienimmillään 0,016 mm kerrospaksuudella (taulukko 1). Koska materiaalia pystytään suihkuttamaan optimaalisesti vain tietylle etäisyydelle, työalusta on y-suunnastaan jaettu tulostuspään kokoisiin alueisiin, jotka näkyvät kuvassa 5. Tulostuspää liikkuu y-suunnassa kaistale kerrallaan ja jos tulostettava kappale ylittää nämä alue-rajat, tulostus tapahtuu kahdessa työvaiheessa. Yhdelle kaistaleelle mahtuessaan kappale tulostetaan yhdessä työvaiheessa.



KUVA 5. Objet350:n työalue (Laaksonen 2016)

Tulostuksen yhtenä ominaisuutena on vielä kappaleiden ulkopintojen viimeistelyvaihtoehtojen valinta. Kappaleen alareuna sekä muut tukimateriaalia tarvitsevat kohdat tulostuvat aina mattapintaisina, mutta kappaleiden muille pinnoille on mahdollista valita tehdäänkö ulkopinnasta kiiltävä vai mattapintainen. Kiiltävä viimeistelypinta on UV-valon kovettama materiaalikerros ja tukimateriaalin avulla tehty mattaviimeistely jättää kappaleen pinnasta huokoisen.

3.2 Menetelmätutkimukset

Laitteen tulostusmenetelmä sekä tekniikan mahdollistavat ominaisuudet toivat tarpeen tehdä tulostimelle menetelmätutkimusta eri aihealueilla. Tarkoituksena on kartoittaa hankitun laitteen suorituskykyä sekä tulostusmateriaalien ominaisuuksia.

Tulosteiden todellisten ulkomittojen tarkkuutta tutkittiin tulostamalla kahdenlaisia mittapaloja, joille tehtiin tarkkuusmittauksia koordinaatiomittauslaitteella. Koska työalusta on jaettu kuvan 5 mukaisiin alueisiin, samalla tutkittiin kahdessa työvaiheessa valmistamisen vaikutusta ulkomittoihin. Saatuja tuloksia vertaillaan toisiinsa ja valmistajan lupamaan alle 50 mm kappaleille ilmoitettuun tarkkuusalueeseen. Vastaavanmuotoisia mittapaloja valmistettiin myös eri tulostustekniikkaa käyttävällä tulostimella, jotta eri menetelmien tarkkuutta voidaan vertailla toisiinsa.

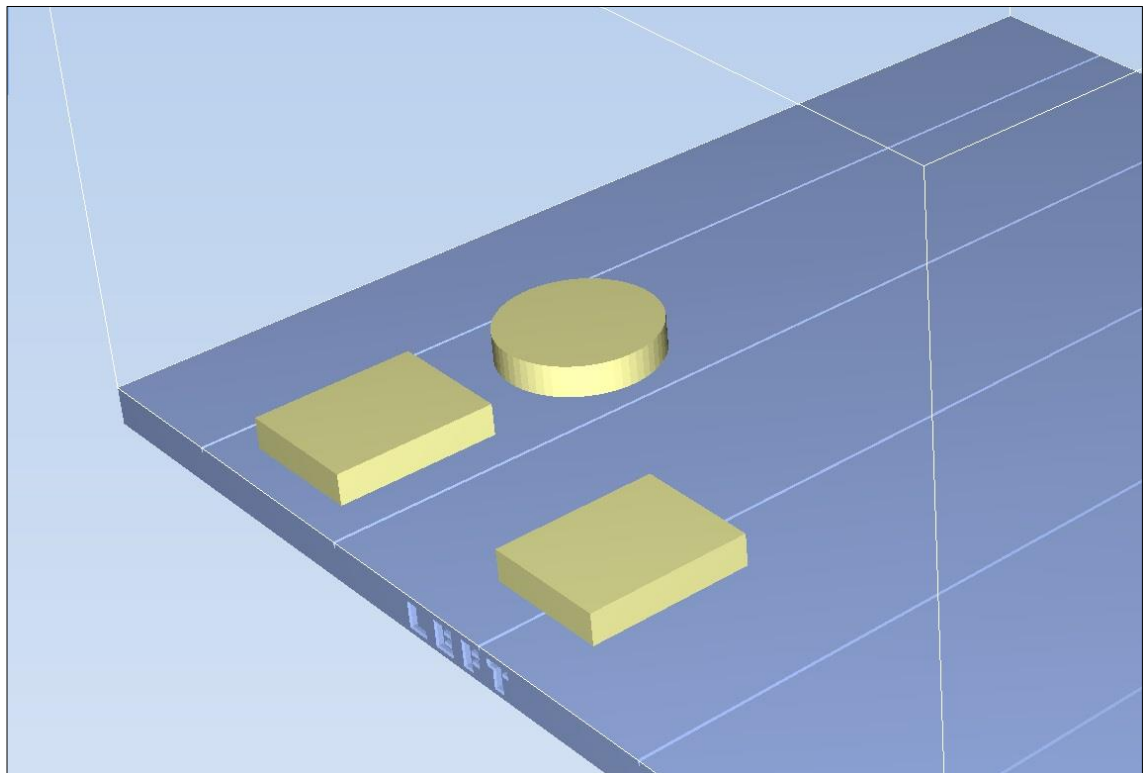
Kumimaista materiaalia ja sen kiinnittymistä kovaan materiaaliin tutkittiin vetokokeiden avulla, joista saatujen tulosten perusteella arvioitiin myös kumin mahdollista käyttäytymistä sovellustestissä. Vetokokeita tehtiin kahden materiaalin kokoonpanoista tehdyillä vetosauvoilla, joiden liitostavat ovat erilaisia. Liitosten toimivuutta sekä murtumiskohtia verrataan toisiinsa ja selvitetään materiaalien käyttäytymistä yhden suunnan vetorasituksessa. Kumimateriaalin soveltuvuutta eri suuntien rasitusta vaativaan kohteeseen arvioitiin robottikäden tarttujaa varten suunnitellun kappaleen kumiosien avulla.

4 TOLERANSSIMITTTAUKSET

4.1 Tutkimusmenetelmät

Objet350:n tulosteiden ulkomittojen tarkkuutta tutkittiin yhteensä 21 testikappaleen avulla, joista 16 on suorakaiteen muotoisia ja loput viisi ympyrämäisiä. Kappaleet ovat kooltaan 50 x 40 x 10 mm sekä D50 x 10 mm ja tulostemateriaalina on kova läpinäkymätön materiaali. Kaikki tutkittavat kappaleet valmistettiin samoilla asetuksilla ja samalla tulostuskerralla.

Tulostusalueen vaikutusta mittoihin tutkittiin asettamalla puolet suorakaiteen muotoisista testikappaleista tulostusalueiden väliin, jolloin tulostus tapahtuu kahdessa työvaiheessa. Loput suorakaiteista sekä pyöreät kappaleet valmistettiin yhdessä työvaiheessa. Kuvassa 6 on esimerkit mittapalojen asettelusta tulostimen työalustalle.



KUVA 6. Esimerkit testikappaleiden asettelusta työalustalle (Laaksonen 2016)

Kappaleista otettiin yhteensä 800 mittaa koordinaatiomittauslaitteella. Kappaleiden pintoja myös skannattiin tasojen suoruuden sekä geometrisyyden tutkimista varten. Mittaukset suoritettiin Tampereen ammattikorkeakoulun tietokoneohjatulla Mitutoyo Crysta-Apex S574 koordinaatiomittauslaitteella (kuva 7) huoneenlämmössä.



KUVA 7. Mitutoyo Crysta-Apex S574 koordinaatiomittauslaite (ecatalog.mitutoyo.com)

Mittauksissa käytetyn mittapään valmistajan lupaama tarkkuus on $\pm 1,7 \mu\text{m}$ (Mitutoyo 2015) ja kappaleet asetettiin mitattaviksi 0,001 mm tarkkuudella. Mahdollisia mittalaitteesta johtuvia virheitä ei oteta huomioon tulosten analysoinnissa. Mittauskohtaiset tulokset ovat nähtävissä kokonaisuudessaan liitteissä 1 ja 3.

Kappaleista saatujen tulosten yhdenmukaisuutta tutkitaan vertaamalla liikesuuntien mitauskohtaisten tulosten jakaumaa normaalijakauman käyrään, joka on odotusarvonsa μ kohdalle keskitetty symmetrinen kuvaaja, jolla voidaan ennustaa mille alueelle arvot todennäköisimmin sijoittuvat. Kuvaajan leveyteen vaikuttaa tulosten keskihajonta σ , joka kertoo kuinka hyvin saadut arvot ovat sijoittuneet odotusarvonsa ympärille. Keskihajonta lasketaan seuraavasti:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - x)^2}{n - 1}}, \quad (1)$$

missä x_i on havaintoarvo, x on tulosten keskiarvo ja n on havaintoarvojen määrä.

Tulosten käsittelyssä odotusarvona μ pidetään saatujen tulosten tavoitemitan virheen keskiarvoa, ja tulosten jakautumista havainnollistetaan ilmoittamalla kuinka suuri osa mitoista on yhden tai useamman keskihajontaluvun σ päässä keskiarvosta.

4.2 **Objet350: 50 x 40 x 10 mm testikappaleiden tulokset**

Suorakaidekappaleista mitattiin sivujen leveydet ja pituudet 5 mm välein sekä paksuudet kuudesta eri pisteestä. Tulostusalueen perusteella kappaleet on jaettu kahteen testiryhmään: mittapalat A1 – A8 valmistettiin yhdessä työvaiheessa ja kappaleet A9 – A16 valmistettiin kahdessa työvaiheessa. Tutkittavat liikesuunnat on nimetty tulostimen liikesuuntia vastaaviksi.

Tulosten analysoinnissa viitataan liitteessä 1 oleviin kuvioihin, joissa on kuvattuna kappalekohtaisesti suorakaiteista mitatut leveys-, pituus- ja paksuusmitat sekä mittapalasta saatujen arvojen keskihajonnat. Kuviodien tarkoituksena on myös havainnollistaa tulosten välimatkaa tavoitemittaan sekä sijoittumista valmistajan ilmoittamaan tarkkuusalueeseen $\pm 0,02 - 0,085$ mm, jota kuvataan katkoviivoilla.

Taulukossa 2 on esiteltyä yhteenvedona kaikkien liikesuuntien mittojen ja tavoitemitan virheen keskiarvot, saatujen tulosten vaihteluväli sekä keskihajonnat millimetreinä. Virheen keskiarvot sekä keskihajonnat on ilmoitettu myös prosentteina tavoitemitasta. Taulukossa on myös ilmoitettu tulosten perusteena olevien mittapisteiden määrä.

TAULUKKO 2. Objet350:n 50 x 40 x 10 mm testikappaleiden mittaustulokset (liite 1)

Suunta	Asettelu työalustalle	A1 – A8 1 työvaihe	A9 – A16 2 työvaihetta
X	Tavoitearvo	50 mm	50 mm
	Tulosten keskiarvo	49,957 mm	49,941 mm
	Virheen keskiarvo μ	- 0,043 mm (- 0,09 %)	- 0,059 mm (- 0,12 %)
	Vaihteluväli	0,047 mm	0,060 mm
	Keskihajonta σ	0,009 mm (0,02 %)	0,013 mm (0,03 %)
	Mittapisteet	56 kpl	56 kpl
Y	Tavoitearvo	40 mm	40 mm
	Tulosten keskiarvo	40,146 mm	40,112 mm
	Virheen keskiarvo μ	0,146 mm (0,37 %)	0,112 mm (0,28 %)
	Vaihteluväli	0,161 mm	0,107 mm
	Keskihajonta σ	0,031 mm (0,08 %)	0,016 mm (0,04 %)
	Mittauspisteiden määrä	72 kpl	72 kpl
Z	Tavoitearvo	10 mm	10 mm
	Tulosten keskiarvo	9,934 mm	9,942 mm
	Virheen keskiarvo μ	- 0,066 mm (- 0,66 %)	- 0,058 mm (- 0,58 %)
	Vaihteluväli	0,049 mm	0,044 mm
	Keskihajonta σ	0,011 mm (0,11 %)	0,011 mm (0,11 %)
	Mittapisteet	48 kpl	48 kpl

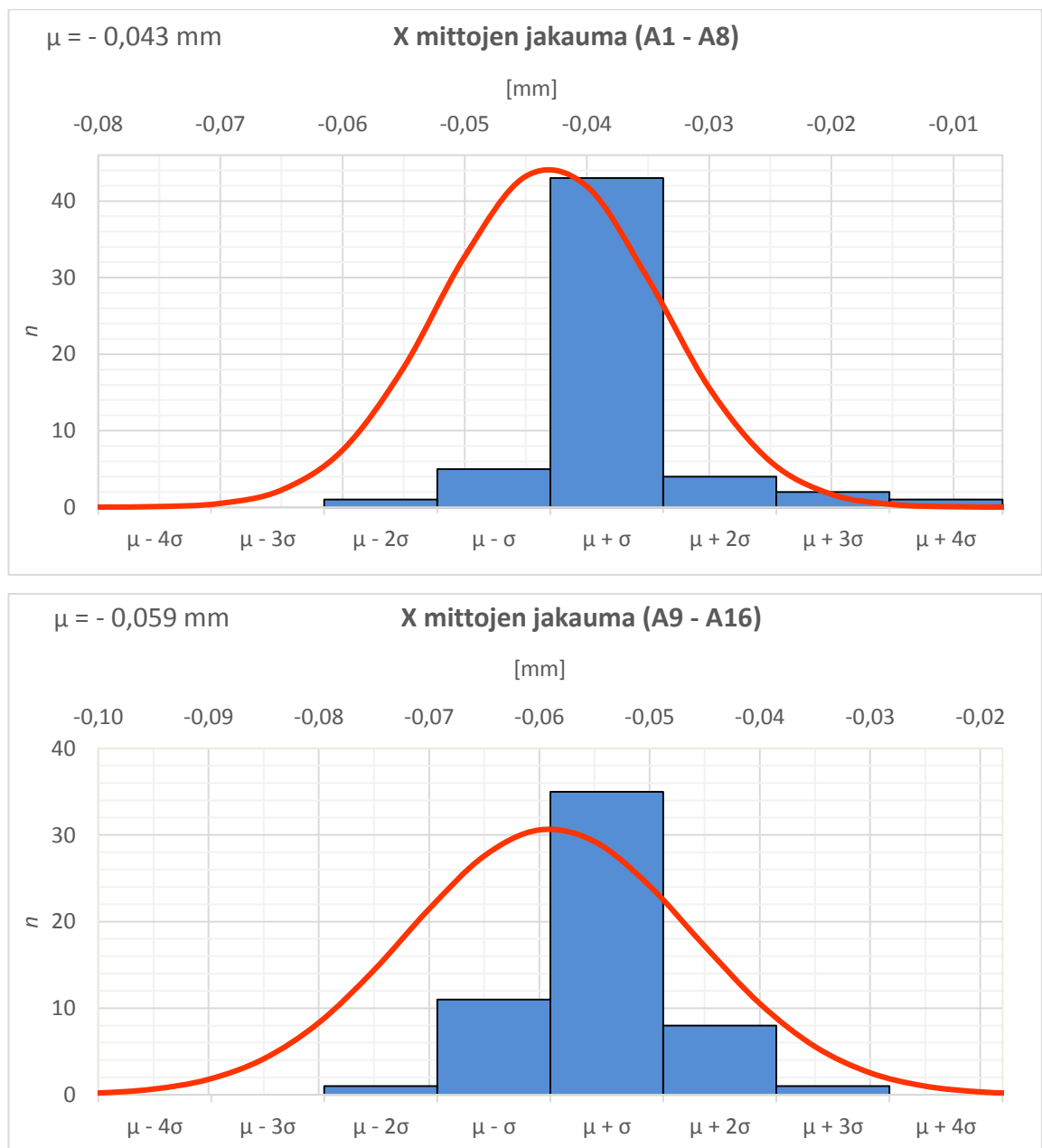
Koska testikappaleita on kahden muotoisia ja tutkittavia mittoja sekä muuttujia on useita, tulokset analysoidaan erikseen x-, y- ja z-suunnista (leveys, pituus ja paksuus) molemmissa työvaiheissa valmistettujen kappaleiden osalta ja mittauskohtaisia tuloksia verrataan toisiinsa sekä valmistajan ilmoittamaan tarkkuusalueeseen. Saatuja tuloksia verrataan myöhemmin myös eri tulostustekniikalla valmistettuihin vastaavanmuotoisiin mittapaloihin. Myös kappaleiden geometrisyyttä tutkitaan vertailemalla eri tulostustekniikoilla tehtyjen kappaleiden skannausmittausten tuloksia.

4.2.1 X-suunta

Molempien testiryhmien keskiarvot ovat x-suunnassa lähellä toisiaan, mutta yhdessä työvaiheessa valmistetut ovat noin 0,02 mm lähempänä tavoitearvoa kuin kahden työvaiheen kappaleet. Kaikki mittapalat ovat leveydeltään systemaattisesti tavoitemittaa pienempiä,

mutta tulokset ovat silti valmistajan ilmoittaman tarkkuusalueen sisäpuolella. Kappalekohtaiset keskihajonnat ovat kaikilla testipaloilla samaa luokkaa, mutta keskiarvot ovat A1 – A8 mittapaloilla yhdenmukaisempia. (Liite 1, 2.)

Alla olevasta kuviosta 1 nähdään, että saatujen leveysmittojen jakaumat ovat keskittyneet keskiarvonsa oikealle puolelle ja saadut tulokset noudattavat hyvin normaalijakauman kuvaajiaan. Yhden työvaiheen mittapaloista 86 % sijoittuu alueelle $\mu \pm \sigma$ ja 95 % sijoittuu alueelle $\mu \pm 2\sigma$. Kappaleiden A9 – A16 mitoista 82 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja jopa 98 % mitoista sijoittuu alueelle $\mu \pm 2\sigma$. (Liite 1, 3.)



KUVIO 1. Kappaleiden A1 - A16 leveysmittojen jakaumat ja normaalijakauman käyrät

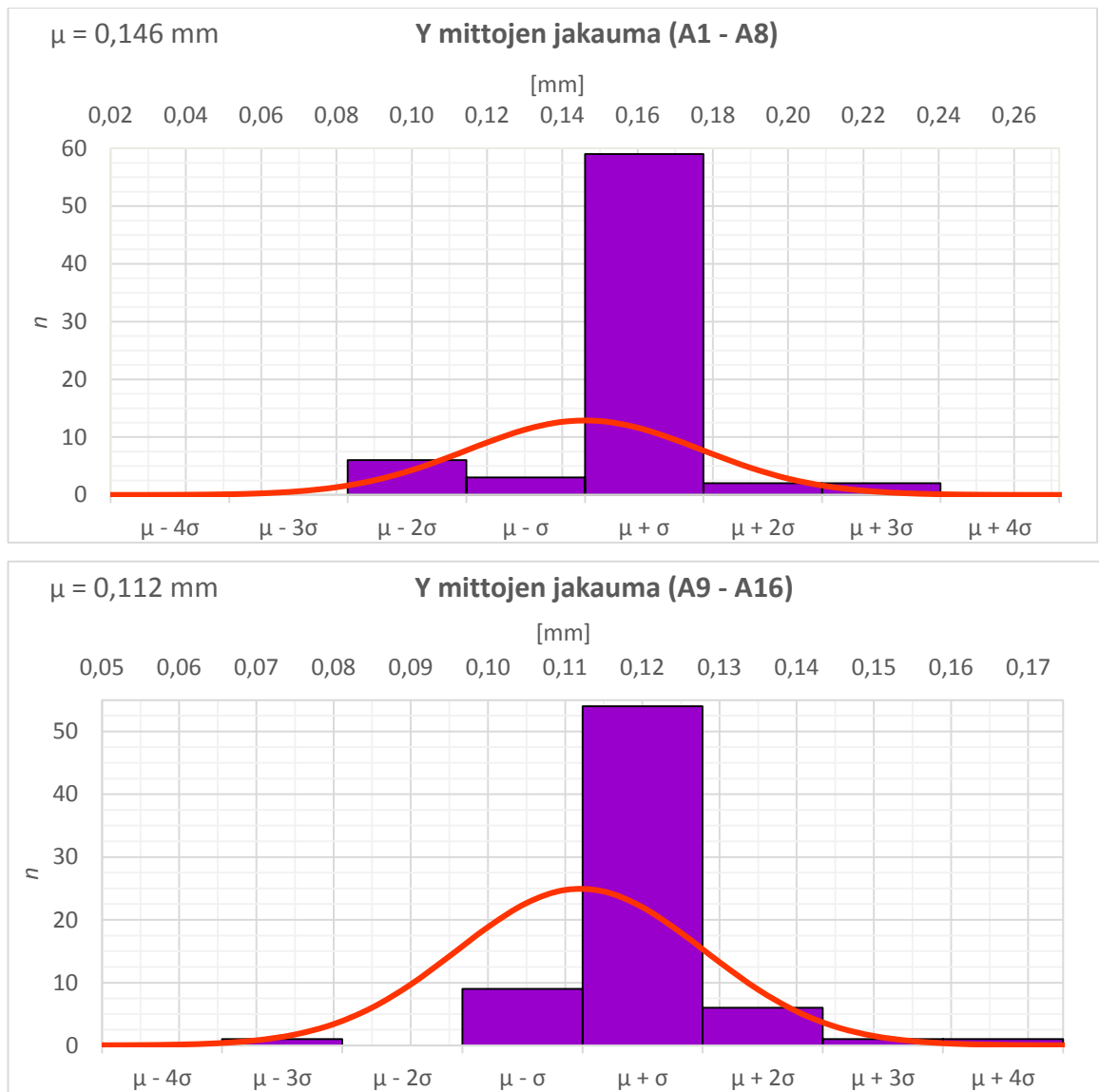
Tulosten perusteella valmistajan lupaama tarkkuusalue pitää paikkansa työalustan x-suunnassa ja kappaleet pienenevät tavoitearvosta keskimäärin $0,09 \pm 0,02$ % kun tulostus tehdään yhdessä työvaiheessa. Tulostus kahdessa työvaiheessa pienentää kappaletta keskimäärin $0,12 \pm 0,03$ %. Vertailun perusteella voidaan todeta, että kappaleen sijoitus työalueiden väliin vaikuttaa ulkomittoihin ja suurentaa virheen määrää noin 0,03 %.

4.2.2 Y-suunta

Pituusmittojen keskiarvot ovat molempien työvaiheiden kappaleilla yli 0,1 mm tavoitemittaa suurempia, mutta kahden työvaiheen kappaleet ovat noin 0,03 mm lähempänä tavoitetta. Kaikki mittapalat ovat pituudeltaan systemaattisesti tavoitemittaa suurempia ja molemmilla testiryhmillä oli vain yksi mittapala (A8 ja A13), joka pääsi osalta mitoista valmistajan tarkkuusalueen sisäpuolelle. Kappalekohtaiset keskiarvot ovat näitä kahta poikkeusta lukuun ottamatta yhdenmukaisia, mutta keskihajonnat puolestaan vaihtelevat pienistä suuriin varsinkin yhden työvaiheen mittapaloilla. (Liite 1, 4.)

Kuviosta 2 nähdään, että pituusmittojen jakauma A9 – A16 mittapaloilla noudattaa paremmin normaalijakauman käyrää, koska A1 – A8 mittapalojen pituusmitat eivät ole jakautuneet keskiarvonsa ympärille yhtä selkeästi. Tämä selittyy sillä, että kaikki testikappaleesta A8 otetut mitat olivat ryhmän muista tuloksista poikkeavia, mikä vaikuttaa jakauman muotoon sekä keskihajontaan merkittävästi. Yhden työvaiheen mittapalojen keskihajonta on tämän vuoksi lähes kaksinkertainen kahdella alueella valmistettuihin verrattuna. Koska testikappaleita on suhteellisen pieni määrä, ja kyseinen mittapala on pituusmitoiltaan tavoitemittaa lähimpänä, ei sen tuloksia kuitenkaan jätetty huomioimatta.

Molempien testiryhmien ennustavat normaalijakauman käyrät ovat muodoltaan hyvin loivia tulosten hajonnan vuoksi, mutta suurin osa molempien kappaleiden tuloksista keskittyy leveysmittojen tavoin keskiarvonsa oikealle puolelle. Kappaleiden A1 – A8 pituusmitoista 86 % sijoittuu alueelle $\mu \pm \sigma$ ja 97 % on alueella $\mu \pm 2\sigma$. Kahden työalueen mittapalojen pituusmitoista 88 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja 96 % mitoista sijoittuu alueelle $\mu \pm 2\sigma$. (Liite 1, 5.)



KUVIO 2. Kappaleiden A1 - A16 pituusmittojen jakaumat ja normaalijakauman käyrät

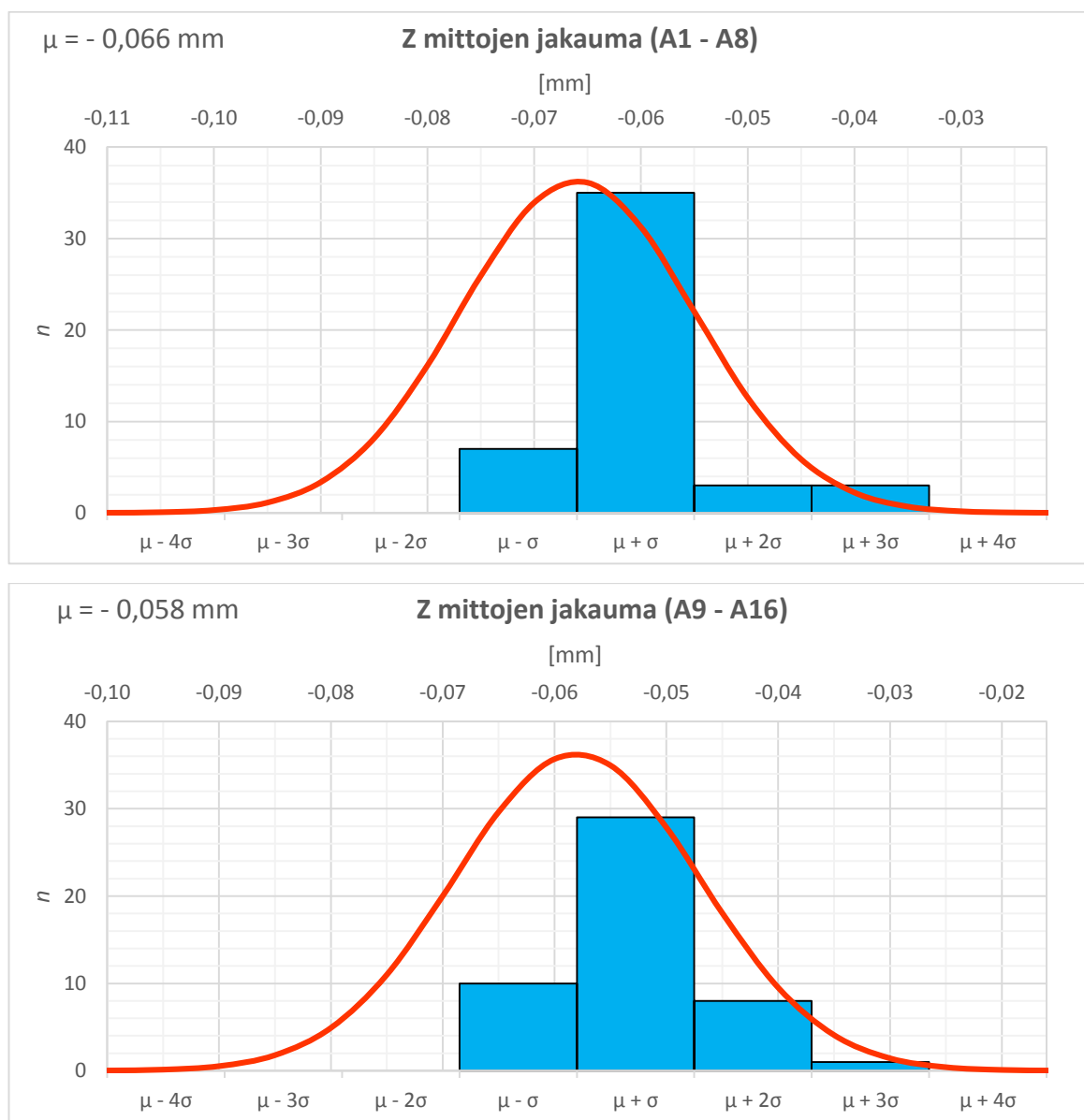
Saadut tulokset viittaavat siihen, että valmistajan lupaama tarkkuusalue ei pidä paikkaansa työalustan y-suunnassa ainakaan tämänhetkisinä asetuksilla. Kappaleet ovat keskimäärin $0,37 \pm 0,08 \%$ tavoitemittaa suurempia kun tulostus tehdään yhdessä työvaiheessa ja kahdessa vaiheessa tulostus suurentaa mitta y-suunnassa keskimäärin $0,28 \pm 0,04 \%$. Vertailun perusteella voidaan todeta, että toisin kuin x-suunnassa, kappaleen sijoitus työalueiden väliin pienentää virheen määrää noin $0,09 \%$.

4.2.3 Z-suunta

Testiryhmien paksuusmitat ovat hyvin lähellä toisiaan, kahden työvaiheen kappaleet ovat keskimäärin alle $0,01 \text{ mm}$ lähempänä tavoitetta. Kaikki mittapalat ovat paksuudeltaan

systemaattisesti tavoitetta pienempiä, mutta saadut tulokset ovat silti valmistajan tarkkuusalueen sisäpuolella. Kappalekohtaiset tulokset ovat yhdenmukaisia, poikkeuksena mittapala A1, joka on keskiarvoltaan lähempänä tavoitetta kuin muut. Keskihajonnat ovat molemmilla testiryhmillä yhtä suuret, mutta kappalekohtaisesti yhden työalueen mittapaloilla vaihtelevampia. (Liite 1, 6.)

Kuviosta 3 nähdään, että paksuusmittojen jakaumat noudattavat hyvin normaalijakauman käyriään. Yhden työvaiheen mittapaloista 88 % on paksuusmitoiltaan alueella $\mu \pm \sigma$ ja 94 % on alueella $\mu \pm 2\sigma$. Kahden työalueen ryhmässä paksuusmitoista 81 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja 98 % mitoista sijoittuu alueelle $\mu \pm 2\sigma$. (Liite 1, 7.)



KUVIO 3. Kappaleiden A1 - A16 paksuusmittojen jakaumat ja normaalijakauman käyrät

Tulosten perusteella voidaan todeta, että valmistajan tarkkuusalue pitää paikkansa työalustan z-suunnassa. Kappaleet ovat keskimäärin $0,66 \pm 0,11$ % tavoitemittaa pienempiä kun tulostus tehdään yhdessä työvaiheessa ja kahdessa työvaiheessa tulostus pienentää kappaletta z-suunnassa keskimäärin $0,58 \pm 0,11$ %. Vertailun perusteella työalueiden väliin sijoitettu kappale on virheeltään $0,08$ % pienempi. Prosentuaalisesti paksuusmitoissa oli eniten virhettä verrattuna leveys- ja pituusmittoihin.

4.3 Objet350: D50 x 10 mm testikappaleiden tulokset

Pyöreistä testikappaleista mitattiin halkaisijat 10° välein sekä paksuudet seitsemästä eripisteestä. Kaikki pyöreät testikappaleet A17 – A21 valmistettiin yhdessä työvaiheessa ja samalla tulostuskerralla. Tulosten analysoinnissa viitataan liitteessä 3 oleviin kuvioihin, joissa on kuvattuna kappalekohtaisesti pyöreiden kappaleiden mitatut halkaisijat sekä paksuusmitat ja mittauskohtaiset keskihajonnat. Kuvioiden tarkoituksena on myös havainnollistaa saatujen mittaustulosten välimatkaa tavoitemittaan sekä sijoittumista katkoiviivoilla kuvattuun valmistajan ilmoittamaan tarkkuusalueeseen.

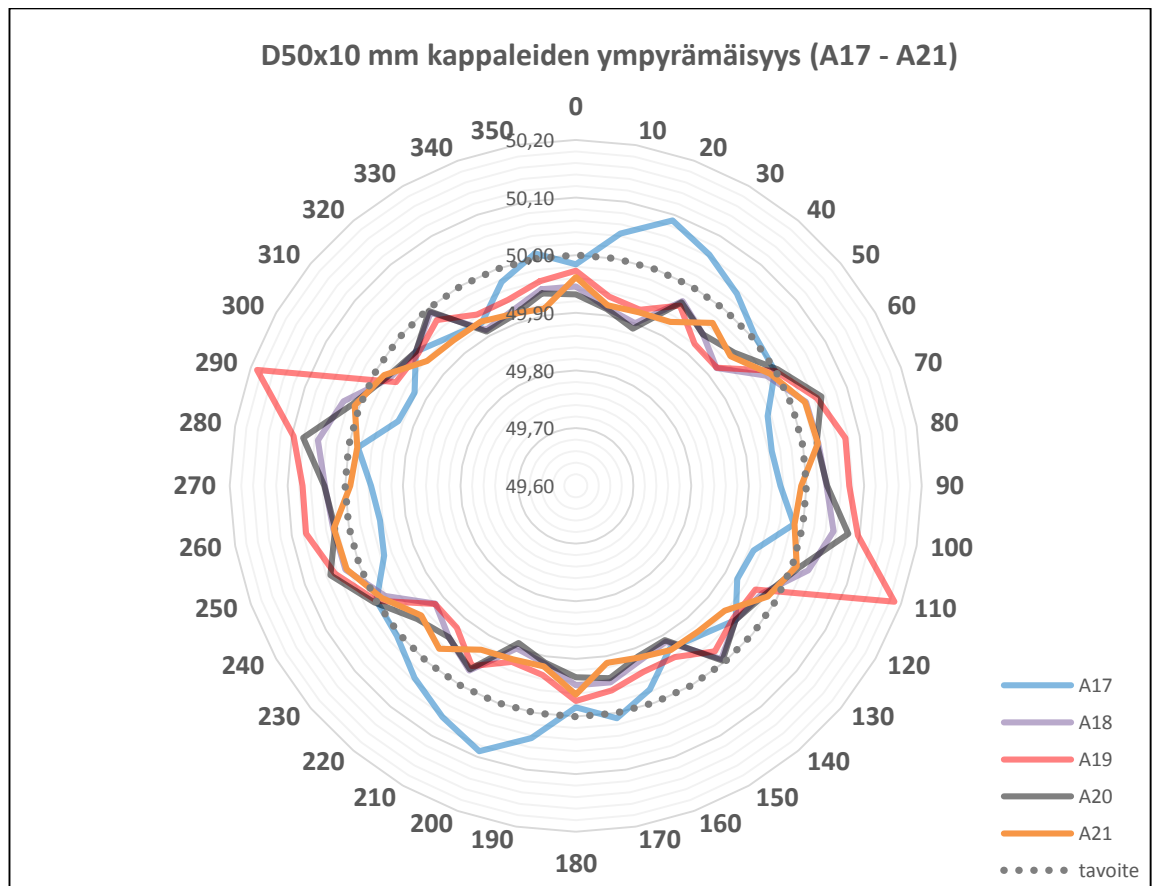
Taulukossa 3 on esiteltyä yhteenvetona pyöreiden kappaleiden halkaisija- sekä paksuusmittojen tulosten keskiarvot, virheen keskiarvot, saatujen tulosten vaihteluväli sekä keskihajonnat millimetreinä. Virheen keskiarvot sekä keskihajonnat on ilmoitettu myös prosentteina tavoitemitasta. Taulukossa on myös ilmoitettu tulosten perusteena olevien mittapisteiden määrä.

TAULUKKO 3. Objet350:n D50 x 10 mm testikappaleiden mittaustulokset (liite 3)

Asettelu työalustalle	A17 – A21	
	1 työvaihe	
Suunta	D	Z
Tavoitearvo	50 mm	10 mm
Tulosten keskiarvo	49,976 mm	9,931 mm
Virheen keskiarvo μ	- 0,024 mm (- 0,05 %)	- 0,069 mm (- 0,69 %)
Vaihteluväli	0,298 mm	0,054 mm
Keskihajonta σ	0,054 mm (0,11 %)	0,011 mm (0,11 %)
Mittapisteet	90 kpl	35 kpl

4.3.1 D-suunta

Kuviossa 4 on havainnollistettuna pyöreiden mittapalojen ympyrämäisyys kappalekohtaisesti. Halkaisijat on mitattu kappaleista 10° välein.

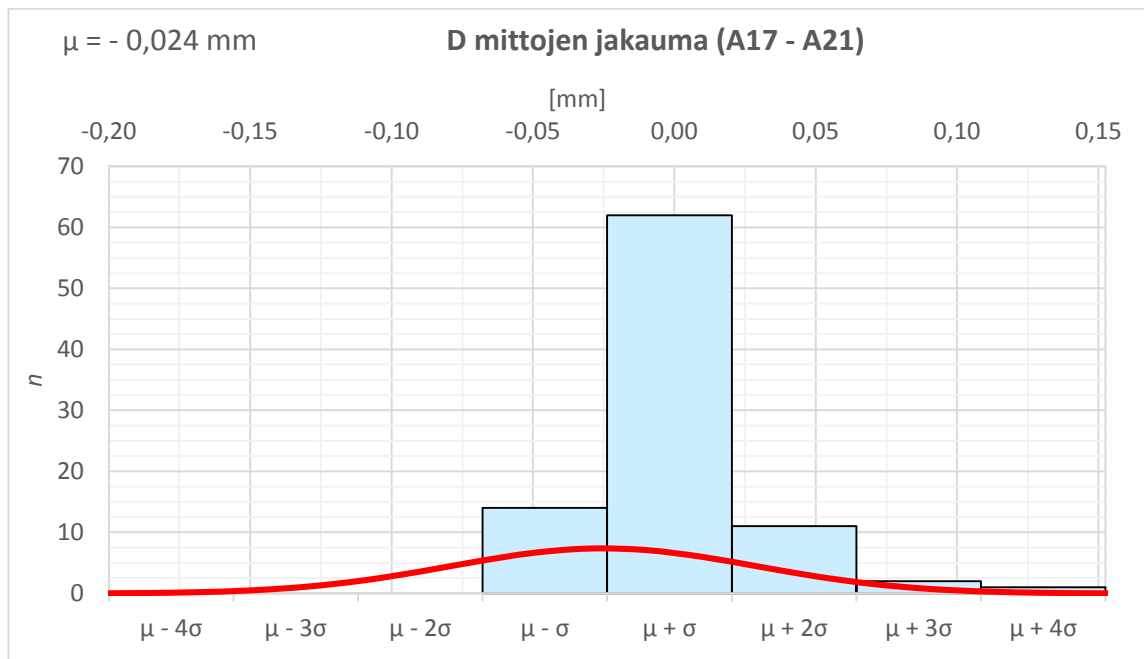


KUVIO 4. Testikappaleiden A17 - A21 halkaisijat

Kuviosta 4 nähtävien tulosten perusteella kaikki viisi testikappaletta ovat halkaisijoiltaan lähellä 50 mm tavoitemittaa ja muodoiltaan samantapaisia. Laitteen x-suunnassa tulostettujen kylkien mitat ovat tavoitemittaa pienempiä ja osa y-suunnassa tulostetuista halkaisijoista on mitoiltaan tavoitetta isompia, mikä tekee kappaleista soikion muotoisia.

Koska mittapalat ovat muodoltaan soikeita, kappalekohtaiset tulokset sijoittuvat tavoitemitan molemmin puolin ja tulosten hajonnat ovat suuria. Taulukosta 3 nähdään, että saatujen mittojen vaihteluväli on lähes 0,3 mm. Kaikki saadut mitat ovat kuitenkin keskiha-jontoineen valmistajan ilmoittaman tarkkuusalueen sisäpuolella, joka on tulosten tavoitemitan ympärille sijoittumisen vuoksi havainnollistettuna alueena $\pm 0,085$ mm (liite 3, 3).

Keskiarvoltaan kaikki kappaleet ovat tavoitetta pienempiä ja alla olevasta kuviosta 5 nähdään, että halkaisijamittojen jakauma on keskittynyt keskiarvon oikealle puolelle. Muodoltaan tulokset ovat normaalijakautuneet, mutta eivät ennustavan normaalijakauman käyrän mukaisesti, joka on todella loiva suuren keskihajonnan vaikutuksesta. Pyöreiden mittapalojen halkaisijoiden tuloksista 84 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja 98 % on alueella $\mu \pm 2\sigma$ (liite 3, 4).



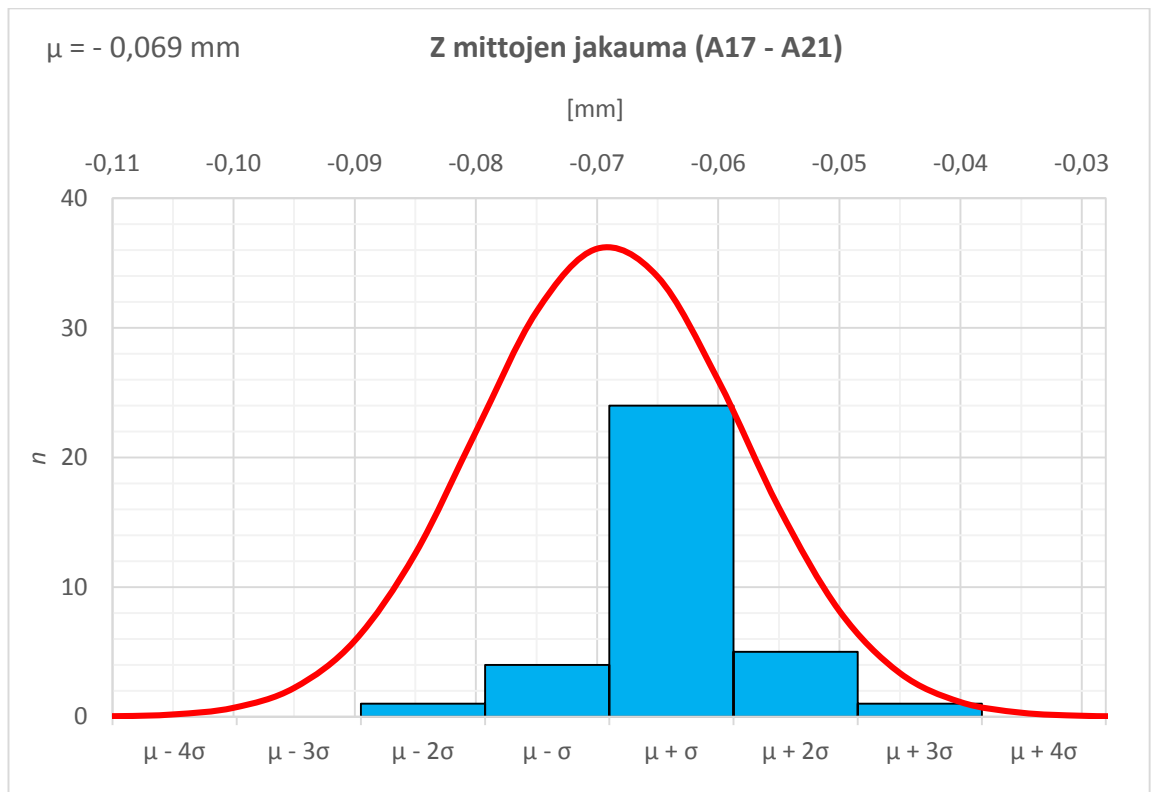
KUVIO 5. Kappaleiden A17 – A21 halkaisijamittojen jakauma ja normaalijakauman käyrä

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että tulostamalla pyöreitä kappaleita yhdessä työvaiheessa, halkaisija on keskimäärin $0,05 \pm 0,11$ % tavoitemittaa pienempi. Suorakaidekappaleiden A1 – A8 tapaan x-suunnassa mitat ovat tavoitetta pienempiä ja y-suunnassa suurempia. Nähtävästi pyöreän muodon vaikutuksesta tulosten hajonta y-suunnassa on pienempi ollessaan vain kolmasosan suorakaidekappaleiden hajonnasta.

4.3.2 Z-suunta

Koska kaikki mittapalat tulostettiin samalla kertaa, ei pyöreiden kappaleiden paksuusmittojen keskiarvoissa tai keskihajonnassa ole suurta eroa verrattuna yhden työvaiheen suorakaidekappaleisiin. Saadut mitat ovat systemaattisesti tavoitemittaa pienempiä ja lähes kaikki kappalekohtaiset tulokset ovat valmistajan ilmoittaman tarkkuusalueen sisäpuolella (liite 3, 5).

Kuviosta 6 nähdään, että saatujen mittatulosten jakauma noudattaa hyvin ennustettua normaalijakaumaa ja suurin osa mitoista on suorakaidekappaleiden tapaan keskittynyt keskiarvonsa oikealle puolelle. Pyöreiden mittapalojen paksuusmittojen tuloksista 80 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja 97 % on alueella $\mu \pm 2\sigma$. (Liite 3, 6.)



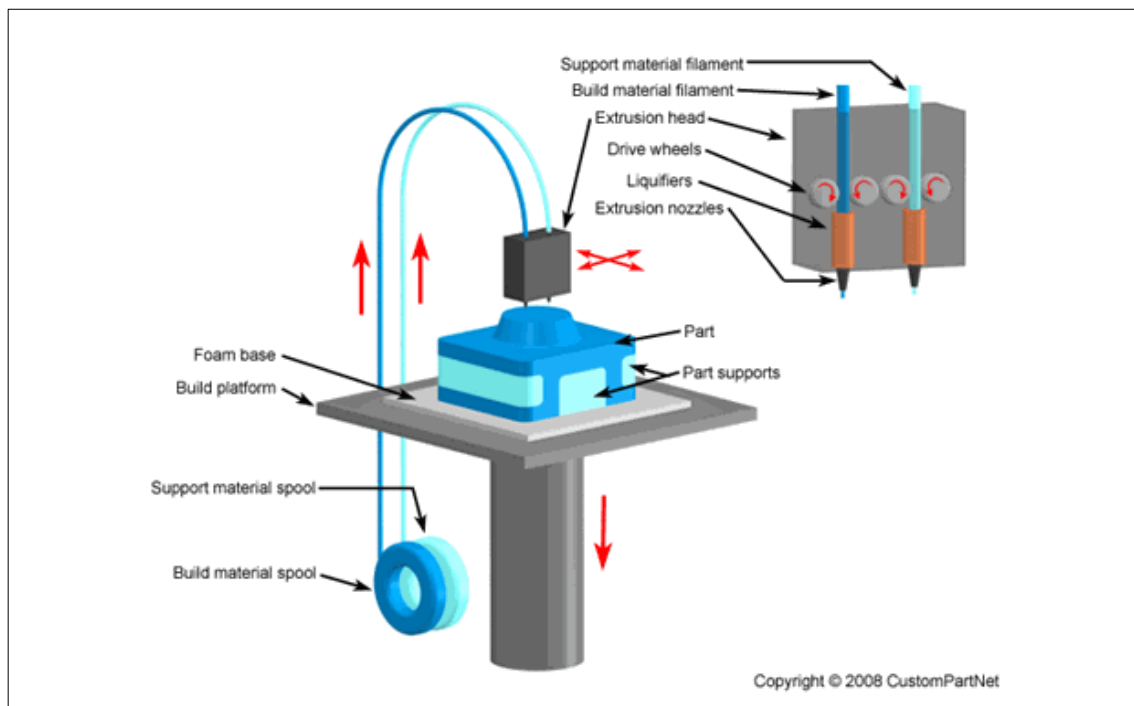
KUVIO 6. Kappaleiden A17 – A21 paksuusmittojen jakauma ja normaalijakauman käyrä

Saatujen tulosten perusteella yhdessä työvaiheessa tulostettaessa pyöreiden kappaleiden paksuus pienenee tavoiteimitasta $0,69 \pm 0,11 \%$. Vertaamalla saatuja mittoja suorakaidekappaleiden A1 – A8 paksuusmittoihin, voidaan todeta, että tulostettavan kappaleen x- ja y-suuntien muodolla ei tulosten mukaan ole suurta vaikutusta paksuusmitan pienenemiseen. Tämä johtuu siitä, että kappaleissa on yhtä paljon tulostuskerroksia.

4.4 Vertailu FDM-tulostustekniikkaan: Fortus 250mc

Saatuja toleranssimittausten tuloksia verrataan perinteisempää FDM-tulostustekniikka käyttävän 3D-tulostimen testikappaleisiin. Lyhenne FDM eli Fused Deposition Modeling tarkoittaa vapaasti suomennettuna sulattamalla kerrostettua mallintamista, joka on Stratasys yhtiön 80-luvulla patentoima materiaalia lisäävä valmistustekniikka. (Capinc 2016a.)

Muovimateriaali sekä tukiaine syötetään laitteeseen lankoina, jotka sulatetaan ja pursotetaan tahnamaisena suuttimen läpi. Suutin käy läpi tehtävän kappaleen kaikki kohdat kerros kerrokselta ja materiaali kovettuu lämpötilan muutoksen avulla. Tämän yleisimmän käytössä olevan tulostustekniikan toimintaperiaate on esiteltynä kuvassa 8. Tulostustekniikan avulla kappaleen sisärakenteesta on mahdollista tehdä ontto tai kokonaan umpinainen. (Gibson ym. 2010, 143–144; DeGarmo ym. 2003, 874–875.)



KUVA 8. FDM -tulostustekniikan toimintaperiaate (CustomPartNet 2008)

Vertailun tarkoituksena on selvittää miten kappaleista saadut mitat poikkeavat toisistaan ja kummalla tulostustekniikalla päästiin lähemmäksi tavoitemittoja. Myös kappaleiden geometrisyyttä tutkitaan skannausmittausten tuloksia vertailemalla. Samalla tutkittiin myös FDM-tulostustekniikalla tehtyjen kappaleiden täytön vaikutusta mittoihin, joten osa mittapaloista on rakenteeltaan onttoja ja osa umpinaisia.

Vertailtavat testikappaleet tulostettiin Stratasys Fortus 250mc 3D-tulostimella, jonka valmistusmateriaalina on lankana syötettävä ABS-muovi. Laite on ulkomitoiltaan 838 x 737 x 1143 mm kokoinen ja painaa 186 kg. Käytössä olevan tulostusalueen koko on 254 x 254 x 305 mm ja valmistajan lupaama tarkkuus on $\pm 0,241$ mm. (Stratasys 2016c.)

Kaikki 15 tutkittavaa testikappaletta tulostettiin yhdellä tulostuskerralla, joista 11 on suorakaiteen muotoisia ja neljä pyöreitä. Suorakaidekappaleista neljä on rakenteeltaan onttoja (B1 – B4) ja loput seitsemän (B5 – B11) sekä pyöreät kappaleet (B12 – B15) ovat täytöltään umpinaisia. Kappaleiden mittoja tutkittiin ottamalla mitat koordinaatiomittauslaitteella samoista pisteistä kuin Objet350:n mittapaloista, ja liikesuunnat on nimetty laitteen tulostussuuntia vastaaviksi. Mittauskohtaiset tulokset ovat kokonaisuudessaan liitteissä 2 ja 3. Fortus 250mc:llä valmistettujen B-testiryhmien kappaleiden tiedot ovat yhteenvedona taulukossa 4.

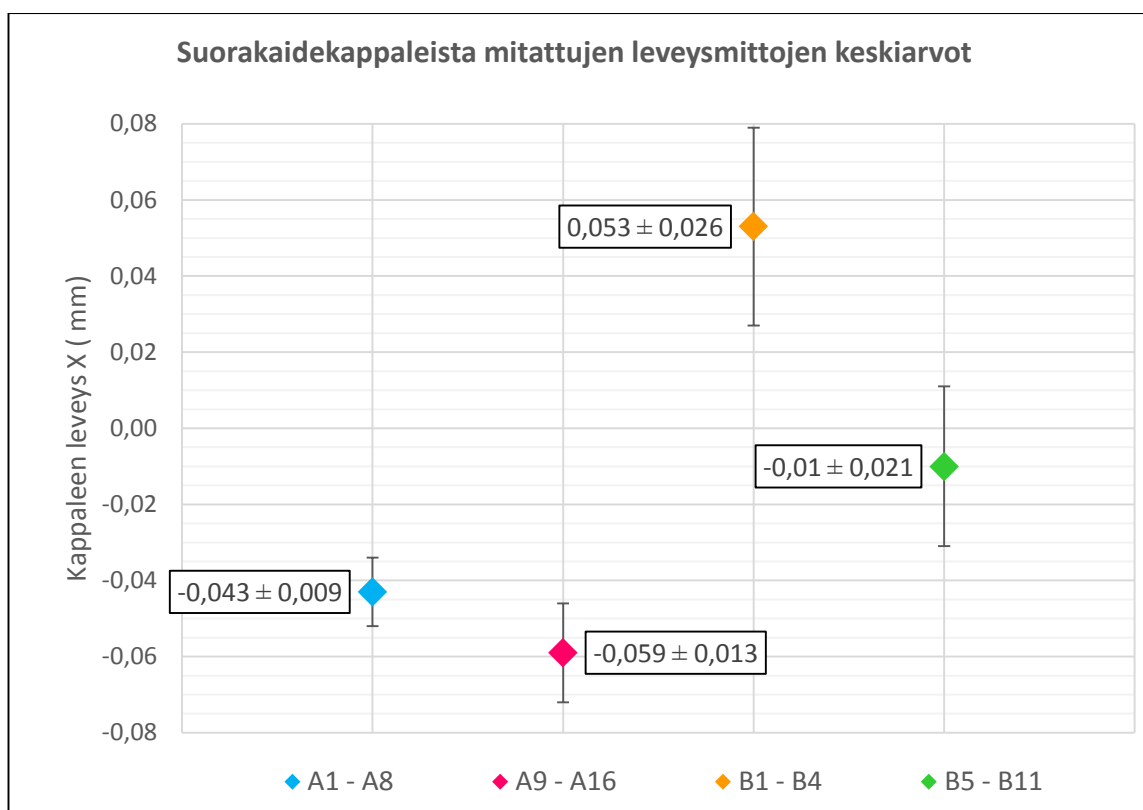
TAULUKKO 4. Fortus 250mc: tutkittavien B-testikappaleiden tiedot

Testiryhmä	B1 – B4	B5 – B11	B12 – B15
Kappaleen täyttö	ontto	umpinainen	umpinainen
Ulkomitat	50 x 40 x 10 mm	50 x 40 x 10 mm	D50 x 10 mm

4.4.1 50 x 40 x 10 mm testikappaleet

Tulosten analysoinnissa viitataan liitteessä 2 oleviin kuvioihin, joissa on kuvattuna vertailtavista suorakaiteista mitatut leveys-, pituus- sekä paksuusmitat ja kappalekohtaiset keskihajonnat. Liitteessä on B-kappaleiden mittaustulokset kokonaisuudessaan, sisältäen mittaushajonnat sekä normaalijakauman kuvaajat.

Kuviossa 7 on esiteltyä molemmilla tulostustekniikoilla valmistettujen suorakaidekappaleiden leveysmittojen virheen keskiarvot sekä virhepalkkeina ryhmäkohtaiset keskihajonnat.

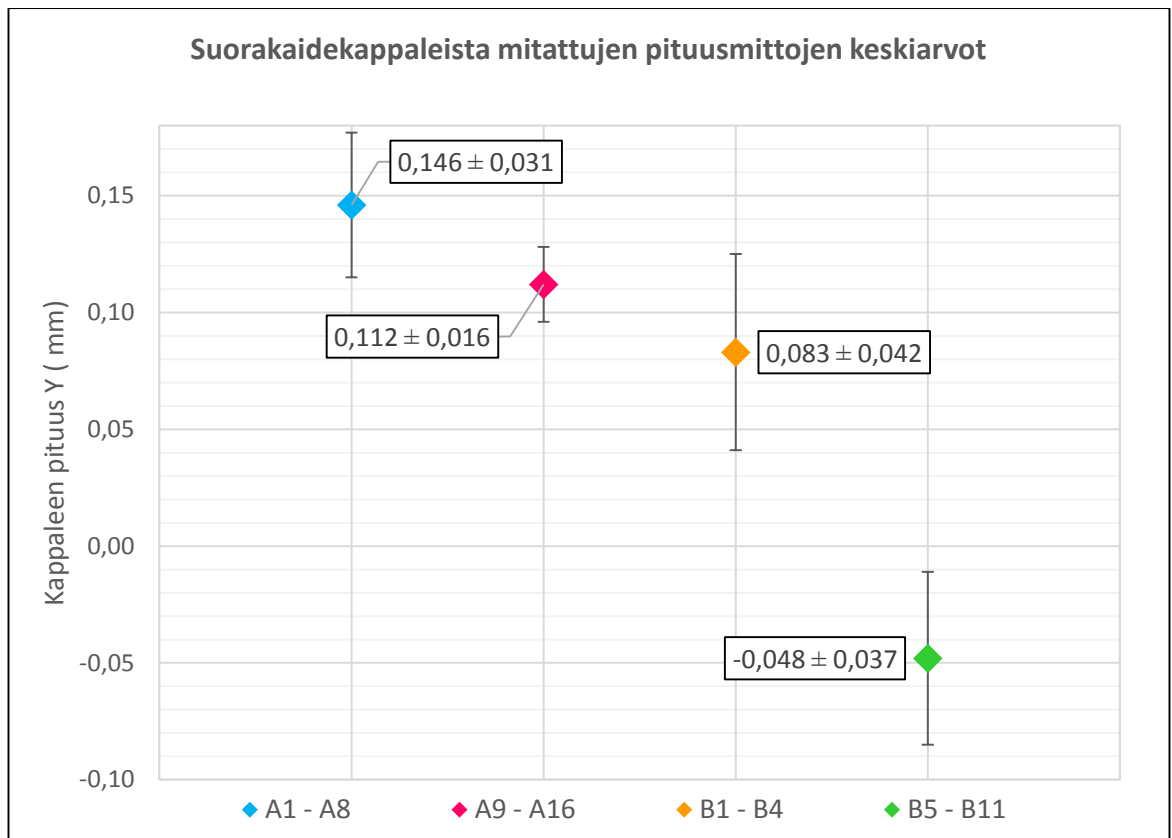


KUVIO 7. Suorakaidekappaleiden x-suunnan mittaustulosten keskiarvot (liite 1; liite 2)

Saatuja leveysmittoja vertaamalla nähdään, että täytöltään umpinaiset B5 – B11 kappaleet ovat testiryhmistä keskimäärin lähimpänä tavoitetta. Ontot kappaleet B1 – B4 ovat keskiarvoltaan lähes yhtä kaukana tavoitteesta kuin kahdessa työvaiheessa tulostetut A9 – A16, mutta päinvastaisesti tavoitetta suurempia. A-tulosteiden mittojen keskihajonnat ovat kuitenkin huomattavasti B-kappaleita pienempiä ja kappalekohtaiset tulokset ovat B-kappaleilla vaihtelevampia, mikä viittaa suihkutustekniikan olevan yhdenmukaisempaa x-suunnassa useita kappaleita tulostettaessa. (Liite 2, 2.)

Liitteessä 2 on nähtävänä B-kappaleiden x-suunnan mittojen jakaumat, jotka ovat ontoilla kappaleilla keskittyneet keskiarvonsa oikealle puolen ja umpinaisella täytöllä tehdyt kappaleet keskittyvät keskiarvonsa molemmin puolin. Saadut tulokset ovat lähellä ennustavien normaalijakaumien kuvaajia. Kappaleiden B1 – B4 tuloksista 86 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja 96 % on alueella $\mu \pm 2\sigma$. Kappaleiden B5 – B11 keskihajonnan ollessa 0,021 mm, alueelle $\mu \pm \sigma$ mahtuu 80 % tuloksista ja muista tuloksista poiketen 100 % mitoista on alueella $\mu \pm 2\sigma$. (Liite 2, 3.)

Kuviossa 8 on kaikkien suorakaidekappaleiden pituusmittojen virheen keskiarvot sekä virhepalkkeina ryhmäkohtaiset keskihajonnat.

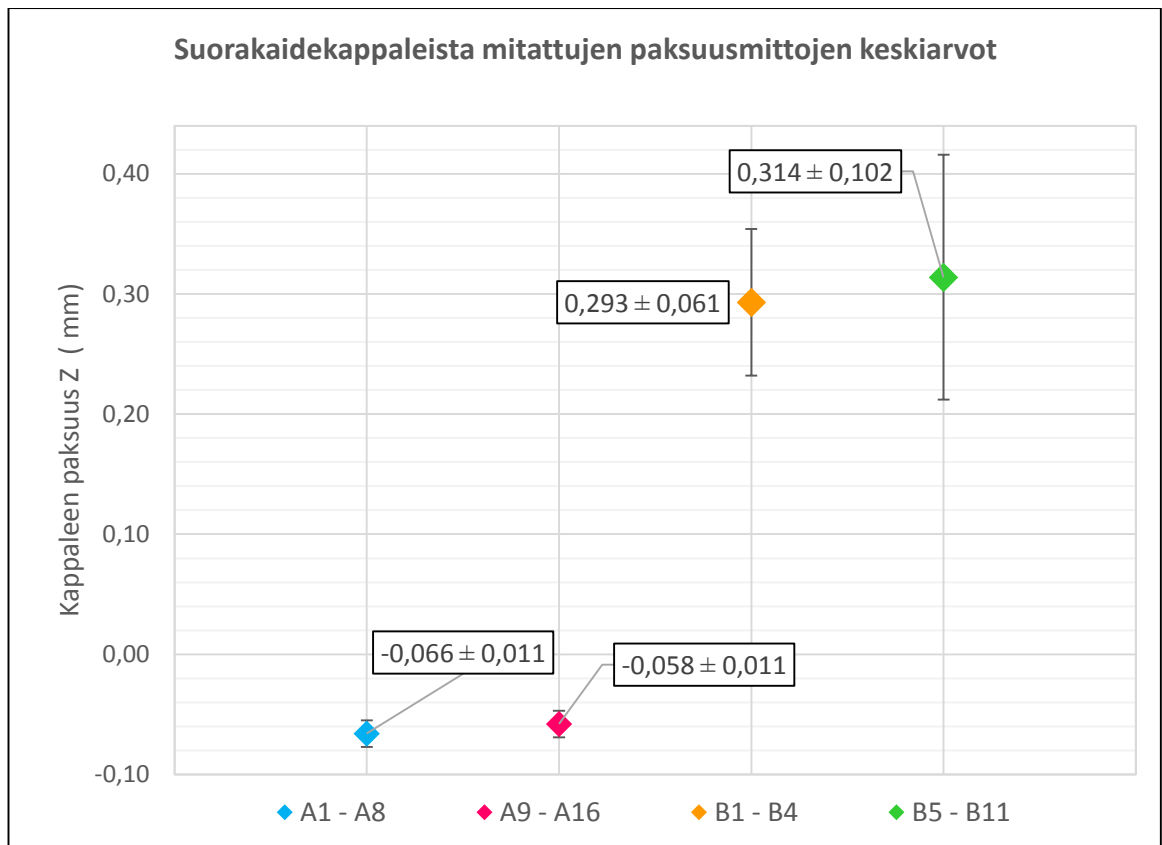


KUVIO 8. Suorakaidekappaleiden y-suunnan mittaustulosten keskiarvot (liite 1; liite 2)

Kuvion 8 pituusmittoja vertaamalla nähdään, että B-kappaleet ovat keskiarvoiltaan lähempänä tavoitemittaa, mutta tulosten keskihajonnat ovat suurempia varsinkin täytöltään ontoilla kappaleilla. B5 – B11 mittapalat ovat tuloksiltaan ainoat tavoitemitan alapuolella ja lähimpänä tavoitetta. Myöskään keskihajonta ei ole kaukana yhden työvaiheen A-kappaleiden hajonnasta. Yhdenmukaisimmin tulostunut testiryhmä on kahden työvaiheen välissä tulostetut kappaleet A9 – A16.

B-kappaleiden kappalekohtaiset tulokset ovat keskiarvoiltaan huomattavasti A-ryhmän kappaleita vaihtelevampia. Molemmat B-kappaleiden ryhmien pituusmittojen jakaumat ovat A-kappaleiden tavoin sijoittuneet keskiarvonsa oikealle puolelle ja tulokset ovat muodoltaan normaalijakautuneet. Hajonnan käyrät ovat kuitenkin tuloksiin verrattuna loivia suurten keskihajontojen seurauksena. Onttojen kappaleiden tuloksista 81 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja 97 % sijoittuu alueelle $\mu \pm 2\sigma$. Kappaleiden B5 – B11 alueella $\mu \pm \sigma$ on 84 % tuloksista ja 98 % mitoista on alueella $\mu \pm 2\sigma$. (Liite 2, 4–5.)

Kuviossa 9 on esiteltyä kaikkien suorakaidekappaleiden paksuusmittojen keskiarvot sekä virhepalkkeina ryhmäkohtaiset keskihajonnat.



KUVIO 9. Suorakaidekappaleiden z-suunnan mittaustulosten keskiarvot (liite 1; liite 2)

Kuviosta 9 nähdään, että tulostustekniikoiden testiryhmien paksuusmitoissa on huomattava ero. Paksuuden keskiarvot ovat B-ryhmän kappaleilla lähellä 0,3 mm virhettä tavoitearvosta kun A-ryhmän mittapalat ovat alle 0,07 mm päässä tavoitteesta. B-ryhmän tulosten keskiarvo on myös valmistajan lupaaman tarkkuuden $\pm 0,241$ mm ulkopuolella. A-ryhmän kappaleiden keskihajonnat ovat lähes olemattomat varsinkin täytöltään umpinaisten kappaleiden hajontaan verrattuna. Lisäksi muiden suuntien tapaan B-ryhmän kappalekohtaiset tulokset vaihtelevat huomattavasti enemmän (liite 2, 6).

Liitteestä 2 nähtävät B-testiryhmän paksuusmittojen jakaumat ovat keskittyneet keskiarvojen oikealle puolelle ja muistuttavat muodoiltaan normaalijakaumaa. Ennustavat normaalijakauman käyrät ovat pituusmittojen tavoin hyvin loivia. Onttojen kappaleiden mitoista 88 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja tuloksista 94 % mahtuu alueelle $\mu \pm 2\sigma$. Kappaleiden B5 – B11 tuloksista 83 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja 98 % mitoista on alueella $\mu \pm 2\sigma$. (Liite 2, 7.)

Taulukossa 5 on yhteenvetona molempien suorakaidekappaleiden testiryhmien eri liikesuuntien tavoitemittojen keskimääräiset muutokset ja keskihajonnat prosentteina.

TAULUKKO 5. Suorakaidekappaleiden tavoitemitan muutos tulostussuunnan mukaan

	A1 – A8	A9 – A16	B1 – B4	B5 – B11
X	- 0,09 ± 0,02 %	- 0,12 ± 0,03 %	+ 0,11 ± 0,05 %	- 0,02 ± 0,04 %
Y	+ 0,37 ± 0,08 %	+ 0,28 ± 0,04 %	+ 0,21 ± 0,10 %	- 0,12 ± 0,09 %
Z	- 0,66 ± 0,11 %	- 0,58 ± 0,11 %	+ 2,93 ± 0,61 %	+ 3,14 ± 1,02 %

Kuten taulukosta 5 nähdään, x-suunnan tavoitemitan keskimääräinen prosentuaalinen muutos on pienin Fortus 250mc:llä tulostetuilla täytöltään umpinaisilla mittapaloilla. Kappaleen täytöllä on merkittävä muutos tuloksiin, sillä tulosten mukaan muutosprosentti kasvaa lähes viisinkertaiseksi kun sisärakenne on ontto. Objet350:n tulosteista pienin muutos on yhden työalueen mittapaloilla ja kahden työalueen kappaleilla vain hieman suurempi. A-testiryhmän prosentuaaliset keskihajonnat ovat x-suunnassa pienempiä kuin B-ryhmän kappaleilla.

Y-suunnassa umpinaiset mittapalat B5 – B11 ovat x-suunnan tavoin muutosprosenttiltaan pienimmät. Ontto sisärakenne kasvattaa muutosprosentin lähes kaksinkertaiseksi. Suurin prosentuaalinen muutos on A1 – A8 kappaleilla ja kahden työvaiheen kappaleet ovat seuraavaksi lähimpänä. X-suunnan tavoin hajontaprocentit ovat A-ryhmällä pienempiä.

Z-suunnassa mittojen muutos oli muihin liikesuuntiin verrattuna suurin ja varsinkin B-ryhmän kappaleilla tavoitemitan muutokset ovat erittäin suuria noin 3 % keskiarvoillaan. A-testiryhmän paksuussuunnan prosentuaaliset muutokset ovat muihin suuntiin verrattuna suuria, mutta B-ryhmään verrattuna hyvinkin pieniä. Prosentuaaliset keskihajonnat ovat A-ryhmän kappaleilla hyvin paljon pienempiä.

Vertailun perusteella Objet350:n tarkkuus on ohuiden tulostuskerrosten ansiosta merkittävästi FDM-tekniikkaa tarkempi paksuussuunnassa, mutta pituussuunnassa puolestaan FDM-tekniikalla saadaan tarkempaa jälkeä. Leveyssuunnassa kaikkien kappaleiden mitat olivat muihin suuntiin verrattuna tarkimpia ja kumpikaan tekniikka ei ollut selkeästi toista parempi, koska tulokset vaihtelivat työvaiheiden ja täyttöjen mukaan ristiin. Kaikissa suunnissa keskihajonnat olivat pienempiä Objet350:n mittapaloilla.

Mittapalojen suoruutta ja geometrisyyttä tutkittiin skannaamalla kappaleiden tasopintoja sekä reunojen rinnakkaisuutta ja suorakulmaisuutta. Mitä lähempänä saatu skannaustulos on nolaa, sitä tasaisempi, suorempi tai geometrisempi pinta on. Alla olevassa taulukossa 6 on esiteltynä kaikkien suorakaidekappaleiden skannausmittausten keskiarvot.

TAULUKKO 6. Suorakaidekappaleiden skannausmittausten tulokset (liite 1; liite 2)

	A1 – A8	A9 – A16	B1 – B4	B5 – B11
Tasomaisuus (yläpinta)	0,021 mm	0,041 mm	0,189 mm	0,279 mm
Tasomaisuus (alapinta)	0,016 mm	0,024 mm	0,039 mm	0,056 mm
Suoruus	0,034 mm	0,034 mm	0,046 mm	0,036 mm
Rinnakkaisuus	0,042 mm	0,040 mm	0,066 mm	0,042 mm
Suorakulmaisuus	0,026 mm	0,033 mm	0,062 mm	0,037 mm

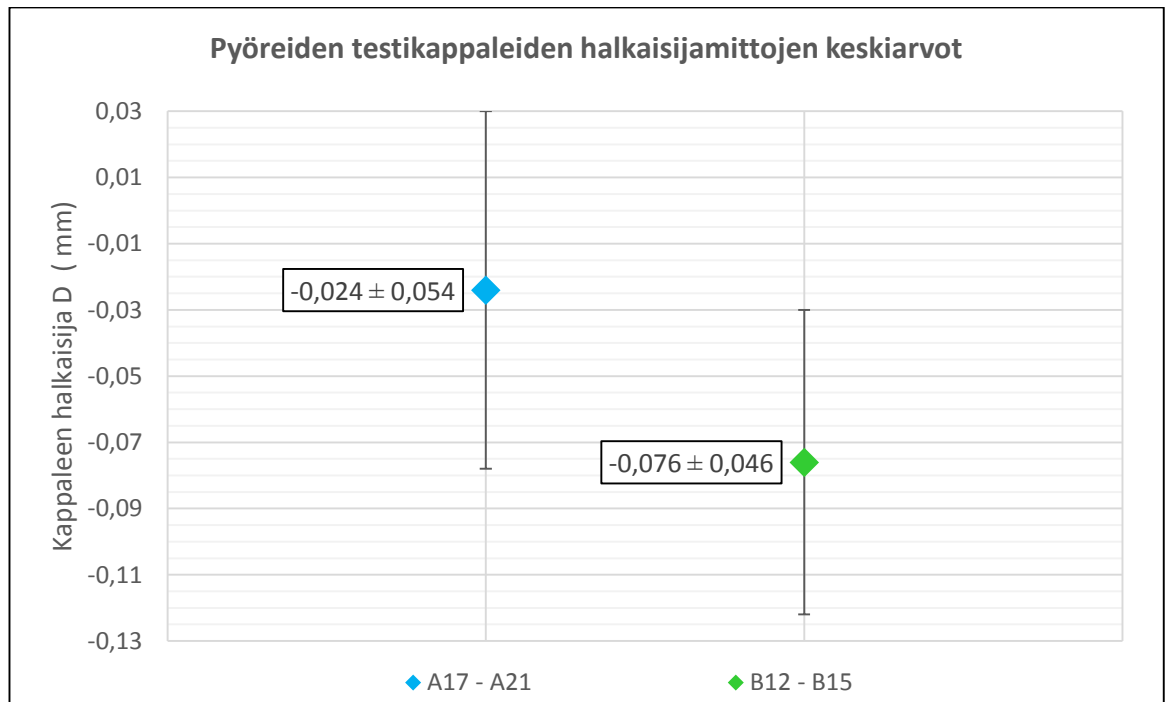
Skannaustulosten perusteella reunojen suoruus ja rinnakkaisuus on kaikilla Objet350:n mittapaloilla samaa luokkaa. Alapinnan tasomaisuus ja reunojen suorakulmaisuus on A1 – A8 kappaleilla parempi. Suurin ero on yläpintojen tasomaisuudessa, joka on yhden työalueen kappaleilla pienempi. Tasomaisuuden erot selittyvät sillä, että kahdessa työvaiheessa tulostettaessa pinnasta ei saada yhtä tasaista kuin yhdellä suihkutuskerralla.

Vertaamalla A-ryhmän skannaustuloksia B-kappaleisiin nähdään, että suurin ja huomattavin ero on yläpintojen tasomaisuudessa. FDM-tekniikalla tulostettaessa syötettävän langan muotoonsa kovettuminen saattaa muodostaa pintaan virheitä ja vaikuttaa skannatun pinnan tasaisuuteen. Umpinaisella täytöllä tehdyt kappaleet ovat tulosten mukaan onttoja kappaleita epätasaisempia ylä- ja alapinnoistaan. Kappaleiden suoruus, rinnakkaisuus ja suorakulmaisuus ovat puolestaan parempia B5 – B11 testipaloilla ja tulokset ovat lähellä A-kappaleiden mittoja.

Yhteenvedon voidaan sanoa, että tulostusmateriaalia suihkuttavalla tekniikalla ulkopinnoista saadaan tasomaisempia kuin lankaa pursottavalla tulostustekniikalla. Tasojen suoruudella ja geometrisyydellä ei ole yhtä suurta eroa, mutta tulokset ovat kokonaisuudessaan keskiarvoiltaan parempia Objet350:n mittapaloilla.

4.4.2 D50 x 10 mm testikappaleet

Kuviossa 10 on yhdessä työvaiheessa valmistettujen sekä täytöltään umpinaisten pyöreiden testikappaleiden halkaisijamittojen keskiarvot sekä virhepalkkeina ryhmäkohtaiset keskihajonnat.

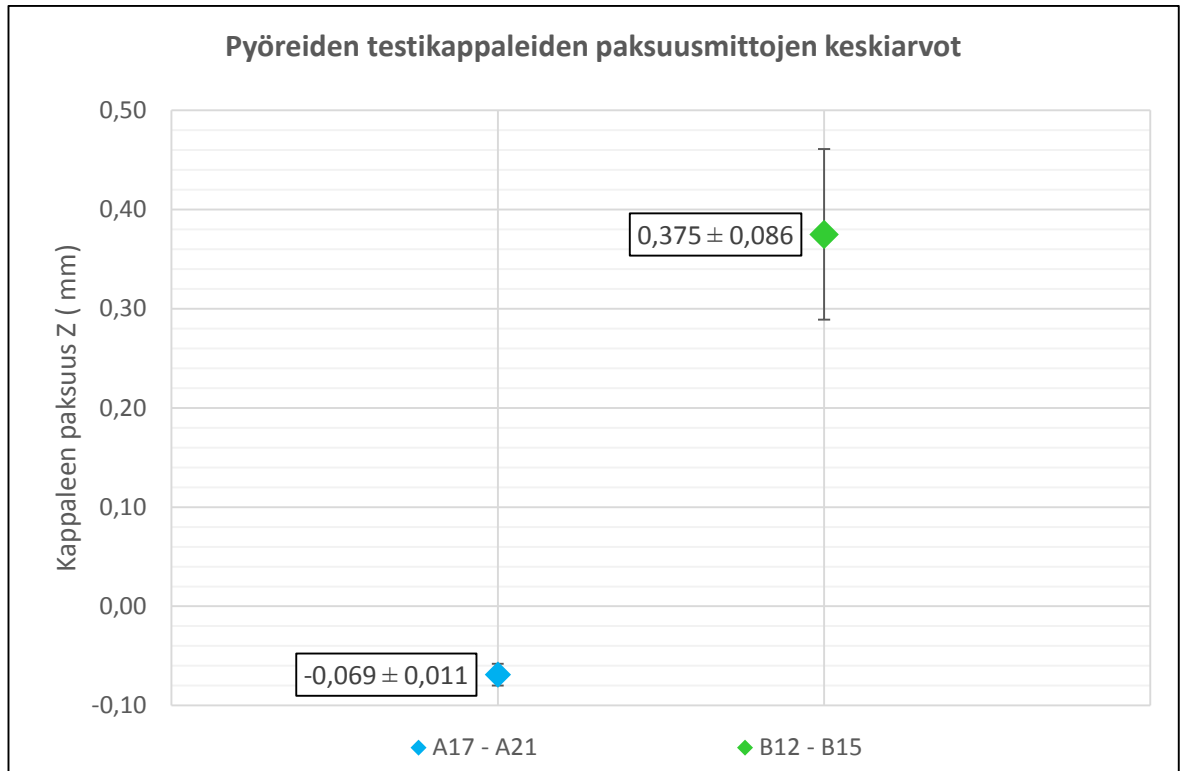


KUVIO 10. Pyöreiden kappaleiden d-suunnan mittaustulosten keskiarvot (liite 3)

Liitteestä 3 nähtävässä B12 – B15 kappaleiden ympyrämäisyyttä havainnollistavasta kuviossa nähdään, että halkaisijamittojen perusteella kappaleet ovat muodoltaan neliömäisiä ja suurin osa mitoista on tavoitemitan alapuolella (liite 3, 2). Soikiomaisiin A17 – A21 mittapaloihin verrattuna halkaisijamittojen keskiarvo on kuvion 10 mukaisesti kauempana tavoitteesta, mutta keskihajonnat ovat molemmilla ryhmillä lähes yhtä suuret.

Testiryhmien kappalekohtaisten tulokset vaihtelevat toisiaan muistuttavalla tavalla ja tulosten jakaumat ovat molemmilla hyvin samanlaiset, muodoltaan normaalijakautuneet ja keskittyneet muiden mitattujen suuntien tavoin keskiarvonsa oikealle puolelle. Ennustavat normaalijakaumien käyrät ovat hyvin loivia molemmilla suuren keskihajonnan vaikutuksesta. Kappaleiden B12 – B15 tuloksista 83 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja jopa 99 % mitoista on alueella $\mu \pm 2\sigma$. (Liite 3, 3–4.)

Seuraavassa kuviossa 11 on molempien testiryhmien pyöreiden mittapalojen paksuusmittojen keskiarvot sekä virhepalkkeina ryhmäkohtaiset keskihajonnat.



KUVIO 11. Pyöreiden kappaleiden z-suunnan mittaustulosten keskiarvot (liite 3)

Kappaleiden paksuusmitat ovat A17 – A21 kappaleilla lähes identtiset testiryhmän A1 – A8 kanssa. B12 – B15 mittapalat ovat samalla täytöllä tehtyjen suorakaidekappaleiden mittojen keskiarvosta vielä kauempana eli todella kaukana tavoitteesta. Muiden ryhmien paksuusmittojen tapaan Objet350:n kappaleiden hajonta on olemattoman pieni FDM-tekniikan mittapalojen hajontaan verrattuna. A-ryhmän kappalekohtaiset keskiarvot ovat hyvin lähellä toisiaan, kun taas B-ryhmällä vaihtelua on enemmän (liite 3, 5).

A-ryhmän mittojen jakauma noudattaa normaalijakauman käyräänsä, mutta B-ryhmän ennustava jakauma on tuloksiin nähden liian loiva keskihajonnan vuoksi. Molempien kappaleiden saadut tulokset ovat keskiarvojensa oikealle puolelle keskittyneitä ja muistuttavat muodoltaan normaalijakaumaa. Kappaleiden B12 – B15 tuloksista vain 80 % on alueella $\mu \pm \sigma$ ja 97 % mitoista sijoittuu alueelle $\mu \pm 2\sigma$. (Liite 3, 6.)

Pyöreiden mittapalojen geometrisyyttä tutkittiin skannaamalla kappaleiden pintojen tasomaisuutta, halkaisijoiden ympyrämäisyyttä sekä yläreunojen rinnakkaisuutta. Seuraavassa taulukossa 7 on esiteltynä molempien testiryhmien skannausten keskiarvot.

TAULUKKO 7. Kappaleiden A17 – A21 skannausmittausten tulokset (liite 3)

	A17 – A21	B12 – B15
Tasomaisuus (yläpinta)	0,017 mm	0,162 mm
Tasomaisuus (alapinta)	0,018 mm	0,054 mm
Rinnakkaisuus	0,026 mm	0,207 mm
Ympyrämäisyys (halkaisija)	0,163 mm	0,217 mm

Pintojen tasomaisuus on samaa luokkaa A-ryhmän kappaleilla kuin samassa työvaiheessa tulostetuilla suorakaiteilla. B-kappaleisiin verrattuna yläpinta on tasomaisempi, mutta B12 – B15 mittapalat ovat silti B-suorakaidekappaleita tasaisempia. Skannausten perusteella kappaleiden ympyrämäisyydessä on virheitä, mikä ilmeisesti johtuu halkaisijan ulkopinnan epätasaisuuksista, joita on B-testiryhmän kappaleilla enemmän valmistuslangan sijoittumisesta johtuen. Reunojen rinnakkaisuuksissa on ryhmien välillä suuri ero, joka saattaa myös johtua B-kappaleiden pinnan virheistä tai epätasaisesta kovettumisesta.

Taulukossa 8 on yhteenvetona molempien testiryhmien eri suuntien tavoitemittojen keskimääräiset muutokset ja keskihajonnat prosentteina. Taulukosta nähdään, että D-suunnan tavoitemitan keskimääräinen prosentuaalinen muutos on B-ryhmän kappaleilla kolme kertaa suurempi kuin Objet350:n kappaleilla. Tulosten hajonta taas on B-kappaleilla 0,2 % pienempi.

TAULUKKO 8. Pyöreiden testikappaleiden tavoitemitan muutos

	A17 – A21	B12 – B15
D	- 0,05 ± 0,11 %	- 0,15 ± 0,09 %
Z	- 0,69 ± 0,11 %	+ 3,75 ± 0,86 %

Z-suunnassa ryhmien muutosprosentit ovat huomattavan erilaiset, samaan tapaan kuin suorakaidemittapaloilla. B-ryhmän muutos on kuitenkin suorakaiteiden prosentuaalisia muutoksia suurempi, joka viittaa siihen, että kappaleiden muodolla on FDM-tekniikalla tulostettaessa enemmän vaikutusta paksuusmittoihin. Tämä johtuu ilmeisesti siitä, että materiaalilanka kovettuu pyöreän muodon tulostusvaiheessa vaihtelevammin kuin suihkutettava materiaalikerros. Vertailun perusteella pyöreitä muotoja tulostettaessa materiaalia suihkuttava tekniikka on langan pursotusta tarkempaa kappaleiden paksuussuunnassa.

4.5 Virhetarkastelu

Toleranssimittausten yhdenmukaisuutta kunkin liikesuunnan osalta tarkasteltiin osana tulosten analysointia, ja hajonnan määrä on mukana tavoitemitan muutosta havainnollistamassa. Kuten tulosten käsittelyssä havaittiin, kaikkien mitattujen kappaleiden tuloksista vähintään 80 % on yhden keskihajontaluvun päässä tulosten keskiarvosta. Muutamaa satunnaisvirhettä lukuun ottamatta saatuja tuloksia voidaan siis pitää yhdenmukaisina.

Koska tuloksista huomattiin, että kappaleiden mitoissa on systemaattinen virhe tavoitemittaan verrattuna, voidaan mittaustapaa kuvata hyväksi toistettavuudeltaan. Itse mittavälineen tarkkuus tapahtuneissa mittaolosuhteissa on $\pm 1,7 \mu\text{m}$, joka määrittää yksittäisen toistomittausarjan tulosten virherajat. Mahdollinen mittavälineestä johtuva virhe tuloksissa on kuitenkin vertailun kannalta niin pieni, että sitä ei oteta huomioon tässä tutkimuksessa, joka keskittyy tulostusmenetelmien tarkkuuden arviointiin.

Suurin tuloksissa näkyvien satunnaisten mittavirheiden aiheuttaja on mittapalojen pintojen epätasaisuudet. Tarkka laite havaitsee millin tuhannesosan virheet, joten epätasainen kohta mittapisteen kohdalla vaikuttaa tuloksiin suuresti. Tämän vuoksi virheen määrät on ilmoitettu kunkin suunnan osalta keskihajontana, jotta yksittäiset satunnaiset virheet eivät vääristä toleranssimittausten tuloksia.

Mittaukset toteutettiin tarkalla tietokoneohjatulla laitteella, mutta kappaleet kuitenkin kiinnitettiin mitattavaan asentonsa mekaanisesti. Kaikki kappaleet asetettiin samaan asentoon, mutta toistojen määrän seurauksena mittaustapahtuman aikana on saattanut tapahtua inhimillisiä virheitä. Jos esimerkiksi kiinnityksessä on tehty muutoksia tai nollapisteen asetus kappaleen pintaan ei ole täysin onnistunut, saattaa tuloksissa olla tämän seurauksena epätarkkuuksia. Satunnainen inhimillinen virhe on voinut tapahtua myös mittaustulosten käsittelyn aikana. Mittaustulokset ovat kuitenkin niin systemaattisia, että selviä inhimillisistä virheistä johtuvia poikkeamia ei tutkimuksissa havaittu.

5 KUMIMAINEN MATERIAALI

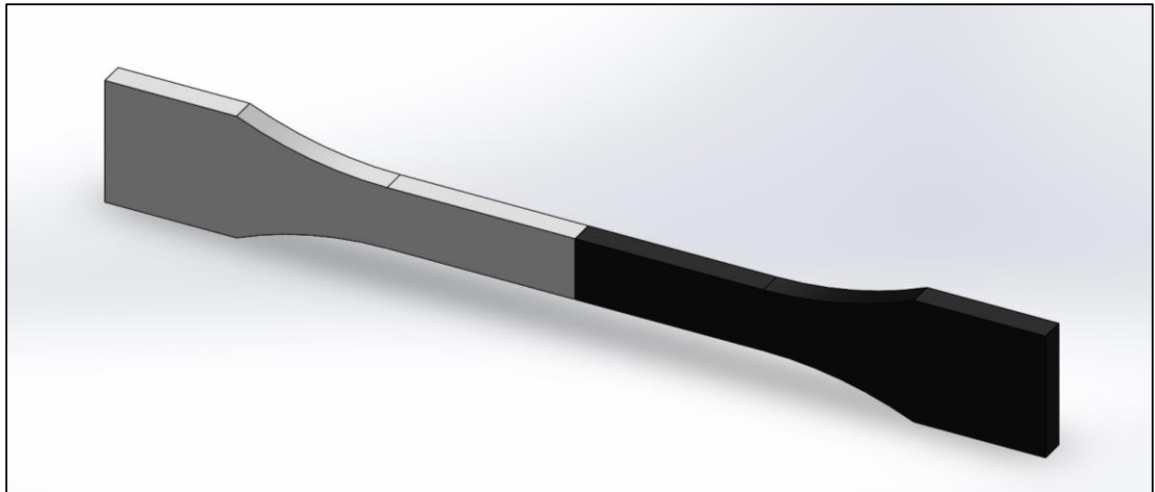
5.1 Vetokoe eri liitoksilla

Toisena tutkimuksen aiheena oli selvittää laitteen tulostustekniikan mahdollistavan kumimaisen materiaalin ominaisuuksia sekä käyttäytymistä käytännön testeillä. Käyttäytymistä tutkittiin selvittämällä mistä kohtaa ja millä voimalla kumimaisen ja kovan materiaalin liitostyytit katkeavat. Samalla tutkittiin myös kahden eri sekoitussuhteella tehdyn kumimaisen vetosauvan katkeamista. Havaitun käyttäytymisen perusteella arvioidaan myös kumimaisen materiaalin kestävyys tulevaisuuden robottikäden sovellustesteissä.

Liitosten tutkimista varten tulostettiin standardin ISO 527-2/1B/50 mukaisia vetosauvoja, joita vedettiin vetokoneella nopeudella 50 mm/min kunnes murtoraja saavutettiin. Tutkimuksen kohteena on sauvojen keskikohdan kolme symmetristä liitostyyppiä: päittäis-, vino- sekä sormiliitos. Vetosauvat ovat pituudeltaan 150 mm, ja tutkittavat liitoskohdat ovat 10 mm leveitä ja 4 mm paksuja. Tulokset esitellään erikseen jokaisen liitoksen kohdalla ja yhdistämistapoja vertaillaan toisiinsa.

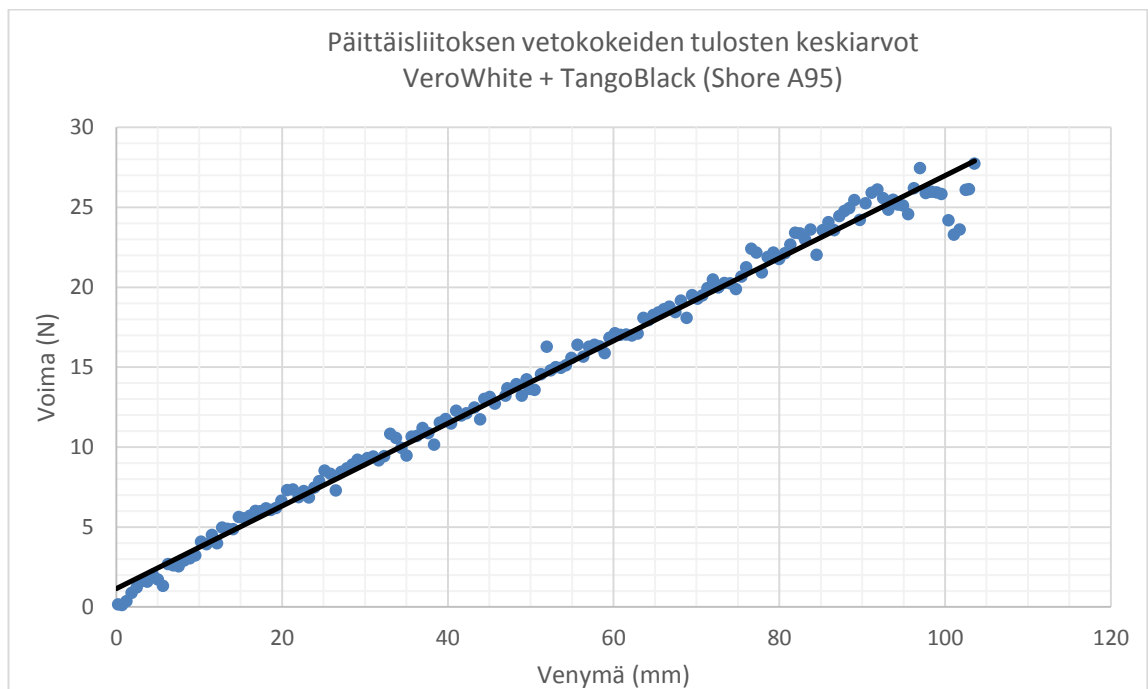
5.1.1 Päittäisliitos

Ensimmäinen tutkittava yhdistämistapa on yksinkertainen päittäisliitos (kuva 9), jossa materiaalien liitospinnat ovat tasaiset. Päittäisliitoksen toimivuutta kovan materiaalin kanssa testattiin kumimaisen materiaalin ääripäiden sekoitussuhteilla: Shore A95:n eli pehmeän kumin sekä Shore A40:n eli kovan kumin seoksilla. Lisäksi liitosta kahden kumin välillä tutkittiin yhdistämällä edellä mainitut kumiseokset yhdeksi sauvaksi.



KUVA 9. Vetosauva päittäisliitoksella (Laaksonen 2016)

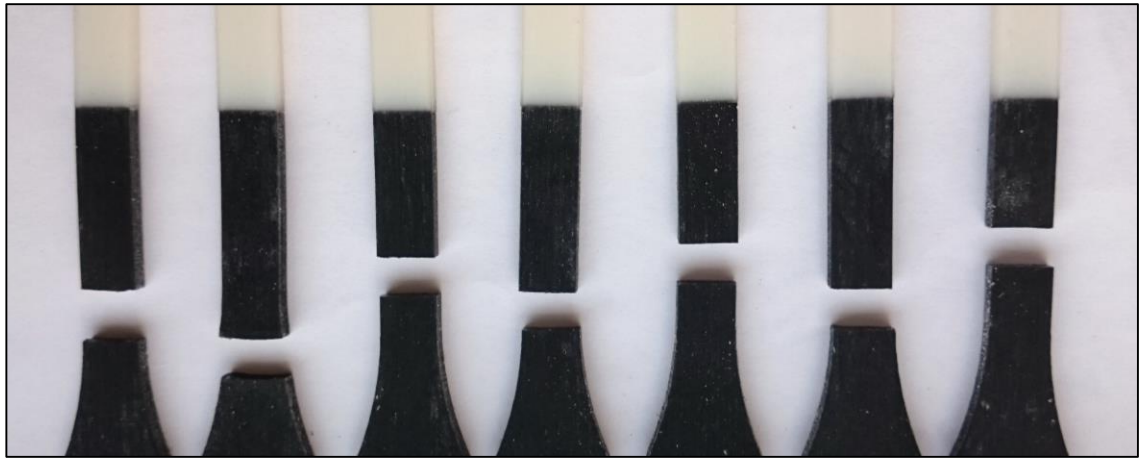
Kuviossa 12 on esitettyä kovan materiaalin (VeroWhite) sekä pehmeän kumimaisen materiaalin (TangoBlack) vetosauvojen katkeamiseen vaadittu voima venymän funktiona. Kuvaajassa on käytetty seitsemän mattapintaisen vetosauvan tulosten keskiarvoja.



KUVIO 12. Päittäisliitoksen vetokokeiden tulokset (Shore A95)

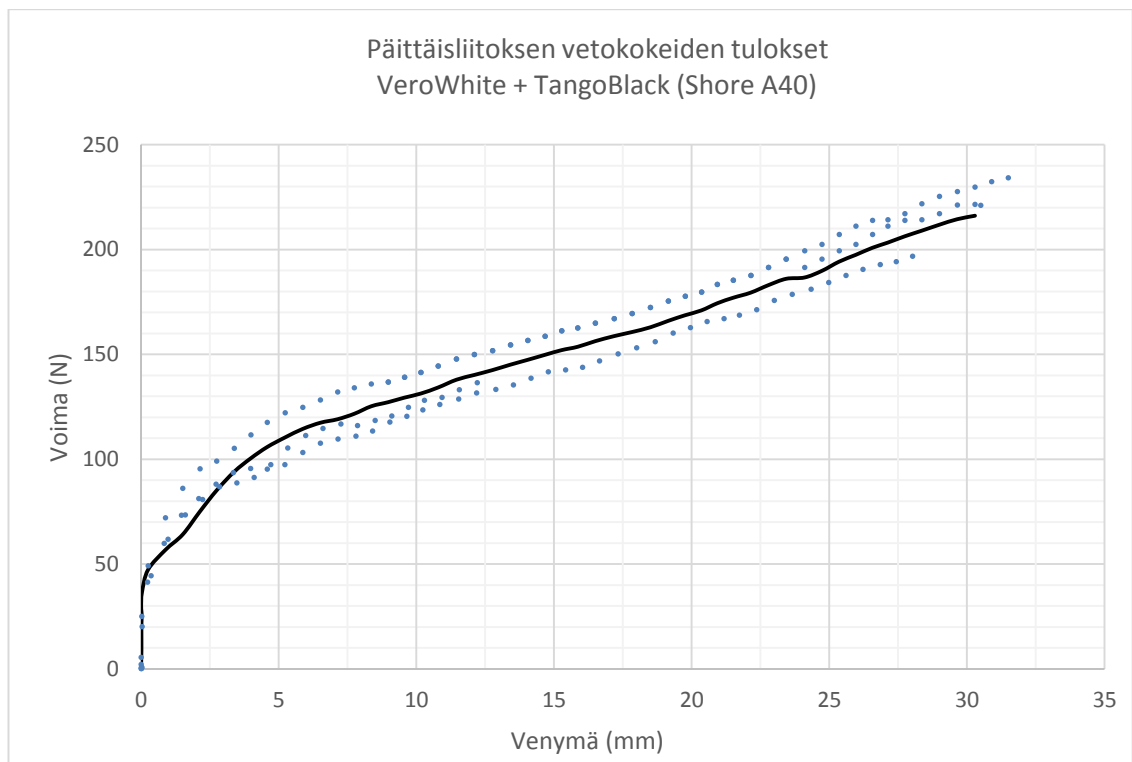
Vetosauvat venyivät keskimäärin 90 mm ja katkeamiseen tarvittiin keskimäärin 26 N voimaa. Kaikkien sauvojen kohdalla kova materiaali säilytti muotonsa kokeen ajan ja lineaarinen venyminen tapahtui kumimaisen materiaalin puolella. Murtuminen alkoi sauvan ohuelta reunalta suurimman pintaan tulleen vaurion kohdalta ja kaikki leikkaantumispinnat ovat vaakasuoria vetosuuntaan nähden sekä pinnaltaan kiiltäviä ja hieman epätasaisia.

Venytyksen jälkeen kappale palautui muotoonsa, mutta pintaan jäi pysyviä jälkiä vaurioitumisesta. Kuvasta 10 nähdään testikappaleiden katkeamiskohdat, jotka ovat vaihtelevasti noin 21 - 39 mm päässä liitoskohdasta.



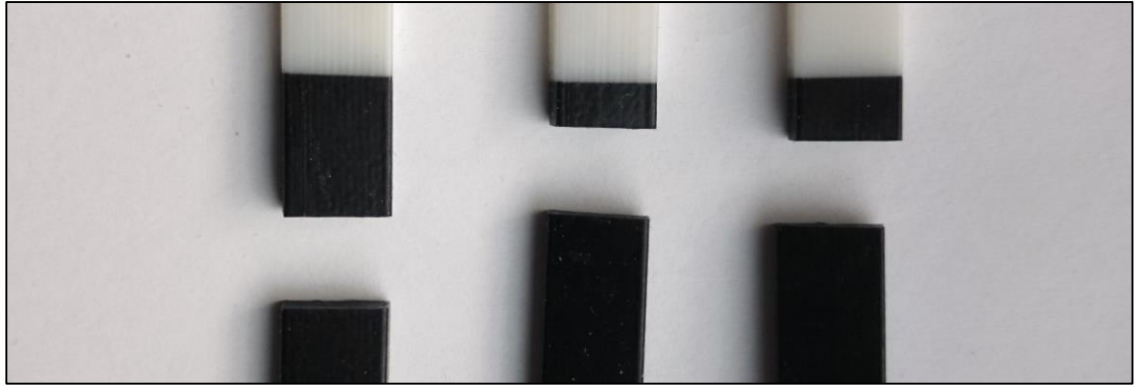
KUVA 10. Vetosauvojen murtumiskohdat (Laaksonen 2016)

Kuviossa 13 on nähtävissä kovan materiaalin sekä kovan kumin vetosauvojen katkeamiseen vaadittu voima venymän funktiona. Kuviossa on kolmesta kiiltäväpintaisesta vetosauvasta saadut tulokset sekä tulosten keskiarvo.



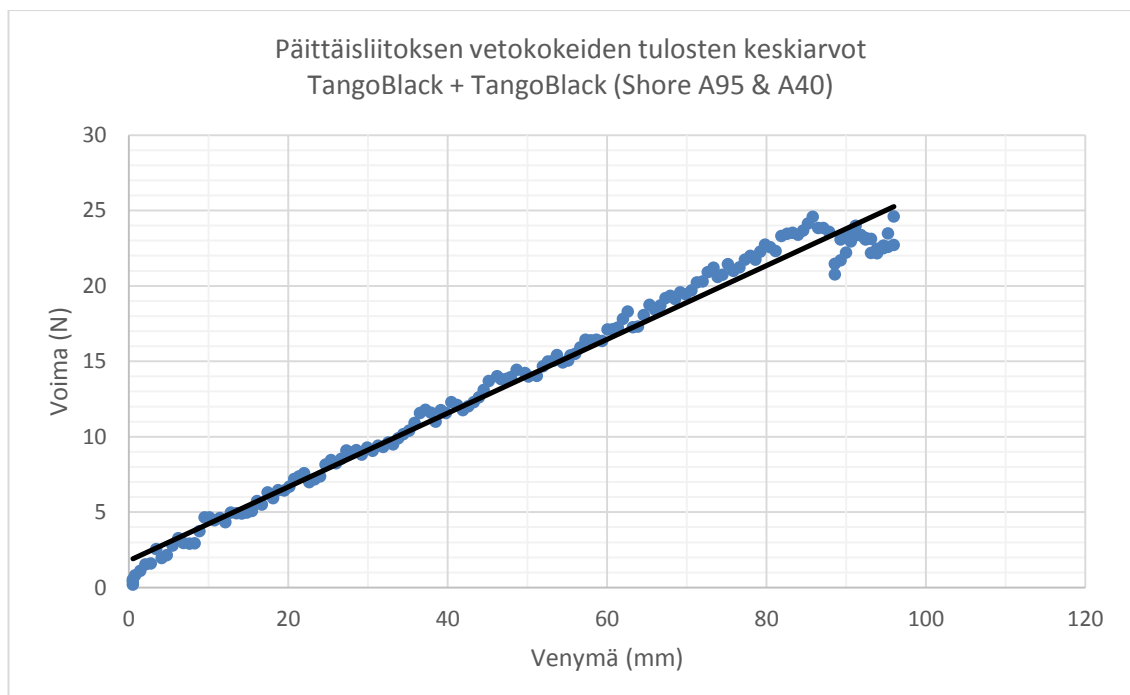
KUVIO 13. Päittäisliitoksen vetokokeiden tulokset (Shore A40)

Vetosauvat venyivät keskimäärin 30 mm ja katkeamiseen vaadittiin keskimäärin 217 N voimaa. Kuviosta 13 nähdään, että kova kumi vastustaa ensin muodonmuutosta, mutta alkaa lopulta venyä lineaarisesti. Sauvan murtuminen oli pehmeän kumin tapaan vaakasuorassa vetosuuntaan nähden, mutta kovan kumin leikkauspinta on vetoon käytetyn voiman vaikutuksesta repeytynyt tasaisemmin ja pinta on eri seossuhteen vaikutuksesta huokoinen. Kuvassa 11 näkyvät katkeamiskohdat ovat noin 4 – 13 mm päässä liitoskohdasta kumimaisessa materiaalissa.



KUVA 11. Vetosauvojen murtumiskohdat (Laaksonen 2016)

Kuviossa 14 on kahdesta kumiseoksesta valmistettujen vetosauvojen katkeamiseen vaadittu voima venymän funktiona sekä lineaarisuutta havainnollistava suuntaviiva. Kuvion tulokset on saatu seitsemän kiiltäväpintaisen sauvan keskiarvojen perusteella.



KUVIO 14. Päittäisliitoksen vetokokeiden tulokset (Shore A95 & A40)

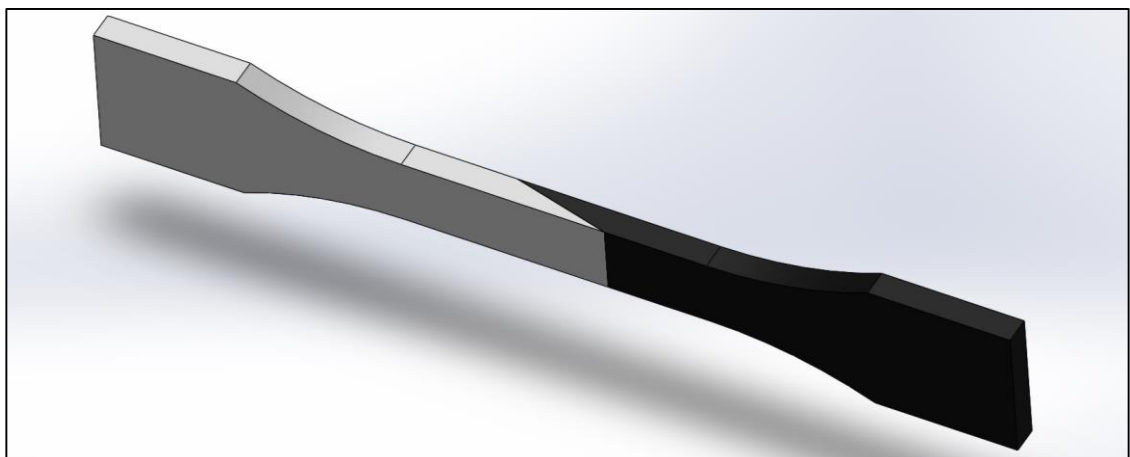
Kokonaan kumimaiset vetosauvat venyivät keskimäärin 85 mm ja katkeamiseen tarvittiin keskimäärin 24 N voimaa. Murtumistapa ja leikkauspinta ovat samanlaisia kuin kovan materiaalin ja pehmeän kumin sauvoissa. Kuitenkin kiiltävän viimeistelypinnan ansiosta kappaleiden ulkopintaan ei jäänyt yhtä paljon pysyviä jälkiä kuin mattapintaisiin. Kuvassa 12 näkyvät katkeamiskohdat vaihtelivat hyvin paljon muihin päittäisliitoksen sauvoihin verrattuna ollessaan 2 – 35 mm päässä liitoskohdasta.



KUVA 12. Vetosauvojen murtumiskohdat (Laaksonen 2016)

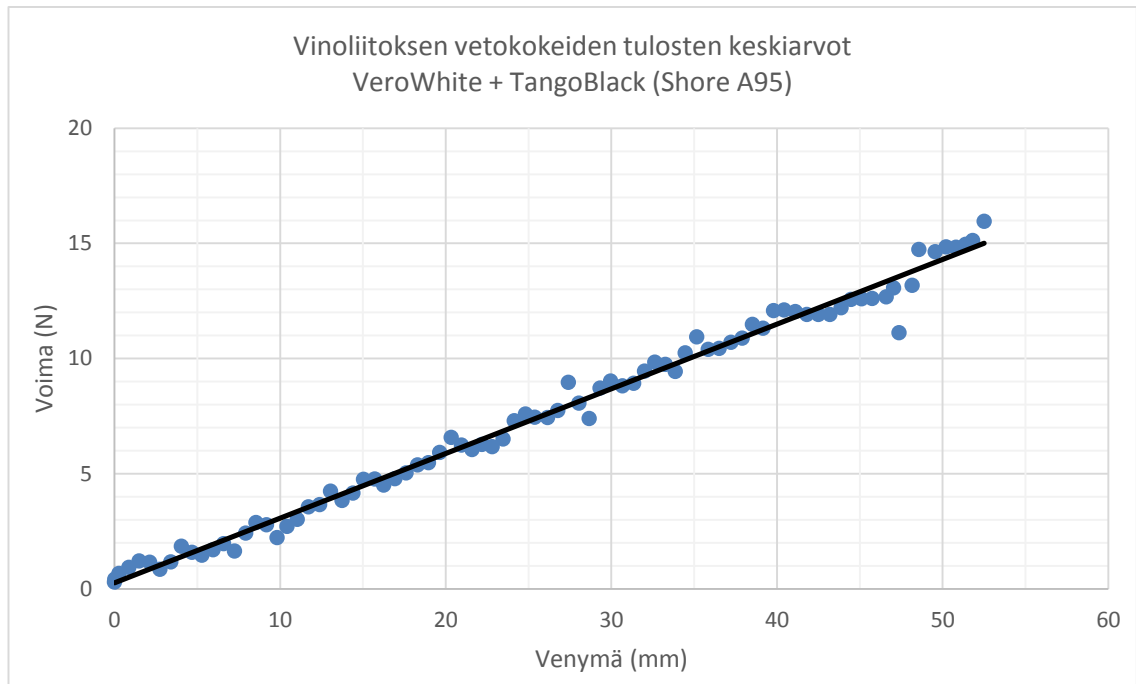
5.1.2 Vinoliitos

Seuraava tutkittava yhdistämistapa on vinoliitos (kuva 13), jossa materiaalien liitospinta-ala on päittäisliitosta isompi ja materiaalit ovat paksuussuunnassa päällekkäin. Vinoliitoksen toimivuutta testattiin kovan materiaalin sekä pehmeän kuminseoksen (Shore A95) vetosauvojen avulla.



KUVA 13. Vetosauva vinoliitoksella

Vinoliitoksen vetosauvojen katkeamiseen vaadittu voima venymän funktiona sekä tulosten lineaarisuutta havainnollistava suuntaviiva on esiteltyä kuviossa 15. Tulokset on saatu seitsemän kiiltävöpintaisen sauvan keskiarvoista.



KUVIO 15. Päittäisliitoksen vetokokeiden tulokset (Shore A95)

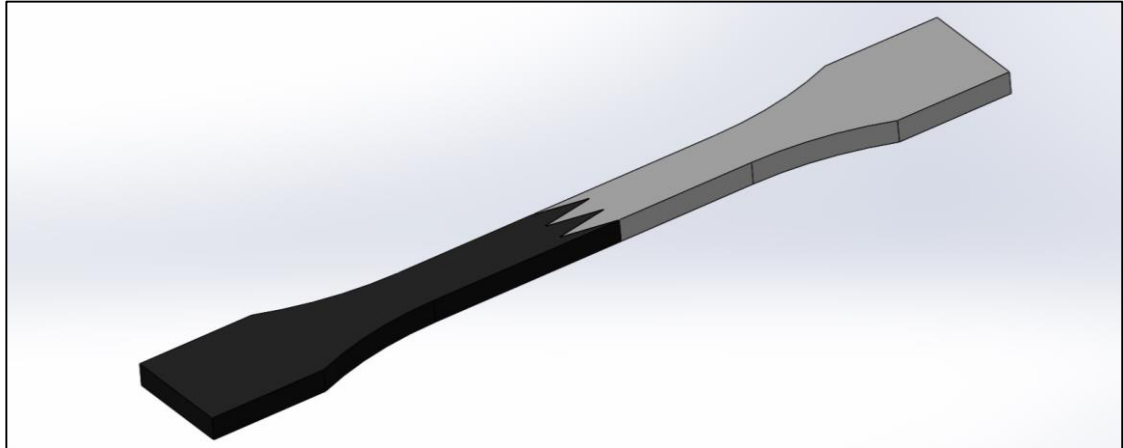
Vinoliitoksella yhdistetyt vetosauvat venyivät keskimäärin 50 mm ennen katkeamistaan, johon vaadittiin tulosten mukaan keskimäärin 14 N voimaa. Kaikki sauvat katkesivat pehmeän kumin puolelta ja murtumiskohta oli kaikilla yhdenmukainen. Katkeaminen alkoi kappaleen ohueen sivun siitä kohdasta, missä kova materiaali on ohuimmillaan ja muodostaa terävän reunan. Katkeamispinta on kiiltävä, epätasainen ja uramainen. Systemaattisesti katkenneiden vetosauvojen murtumiskohdat näkyvät kuvasta 14.



KUVA 14. Vetosauvojen murtumiskohdat (Laaksonen 2016)

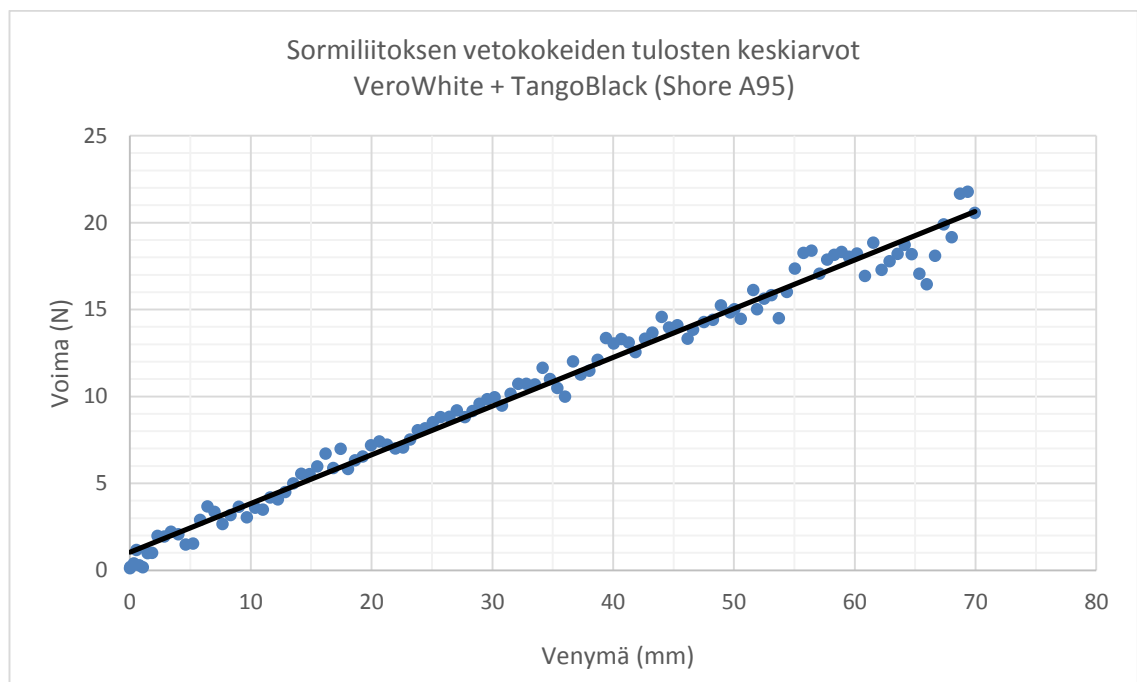
5.1.3 Sormiliitos

Viimeinen tutkittava yhdistämistapa on sormiliitos (kuva 15), jossa materiaalien liitospinnat ovat leveyssuunnassa limittäin. Sormiliitoksen toimivuutta testattiin kovasta materiaalista sekä pehmeästä kuminseoksesta (Shore A95) tehdyillä vetosauvoilla.



KUVA 15. Vetosauva sormiliitoksella

Sormiliitoksella yhdistettyjen vetosauvojen katkeamiseen vaadittu voima venymän funktiona sekä tulosten lineaarisuutta havainnollistava suuntaviiva on esitettyä kuviossa 16. Kuvion tulokset on saatu seitsemän kiiltäväpintaisen sauvan keskiarvojen perusteella.



KUVIO 16. Sormiliitoksen vetokokeiden tulokset (Shore A95)

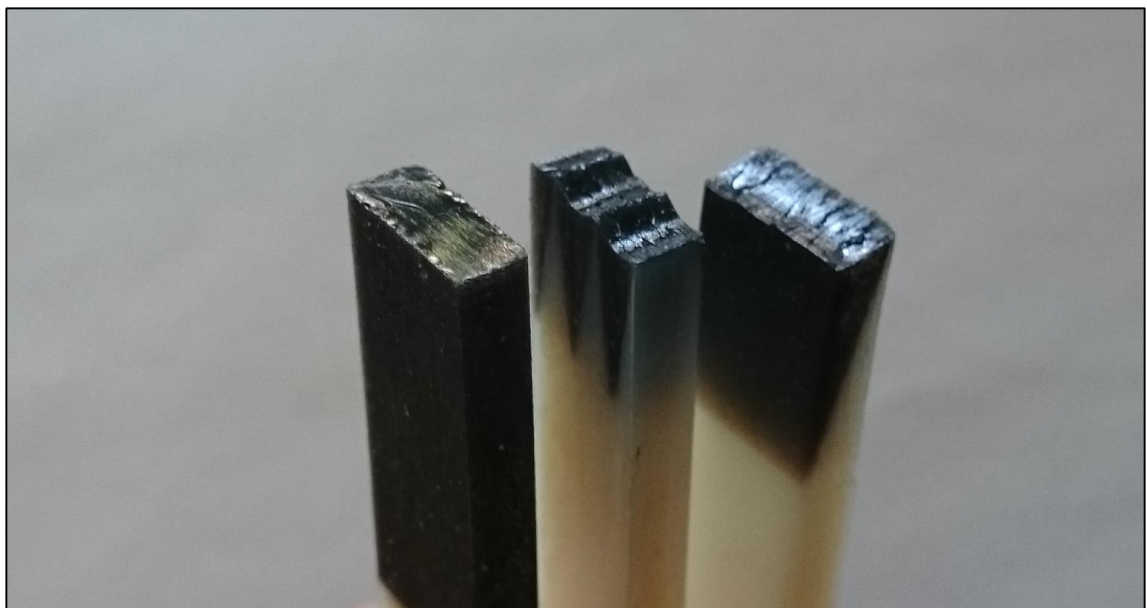
Sormiliitoksen vetosauvat venyivät tulosten mukaan keskimäärin 66 mm ja vaativat noin 21 N voimaa katketakseen. Sauvat katkesivat yhdenmukaisesti samasta kohtaa pehmeän kumin puolelta. Murtuminen alkoi samaan tapaan kuin vinoliitoksessa eli kovan materiaalin terävien reunojen kohdalta. Katkeamispinnassa on ”sormien” mukaiset urat ja pinta on kiiltävä sekä epätasaisesti repeytynyt. Sauvojen murtumiskohdat näkyvät kuvasta 16.



KUVA 16. Vetosauvojen murtumiskohdat (Laaksonen 2016)

5.1.4 Liitostyyppien vertailu

Kaikki liitostyyppit katkesivat toisiinsa verrattuna eri tavoilla. Kuvassa 17 on esiteltyä pehmeän kumimaisen materiaalin erilaiset katkeamispinnat tutkituilla liitoksilla. Taulukossa 9 on yhteenveto eri liitoksilla tehtyjen sauvojen vetokokeiden tuloksista.



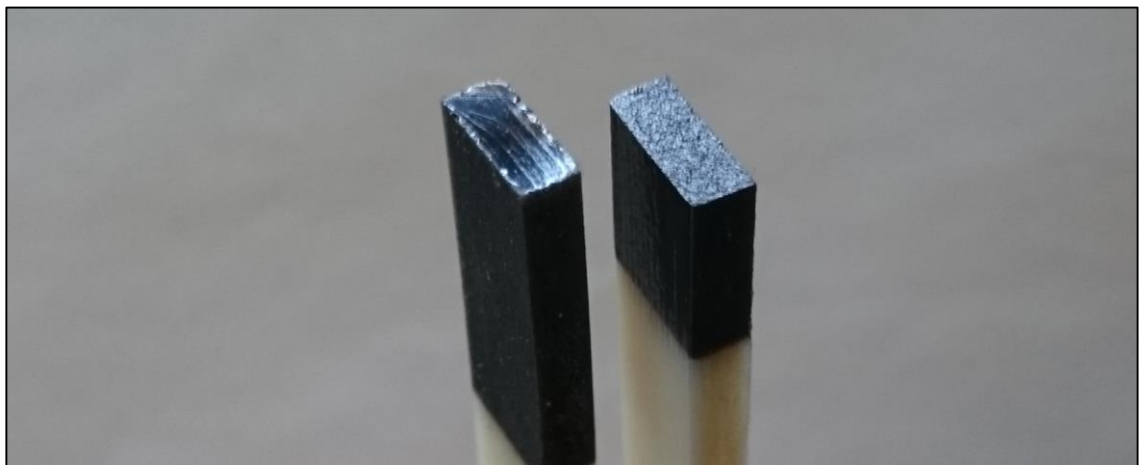
KUVA 17. Liitostyyppien erilaiset katkeamispinnat (Laaksonen 2016)

TAULUKKO 9. Vetokokeiden tulosten yhteenveto

Liitos	Päittäis (A95 / A40 / A95;40)	Vino (A95)	Sormi (A95)
Voima	26 N / 217 N / 24 N	14 N	21 N
Venymä	90 mm / 30 mm / 85 mm	50 mm	66 mm

Katkeamistapoja vertailemalla huomataan, että pehmeän kumin murtumistapa seuraa valkoisen kovan materiaalin reunojen muotoa. Päittäisliitos on katkennut tasaista liitospintaa seuraten suoraan ja pinta on samanlainen molemmilla testatuilla pinnanviimeistelyillä. Pehmeän kumin päittäisliitos vaati keskimäärin eniten voimaa katketakseen ja venyi eniten. Sormiliitos on revennyt kuoppamaisesti kolmen ”sormen” muotoja seuraten, katkeamiseen vaadittiin toiseksi eniten voimaa ja kumimateriaali myös venyi toiseksi eniten. Vinoliitos on revennyt sormiliitoksen tavoin kuoppamaisesti liitostaan seuraten, se vaati katkeamiseen vähiten voimaa ja myös venyi vähiten ennen murtumista.

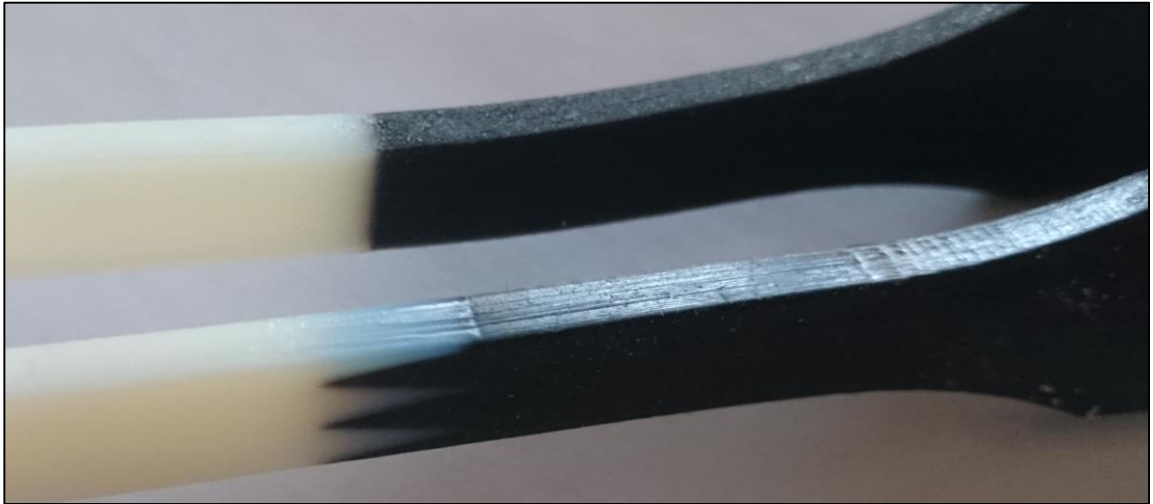
Eri seossuhteella tehdyt kovan kumiseoksen vetosauvat katkesivat myös suoraa liitospintaansa seuraten, mutta vaativat kovuutensa takia keskimäärin yli kahdeksankertaisesti enemmän voimaa katkeamiseen kuin pehmeä kumi. Kuvassa 18 on molemmilla seossuhteilla tehtyjen päittäisliitossauvojen leikkauspinnat, josta kuitenkin havaitaan, että katkeamiskohdan pinta on kappaleen koostumuksesta johtuen täysin erilainen eri ääripäiden seossuhteilla.



Kuva 18. Pehmeän kumin (vas.) ja kovan kumin leikkauspinnat (Laaksonen 2016)

Pehmeän kumin (Shore A95) kiiltävästä katkeamispinnasta näkyy selvästi materiaalikerrokset sekä murtumisen alkamiskohdan aiheuttamat epätasaisuudet. Kovan kumin (Shore A40) pinta on puolestaan tasaisen huokoinen ja kaikilla testisauvoilla hyvin suora.

Vetokokeita tehtäessä havaittiin, että myös pinnan viimeistelyllä on merkittävä vaikutus kumimaisen materiaalin repeämiseen. Kuvassa 19 on ylempänä tukiaineen avulla tehty mattapintainen vetosauva ja alla kiiltäväpintainen. Kiiltävän pinnanviimeistelyn sauvoissa työalustaa vasten ollut alapuoli on kuitenkin pakollisesti mattapintainen. Kuvasta nähdään mattapinnan huokoisuus sekä alemman vetosauvan pinnan epätasaisuuksista huolimatta yhtenäinen ja kiiltävä pinta.



KUVA 19. Kiiltävä ja matta pinnanviimeistely (Laaksonen 2016)

Kumimateriaalin tutkimisen perusteella mattapinta on yhdistävä tekijä vetosauvojen katkeamisissa, sillä kaikkien vetosauvojen murtuminen on alkanut pinnaltaan matasta kohdasta. Seuraavissa kuvissa 20 - 22 on havainnollistettuna kokonaan mattapintaisen pehmeän kumin sekä vain yhdeltä reunaltaan matan pehmeän kumin käyttäytymistapoja liitosten venytystilanteissa.



KUVA 20. Mattapintainen päittäisliitoksen sauva venytyksessä (Laaksonen 2016)

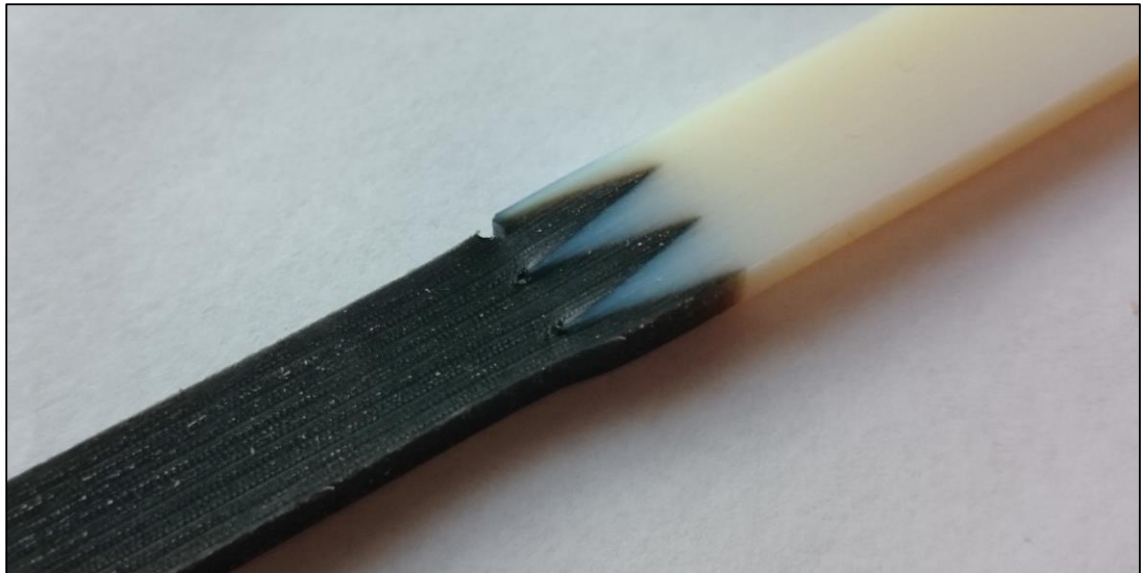
Kuten kuvasta 20 nähdään, kokonaan mattapintainen kumimateriaali repeilee huokoisen pintansa vaikutuksesta monesta kohtaa. Tämän vuoksi kyseiset sauvat venyivät eniten ja kestivät eniten venytysvoimaa, sillä kumin huokoinen pinta joustaa kaikilta reunoilta. Katkeamiseen johtanut repeäminen alkoi kaikilla sauvoilla yli 20 mm päästä liitoksesta, joten kovan ja kumimaisen materiaalin päittäisliitos osoittautui itse kumimateriaalia vahvemmaksi mattapintaisilla kappaleilla.



KUVA 21. Kiiltäväpintainen päittäisliitoksen sauva venytyksessä (Laaksonen 2016)

Kuvasta 21 nähdään, että venytystilanteessa kiiltävän sauvan mattaan alareunaan muodostuu ensimmäisenä repeämiä, joista lähtee liikkeelle sauvan katkaiseva murtuminen. Katkeaminen tapahtuu ennen kuin kiiltävään pintaan ehtii muodostua venytyksestä aiheutuvia pysyviä muodonmuutoksia. Näiden sauvojen katkeamiskohtat vaihtelivat testiryhmistä eniten ollessaan 2 – 35 mm päässä liitoksesta, joten alkamiskohta on todennäköisesti seurausta tukimateriaalin aiheuttamista satunnaisista epätasaisuuksista. Kappaleiden katkeamisten perusteella itse liitoskohta on mattasauvojen tapaan vahvempi kuin materiaali. Tulosten perusteella voidaan myös olettaa, että kokonaan kiiltäväpintainen veto-sauva venyisi enemmän ja kestäisi enemmän voimia, mutta katkeamiskohtaa ja -tapaa on vaikea ennustaa.

Kiiltäväpintaisissa sormi- ja vinoliitoksissa murtuminen alkoi kovan materiaalin terävän reunan kohdalta, mutta lähemmän tutkimisen perusteella huomattiin, että liitoksen tyyppistä riippumatta katkeaminen alkaa tarkalleen mattapintaisen alapinnan puolelta. Kuvassa 22 näkyy sormiliitoksen katkeamiskohtan alkaminen sauvan alareunassa, ja siitä seuraten repeytyminen tapahtuu liitoksen terävien reunojen muodon mukaan.



KUVA 22. Katkeamisen alkamiskohta sormiliitos-sauvan alapinnassa (Laaksonen 2016)

Vinoliitoksen murtuminen tapahtui vastaavalla tavalla kappaleen matasta alareunasta. Toisinpäin tulostetuilla vinoliitos-sauvoilla, joissa mattapintaa ei olisi kovan materiaalin terävän reunan vieressä, saattaisi olla erilainen katkeamistapa kuin tässä tutkimuksessa on havaittu. Sormiliitokseen kappaleen kääntö ympäri ei vaikuttaisi, koska liitos on z-suunnassa symmetrinen. Tutkimusten perusteella nämä liitostyypit ovat terävien reunojen takia heikompia kuin itse materiaali. Kokonaan kiiltävät vetosauvat oletettavasti alkaisivat myös repeytymään samasta kohtaa, mutta voisivat kestää enemmän voimaa.

Valitettavasti kyseisen muotoisia kappaleita ei kuitenkaan voida valmistaa kokonaan kiiltäväpintaisina, koska muoto edellyttää tukimateriaalin lisäyksen vähintään yhdelle reunalle. Tutkimuksissa havaitun käyttäytymisen perusteella voidaan sanoa, että kumimateriaali kannattaa tulostaa kiiltävällä viimeistelypinnalla vetorasitusta vaativiin kohteisiin, jos tämä on kappaleen muodon puolesta mahdollista.

5.2 Virhetarkastelu

Vetokokeiden tarkoituksena oli keskittyä kumimateriaalin murtumistapaan, joten varsinaisia jännitys-venymäpiirroksia tai lujuuslaskentoja virheineen ei tässä tutkimuksessa selvitetty. Kokeiden avulla haluttiin selvittää karkeasti kumin repeämiseen vaadittava voima eri liitostavoilla. Vetokoneen avulla kappaleiden venytystilanne saatiin toistettua lähes samanlaisena useasti, jotta katkeamisen systemaattisuutta voidaan tarkastella.

Tuloksissa esitetyt kuvaajat vaadittavasta voimasta venymän funktiona on saatu suoraan vetokokeiden aikana tallennetusta datasta, ja tuloksissa on käytetty kunkin liitostyyppin vetosauvojen tulosten keskiarvoja. Kokeissa käytettyyn, suhteelliseen vanhaan, vetokoneeseen on lisätty tietokoneelle tallentava anturijärjestelmä, joka tallentaa saadut arvot sekunnin välein. Järjestelmän mittaustavan huomattiin olevan todella herkkä ja epätarkka varsinkin pehmeintä kumimateriaalia venytettäessä, joten datasta on karsittu venytystilanteen huomattavan poikkeavat arvot ennen keskiarvojen laskentaa. Sekunnin välein saadun mittausdatan pisteiden vaihteluväli oli todella suuri, joten saadut tulokset ovat suuntaa antavia. Juuri ennen katkeamista mitatut voimat olivat kuitenkin liitostavasta riippuen lähellä toisiaan, joten tuloksia voidaan pitää suhteellisen luotettavina.

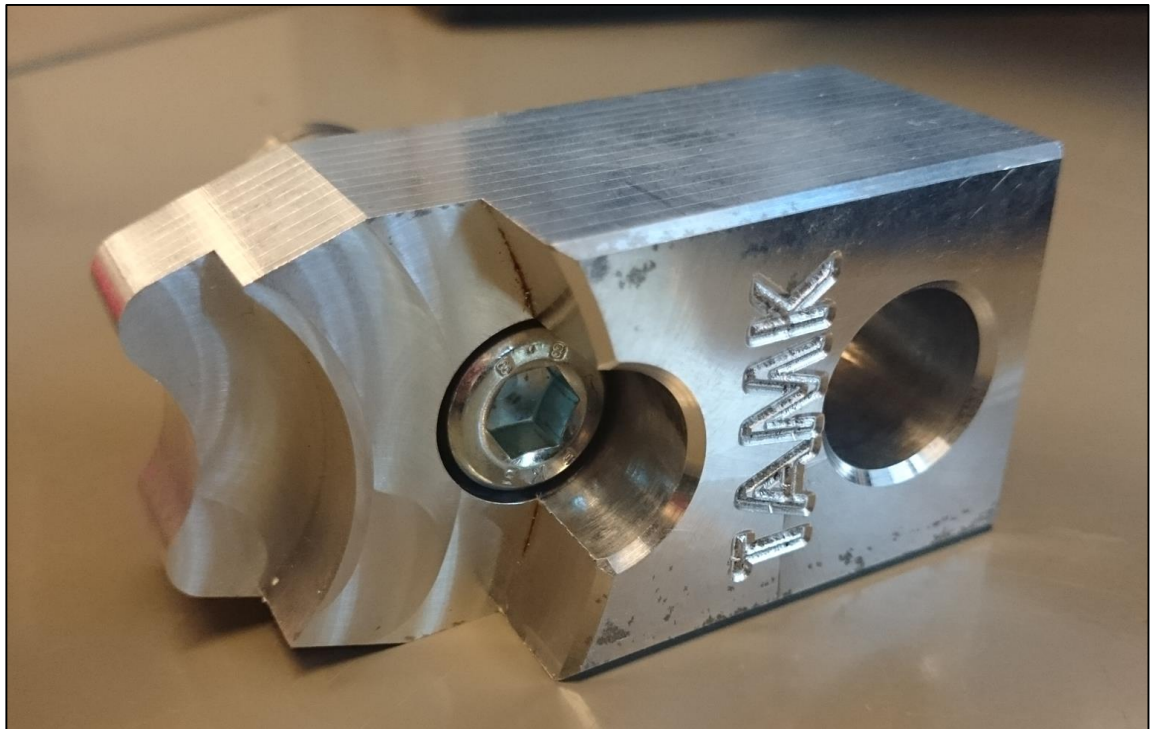
Virhettä saatuihin tuloksiin tuo osaltaan laitteen tallentaman datan epätarkkuus, mutta myös sauvojen kiinnitystapa vetokoneeseen. Sauvojen päiden kiristäminen tehdään mekaanisesti ja kiinnityspinta-ala on sauvan kokoon nähden suuri, joten on mahdotonta saada jokaista sauvaa täsmälleen samaan asentoon tai kiinni täysin samalla kireydellä. Pehmeän kumin jousaessa kiinnitysvoimat saattoivat vaihdella hyvinkin paljon, joka vaikuttaa katkeamiseen vaadittavan venymisen määrään. Tästä syystä kuvaajissa esitetyt keskiarvot ovat vaihtelevimpia juuri ennen katkeamista, koska osa sauvoista katkesi jo aikaisemmin ja keskiarvojen laskentaan on jouduttu käyttämään pelkästään eniten venyneiden sauvojen tuloksia.

Myös tutkittujen sauvojen varsin pieni lukumäärä saattaa tuoda osaltaan virhettä tuloksiin. Katkeamistavan systemaattisuus havaittiin esimerkiksi vino- ja päittäisliitosten kohdalla, joten tulosten voidaan olettaa pysyvän samanlaisina jos kokeita jatkettaisiin, mutta päittäisliitoksen katkeamiskohdat voisivat vaihdella hyvinkin paljon lisätestien myötä. Varsinkin kovan kumimateriaalin tulokset, joita oli tässä tutkimuksessa mahdollista tarkastella vain kolmen sauvan murtumisen perusteella. Jokaisen liitostyyppin tutkiminen seitsemän kappaleen perusteella antaa kuitenkin tarpeeksi luotettavaa tietoa, jotta tuloksia voidaan yleistää ja olettaa käyttäytymisen toistuminen.

5.3 Sovelluskokeilu

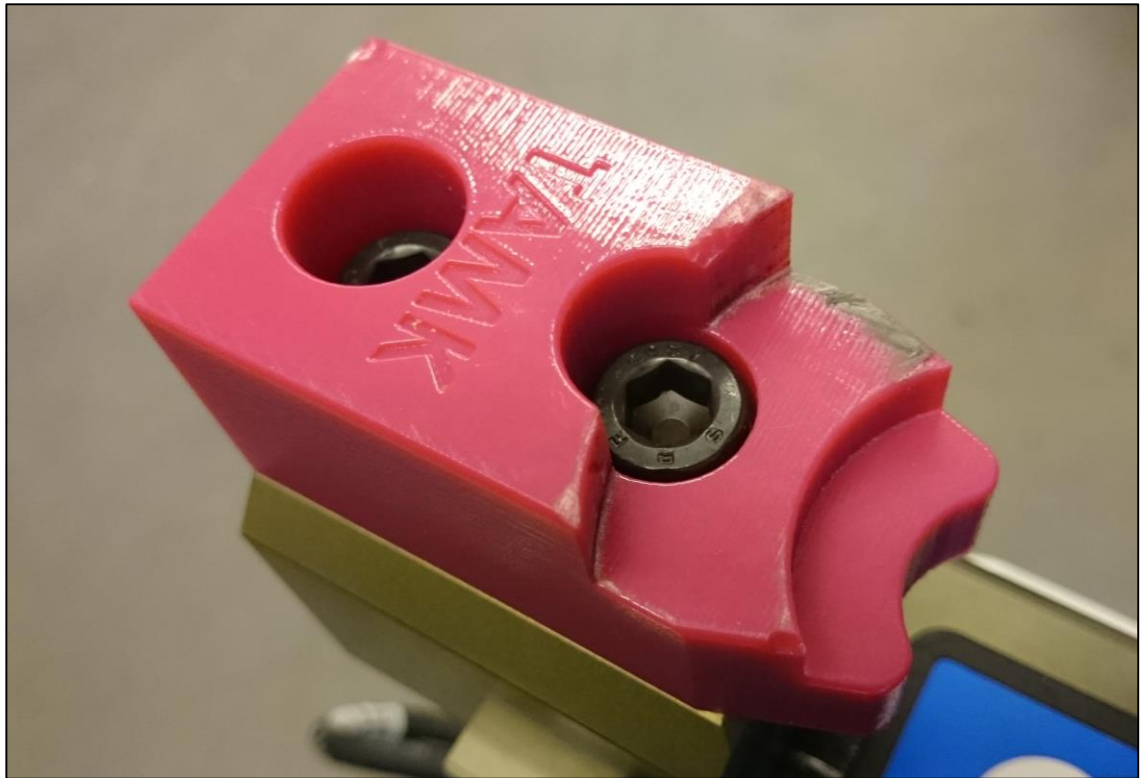
5.3.1 Alkutilanne

Vetokokeissa havaittujen tulosten perusteella kumimaisen materiaalin käyttäytymistä arvioidaan hypoteettisesti sovelluskokeilua varten tulostettujen kappaleiden avulla. Sovelluskokeilut on tarkoitus toteuttaa Tampereen ammattikorkeakoulun konetekniikan laboratoriotilojen robottikädellä. Kuvassa 23 on alumiinista koneistettu versio tutkittavasta tarttujan sormesta. Liittämällä kaksi kuvassa näkyvää kappaletta robottikäden tarttujaan, laitteella on mahdollista tarttua halkaisijoiltaan erikokoisiin lieriömäisiin kappaleisiin.



KUVA 23. Robottikäden tarttujaan koneistettu sormi (Laaksonen 2016)

Kappaleen monimutkaisuudesta johtuen koneistus vaatii paljon työtunteja, ja tarvittavien mittojen muuttuessa täytyy koneistaa lisää uusia kappaleita. Tästä syystä metallintyöstö päätettiin korvata käytettävissä olevalla tulostustekniikalla. Kuvassa 24 näkyy aikaisempi versio 3D-tulostetusta kappaleesta, joka on valmistettu FDM-tulostustekniikalla. Toimivuutta on testattu käytännön testeillä.

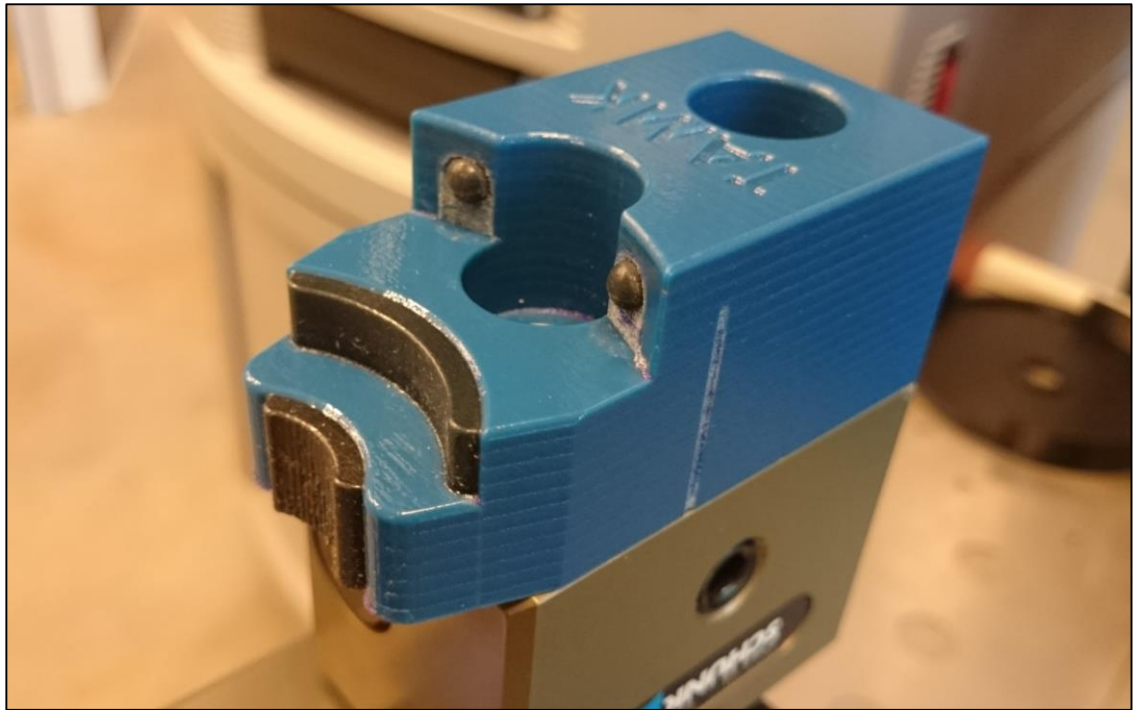


KUVA 24. Aikaisempi versio tarttujaan tulostetusta sormesta (Laaksonen 2016)

Kuvasta huomataan, että muovista valmistettu kappale on tarttumistestien vaikutuksesta lohkeillut useasta kohtaa, joten todettu käyttöikä ei vastannut täysin valmistustekniikan vaihdosta saatavaa hyötyä.

5.3.2 Kumityynyillä suojattu kappale

Hankitun Objet350:n tulostusmahdollisuuksien myötä tarttujaan kiinnitettävät sormet suunniteltiin uusiksi siten, että tarttuminen ei rikkoisi kappaleen kovaa materiaalia. Kuvassa 25 näkyy uusi robottiin liitettävä kappale, jonka kolmeen tartuntapintaan on lisätty erimuotoisia kumimateriaalista tulostettuja suojatyynyjä. Kumin tarkoituksena on toimia vaimentimena iskuille sekä osaltaan lisätä tarttujan ja tartuttavan kappaleen välistä kitkaa.



KUVA 25. Robottikäden tarttujan tulostettu sormi (Laaksonen 2016)

Halkaisijaltaan suurimpaan tartuntapintaan lisätyt kuminappulat ja keskimmäiseen pintaan lisätty koko reunan peittävä kumityyny on liitetty kovaan materiaaliin sisärakenteen liitosta hyödyntäen. Kumin kiinnittymistä on pyritty vahvistamaan kolmiulotteista lohennepyrstöliitosta muistuttavalla tavalla. Halkaisijaltaan pienimmän pinnan kumityyny on kiinni päittäisliitoksella kovan materiaalin ulkopinnassa. Kuminappulat on valmistettu kovasta kumiseoksesta (Shore A40), seuraava pinta hieman pehmeämmästä (Shore A50) seoksesta ja halkaisijaltaan pienin pinta vielä pehmeämmästä (Shore A60) kumista. Alemmissä kumityynyissä on kiiltävä viimeistelypinta, mutta tulostuksen aikana työalustaa vasten ollut kumin reunan on pakollisesti matta. Pyöreät kuminappulat vaativat tulostettaessa alapuolelleen tukiainetta, joten ne ovat osittain mattapintaisia.

Uuden kappaleen suunniteltu sovellustesti sisältää neljä vaihekokonaisuutta, joita aiotaan toistaa tarvittavaksi havaittu määrä jokaisella tartuntapinnalla. Testi alkaa siten, että robotti tarttuu sormien avulla pöydällä olevaan metalliseen lieriöön ja nostaa sen ylös. Seuraavaksi käsivarsi kääntää lieriön vaakatasoon ja alkaa ranneosan liikeradan mukaisesti pyörittelemään lieriötä edestakaisin. Tämän jälkeen käsivarren asentoa siirretään 90° vaakatasossa ja sama pyörittely toistetaan. Lopuksi lieriö lasketaan takaisin pöydälle ja päästetään irti. Kuvatun sovelluskokeen avulla saadaan testattua muodoltaan erilaisten kumiosien kestävyys eri suuntien rasituksessa.

5.3.3 Toimivuuden arviointi

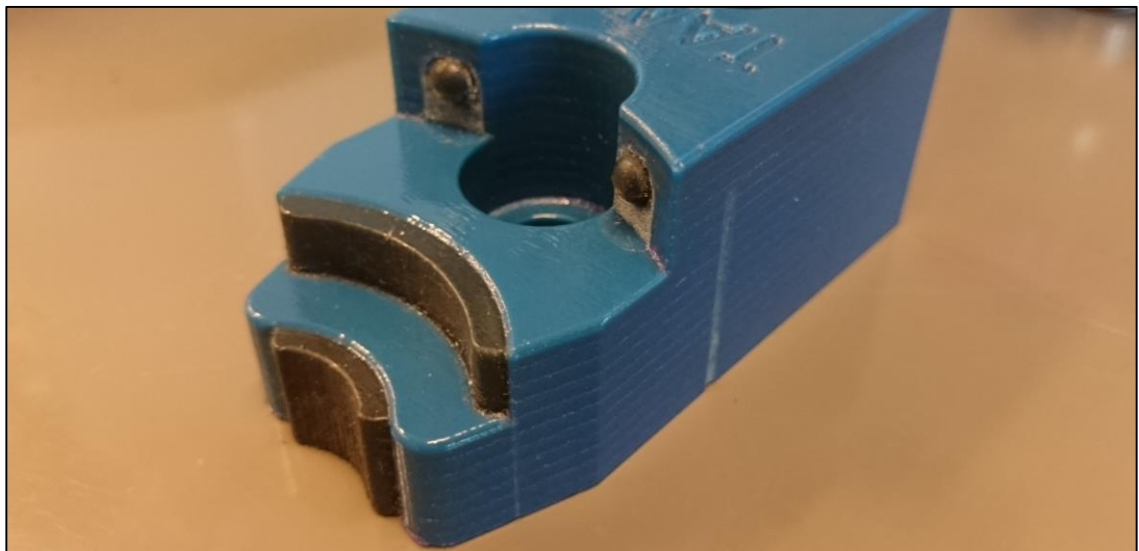
Aikaisemmin käsitellyissä vetokokeissa havaittiin, että mattapintaisuus heikentää tulos-
tetun kumin kestävyyttä, joten saman ilmiön voidaan olettaa tapahtuvan myös robotin
sovellustesteissä, jos rasituksessa saavutetut voimat ovat tarpeeksi suuria. Päittäisliitok-
sella kiinnitetty kumityyny saattaa alkaa repeytymään mattapintaiselta sivultaan, esimer-
kiksi pyörittelyvaiheen seurauksena tai lieriömäistä kappaletta nostettaessa ja alas lasket-
taessa. Samoin pyöreät kuminappulat, jotka ovat epäedullisesti juuri yläpuoleltaan mat-
tapintaisia, johon kohdistuu eniten vetoa nosto- ja laskuvaiheissa, saattavat repeytyä pin-
nanviimeistelyn vaikutuksesta. Osittain matat kumityynyt saattavat puristua myös eniten
kasaan matalta puoleltaan kun lieriöstä otetaan kiinni, ja tämän seurauksena haurastua
nopeammin puristusvaihetta useasti toistettaessa.

Pyöreiden kuminappuloiden sisärakenteeseen suunniteltu liitos vahvistaa materiaalin
kiinnittymistä, mutta saattaa myös edesauttaa pienen kumityynyn irti leikkaantumista.
Kokonaisuudessaan kuminappulan muoto muistuttaa lakillista sientä, jonka ohuin halkai-
sija on kovan materiaalin terävän reunan ympäröimänä. Kun tämä ominaisuus yhdistetään
vielä yläpuolen mattaan pintaan, saattaa nappulan näkyvissä oleva osa leikkaantua koko-
naan irti. Toisaalta kumin ollessa seossuhteeltaan kovinta mahdollista, irtoamiseen tarvi-
taan myös suhteellisen paljon voimaa. On myös mahdollista, että kovasta kumiseoksesta
valmistetut nappulat eivät käytettäessä puristu tarpeeksi kasaan, jolloin lieriömäisestä
kappaleesta ei saada kunnollista otetta liian pienen tarttumispinta-alan takia.

Keskimmäinen kiiltäväpintainen kumityyny toimii testeissä todennäköisesti parhaiten.
Suunnitellun muodon ansiosta keskimäinen tyyny on ainoa, joka saa tukea kahdesta
reunasta ja peittää koko tarttumiseen käytettävän pinta-alan. Lisäksi sisärakenteen liitos-
tapa vahvistaa kiinnittymistä entisestään. Koska kappaleen kiiltävä pinta jatkuu yhtenäi-
senä kovasta materiaalista kumipintaan, tyyny oletettavasti kestää parhaiten tarttumisvai-
heen puristumista sekä alaspäin vetäviä voimia. Tutkimuksissa havaitun käyttäytymisen
perusteella kiiltävän kumin mahdollista repeämistapaa on vaikea ennustaa, mutta hypo-
teettisesti heikoin kohta saattaa olla tyynyn ohuen sivun pitkä kiinnityspinta tai lyhyiden
reunojen suorat liitokset, jotka ovat kovan materiaalin terävän reunan vieressä. Jos kap-
paleeseen tarttuessa kumi puristuu paljonkin kasaan, saattaa kumin reuna alkaa irtoamaan
kovan materiaalin pinnasta ja toistojen seurauksena repeytyä tai lähteä irti palasina.

Halkaisijaltaan pienimmän pinnan kumityyny on seossuhteeltaan pehmein ja ainoa, joka on kiinni päittäisliitoksella. Vetokokeissa päittäisliitos todettiin toimivaksi liittämistä vaksi, mutta kokeissa veto tapahtui vaakasuoraan liitospintaa vasten. Robotin testeissä rasiutusta tulee tapahtumaan kaikista suunnista, joten mahdollisesti mattareunalta alkava repeäminen saattaa jatkua niin, että koko kumityyny lähtee liitosta pitkin irti. Oletettavasti kiiltävät liitospinnat kuitenkin kestävät hyvin ja saavat kumityynyn pysymään paikallaan. Tyynyn lyhyet sivut ovat kappaleen muodon ansiosta tylppää reunaa vasten, joten näiltä reunoilta repeytymistä tuskin tapahtuu kasaan painumisen seurauksena.

Jos kuvassa 26 nähtävät kumityynyt käyttäytyvät tulevissa testeissä ennustetuilla tavoilla ja sattuvat rikkoontumaan, on tyynyjen muotoa tarvetta vielä viimeistellä. Jos esimerkiksi pyöreät kumityynyt osoittavat merkkejä irti leikkaantumisesta, niiden tilalle voisi tulostaa esimerkiksi neliönmuotoisen tartuntapinnan mukaiset suojatyynyt. Tällöin pinnasta saisi oletettavasti kestävämmän, eli kokonaan kiiltävän, kun tukiaineelle ei ole tarvetta. Samalla tarttumiseen käytettävä pinta-ala saadaan yhtä suureksi kuin aiemmissa versioissa, jos testeissä havaitaan nappuloiden tarttumisen olevan riittämätön.



KUVA 26. Tarttujan sormien testattavat kumityynyt

Jos vaihtoehtoisesti keskimmäinen kumityyny irtoaa esimerkiksi lyhyiltä reunoiltaan, voisi kovan materiaalin terävät reunat pyöristää alimman kerroksen tavoin. Jos pyöreät nappulat on tarvetta korvata neliömäisillä tyynyillä, samantapainen pyöristys myös ylimpään terävään reunaan saattaisi olla kannattavaa. Jos taas alimman tyynyn päittäisliitos ei osoittaudu tarpeeksi kestäväksi, liitostavan voisi muuttaa kestävämmäksi sisärakennetta hyödyntäen.

6 YHTEENVETO JA POHDINTA

Työn tavoitteena oli selvittää koulun uuden 3D-tulostimen valmistusmenetelmän ominaisuuksia ja tulosten esittelyn avulla antaa tietoa kappaleiden suunnittelua varten. Tutkimusten avulla saatiin selvyys ilmenneisiin kysymyksiin tulostustarkkuudesta sekä kumi- maisesta materiaalista. Materiaalitutkimuksessa havaitun käyttäytymisen myötä selvisi myös lisää kappaleen kestävyteen vaikuttavia tekijöitä, kuin mitä alun perin oli tarvetta tutkia.

Tarkkuusmittausten avulla selvisi eri liikesuuntien todelliset tarkkuudet millimetreinä asetetun tavoitemitan prosentuaalisina muutoksina, ja mittaustuloksia vertailemalla nähtiin työalustalle asetelun vaikuttavan mittoihin. Selvitetyt tavoitemitan muutokset ovat kahdessa kolmesta liikesuunnassa valmistajan ilmoittaman tarkkuusalueen sisäpuolella, ja kahden työalueen kappaleet olivat tavoitemittaa lähempänä y- ja z-suunnissa. Materiaalin pursotukseen perustuvaan tulostustekniikkaan vertaamalla suihkutustekniikka osoittautui suorituskyvyltään tarkemmaksi ja samalla epätarkemmaksi riippuen tulostuksen liikesuunnasta. Mittausten perusteella selvisi myös, että FDM-kappaleiden täytöllä on merkittävä vaikutus tavoitemitan muutoksiin.

Molempien testiryhmien tutkimuksissa selvitettyihin tavoitemittojen muutoksiin saattaa osaltaan vaikuttaa se, että Stratasys yhtiö on amerikkalainen, joten tulostimet ohjelmistoinen on alun perin suunniteltu liikkeiltään optimaalisiksi tuumamitoille, brittiläiseen yksikköjärjestelmään perustuen. Kun metriin perustuvan SI-järjestelmän mukaan mallinnettua kappaleita tulostetaan, ohjelmiston täytyy muuttaa mitat keskenään sopiviksi. Tästä johtuen tulostuksen rakentuminen ohjelmatasolta kolmiulotteisiin liikkeisiin voi olla syynä tai osaltaan vaikuttaa siihen, että esimerkiksi A-testipalat eivät saavuttaneet valmistajan ilmoittamaa tarkkuusaluetta y-suunnassaan tai B-kappaleet z-suunnassaan.

Tässä työssä tarkasteltujen mittapalojen lisäksi tulostusmenetelmän tarkkuustutkimuksia voisi jatkaa mallintamalla samanmuotoisia testikappaleita käyttäen eri mallinnusohjelmaa. Tässä työssä tutkitut testipalat mallinnettiin Solidworks 2015 -ohjelmalla, ja pinnanlaaduksi asetettiin ohjelman tarkin mahdollinen kun tiedosto muunnettiin tulostimelle syötettävään STL-formaattiin. Tiedostomuoto muuttaa mallinnetun kappaleen tasokolmioksi ja kolmioiden kokoa pienentämällä tarkkuus kasvaa, joten eri mallinnusohjelmalla

kappaleiden pinnoista ja siitä seuraten mitoista voisi saada tarkempia. Eri ohjelmalla, jossa tasokolmioita saadaan luotua enemmän kappaleisiin, mallinnus todennäköisesti vaikuttaisi myös pintojen geometrisyyteen, joka näkyisi skannausmittausten tuloksissa.

Kumimateriaalia tutkimalla saatiin selville, että erilaiset liitokset katkeavat omalla tavallaan liitoksen muotoa seuraten. Kun koevetokappale on valmistettu kahdesta materiaalista siten, että toinen pää on joustavampaa ja toinen materiaali jäykempää, niin joustavampi materiaali venyy luonnollisesti enemmän. Koevetosauvaa kuormitettaessa kappale venyy pituussuunnassa ja kohtisuora poikkileikkaus pienenee. Liitoksen suurin jännitys keskittyy siihen kohtaan, missä on suurimmat venymät. Esimerkiksi tasaisen päittäisliitoksen sauvaa kuormitettaessa, joustavampi materiaali kokee teoriassa suurimmat venymät liitossauman kohdalla. Vaikka poikkileikkaus on suorakaiteen muotoinen ja teräviin kulmiin syntyy suuri leikkausjännitys, kumimateriaalin kiinnittyminen kovaan materiaalin todettiin kuitenkin kestävämmäksi kuin itse materiaali. Muut liitostyypit murtuivat terävien kulmien synnyttämien suurten leikkausjännitysten vuoksi.

Tarkoituksena oli tutkia lähemmin myös seossuhteen vaikutusta katkeamiseen, joka kuitenkin osoittautui tavoltaan samanlaiseksi molemmilla tutkituilla seossuhteilla, vaikka leikkauspinoissa olikin koostumuksesta johtuvia eroja. Sen sijaan tutkimuksessa havaittiin pinnanviimeistelyn vaikuttavan merkittävästi kumimateriaalin kestävyysasteeseen, koska kaikkien kappaleiden murtuminen alkoi mattapinnan kohdalta ennen kuin kiiltävä pinta ehti näyttää merkkejä repeämisestä. Tästä syystä tutkimuksia voisi jatkaa kokonaan kiiltäväpintaisten kumin ominaisuuksia tarkastelemalla. Vetosauvojen muodossa pinnanviimeistelyltään kiiltävää kumia ei voi tutkia tulostustekniikan rajoitusten takia, mutta tulostamalla liitoksia z-suunnassa sopivanmuotoisiin kappaleisiin, voisi kumimateriaalia tulostaa kiiltävänä ja tutkia liitosten murtumistapoja.

Sovellustesteissä käytettäviä kappaleita analysoimalla selvitettiin kumimateriaalin toimivuutta ja kestävyyttä rasisuhteesta vaativassa kohteessa. Vetokokeiden avulla tehdyn materiaalitutkimuksen perusteella tehtyjä hypoteeseja ei valitettavasti ehditty testaamaan käytännössä tiukan aikataulun vuoksi. Tarttujaan tulostettujen kappaleiden tutkimisessa saatiin kuitenkin hyvin hyödynnettyä aikaisemmin havaittuja kumimateriaalin ja tulostamistavan ominaisuuksia.

Menetelmätutkimuksen tavoitteet täyttyivät, mutta tulokset toivat osaltaan uusia kysymyksiä laitteen tulostustekniikan mahdollisuuksista. Tutkimuksesta saisi todella pitkän, koska sitä voisi jatkaa eteenpäin huomioimalla edellä mainitut muuttujat sekä analysoimalla tehtyjen muutosten vaikutusta ja havaittuja ominaisuuksia. Ehdotuksena on, että Tampereen ammattikorkeakoulussa jatkettaisiin tulostimen nestemäisten materiaalien tutkimusten toteutusta, ja myös tulevaisuudessa jatkuvasti kehittyvän tulostustekniikan mahdollisuuksien tutkimista käytännön testien avulla.

LÄHTEET

Capinc. 2016a. FDM Technology. Päivitetty 2016. Luettu 8.4.2016. <http://www.capinc.com/support/faq/3d-printing-faq/what-is-fused-deposition-modeling-fdm>

Capinc. 2016b. PolyJet Technology. Päivitetty 2016. Luettu 17.2.2016. <http://www.capinc.com/support/faq/3d-printing-faq/what-is-polyjet>

DeGarmo, E., Black, J. & Kohser, R. 2003. Materials and Processes in Manufacturing. Rapid prototyping and Freeform Fabrication. New Jersey: Wiley.

Gibson, I., Rosen, W. & Stucker, B. 2010. Additive Manufacturing Technologies. New York: Springer.

Höök, T. 2014. Polymeerimateriaalit. Julkaistu 1.4.2014. Luettu 21.3.2016. http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/mould_injmoulding_materials_FI.pdf

Mitutoyo. 2015. Crysta-Apex S Series. Julkaistu 4.2.2015. Luettu 4.4.2016. http://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2013/01/2097_CRYSTA_ApexS.pdf

Stratasys. 2016a. Connex3. Teknillinen erittely. Päivitetty 2016. Luettu 17.2.2016. http://www.stratasys.com/~//media/Main/Files/Machine_Spec_Sheets/PSS_PJ_Connex3.ashx

Stratasys. 2016b. PolyJet materials. Päivitetty 2016. Luettu 8.4.2016. <http://www.stratasys.com/materials/polyjet>

Stratasys. 2016c. Fortus250mc. Teknillinen erittely. Päivitetty 2016. Luettu 8.4.2016. http://www.stratasys.com/~//media/Main/Files/Machine_Spec_Sheets/PSS_FDM_Fortus250mc.pdf?la=en

LIITTEET

Liite 1. 50 x 40 x 10 mm testikappaleiden mittaustulokset (Objet350)

1 (7)

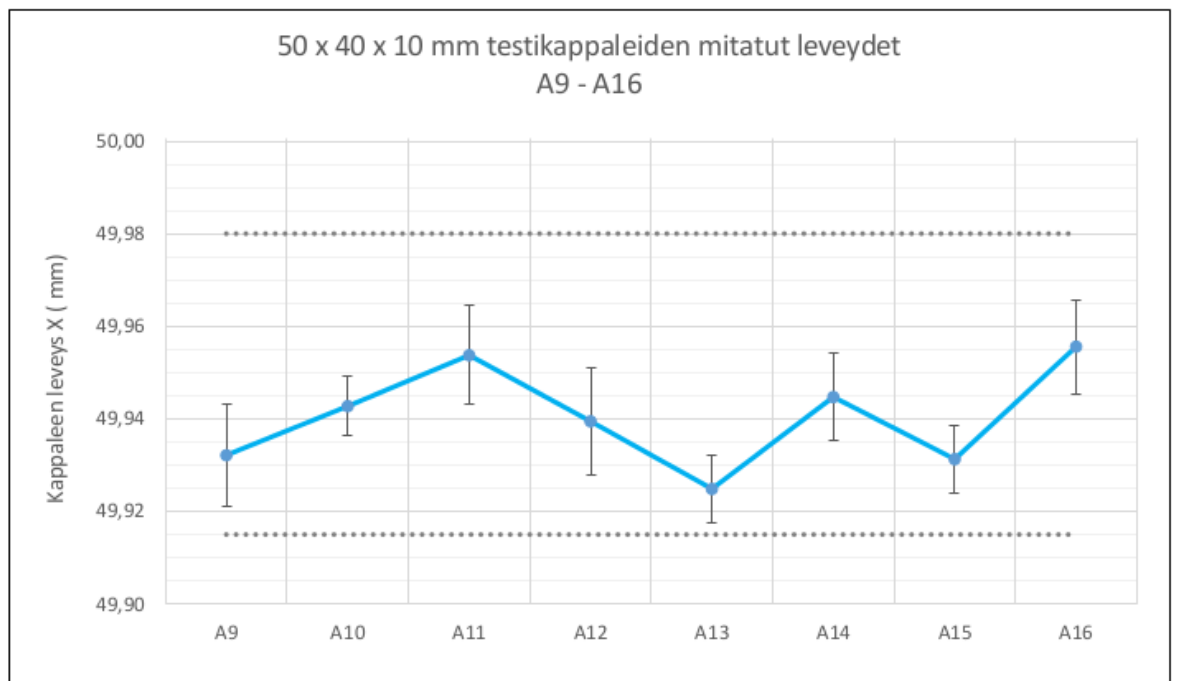
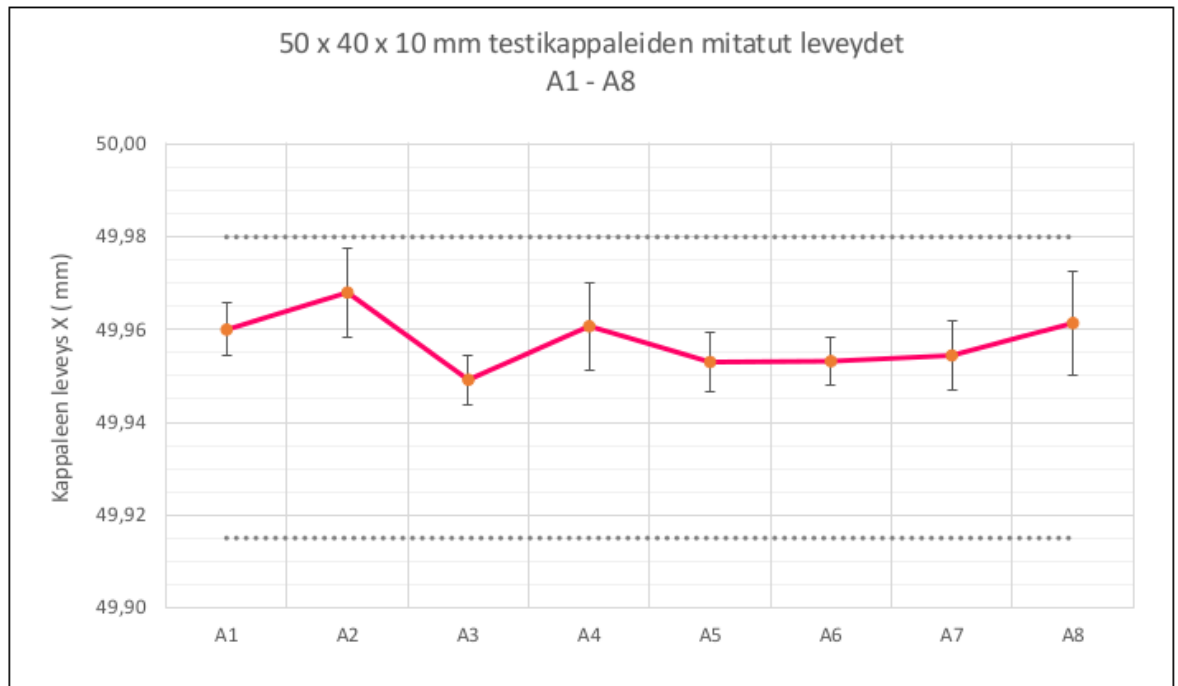
50 x 40 x 10 mm mittapalojen tarkkuusmittausten tulokset**Objet350 (A1 - A16):**

		A1 – A8	A9 – A16
	Työvaiheet	1	2
X	Tavoitearvo	50 mm	50 mm
	Tulosten keskiarvo	49,957 mm	49,941 mm
	Virheen keskiarvo μ	- 0,043 mm (- 0,09 %)	- 0,059 mm (- 0,12 %)
	Vaihteluväli	0,047 mm	0,060 mm
	Keskihajonta σ	0,009 mm (0,02 %)	0,013 mm (0,03 %)
	Mittapisteet	56 kpl	56 kpl
Y	Tavoitearvo	40 mm	40 mm
	Tulosten keskiarvo	40,146 mm	40,112 mm
	Virheen keskiarvo μ	0,146 mm (+ 0,37 %)	0,112 mm (+ 0,28 %)
	Vaihteluväli	0,161 mm	0,107 mm
	Keskihajonta σ	0,031 mm (0,08 %)	0,016 mm (0,04 %)
	Mittauspisteiden määrä	72 kpl	72 kpl
Z	Tavoitearvo	10 mm	10 mm
	Tulosten keskiarvo	9,934 mm	9,942 mm
	Virheen keskiarvo μ	- 0,066 mm (- 0,66 %)	- 0,058 mm (- 0,58 %)
	Vaihteluväli	0,049 mm	0,044 mm
	Keskihajonta σ	0,011 mm (0,11 %)	0,011 mm (0,11 %)
	Mittapisteet	48 kpl	48 kpl

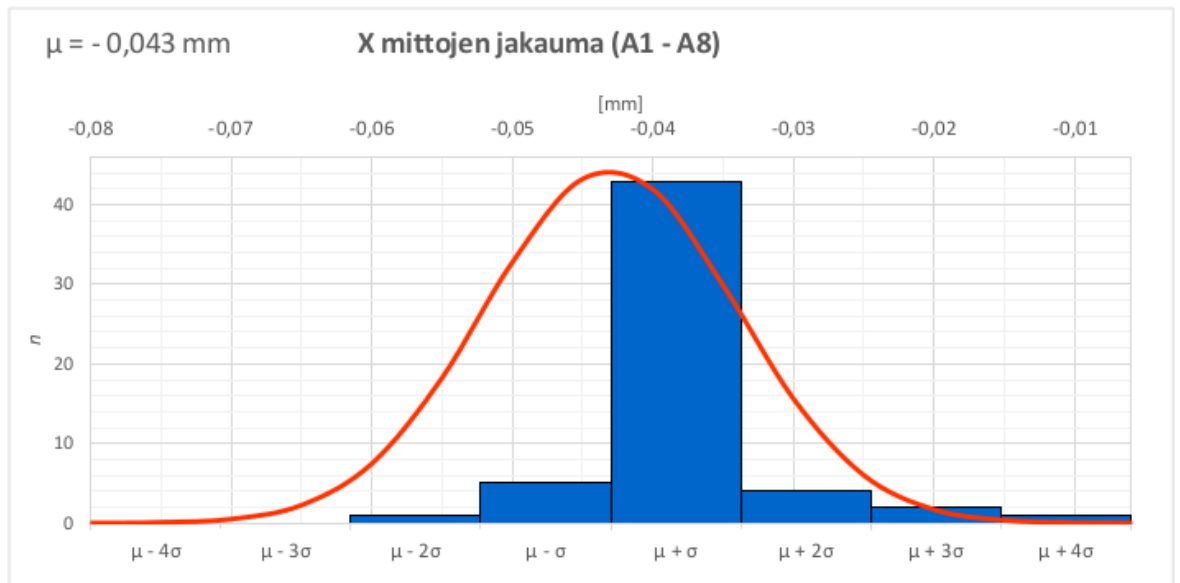
Valmistajan ilmoittama tarkkuus $\pm 0,02 - 0,085$ mm**Skannausmittausten keskiarvot:**

	A1 – A8	A9 – A16
Tasomaisuus (yläpinta)	0,021 mm	0,041 mm
Tasomaisuus (alapinta)	0,016 mm	0,024 mm
Suoruus	0,034 mm	0,034 mm
Rinnakkaisuus	0,042 mm	0,040 mm
Suorakulmaisuus	0,026 mm	0,033 mm

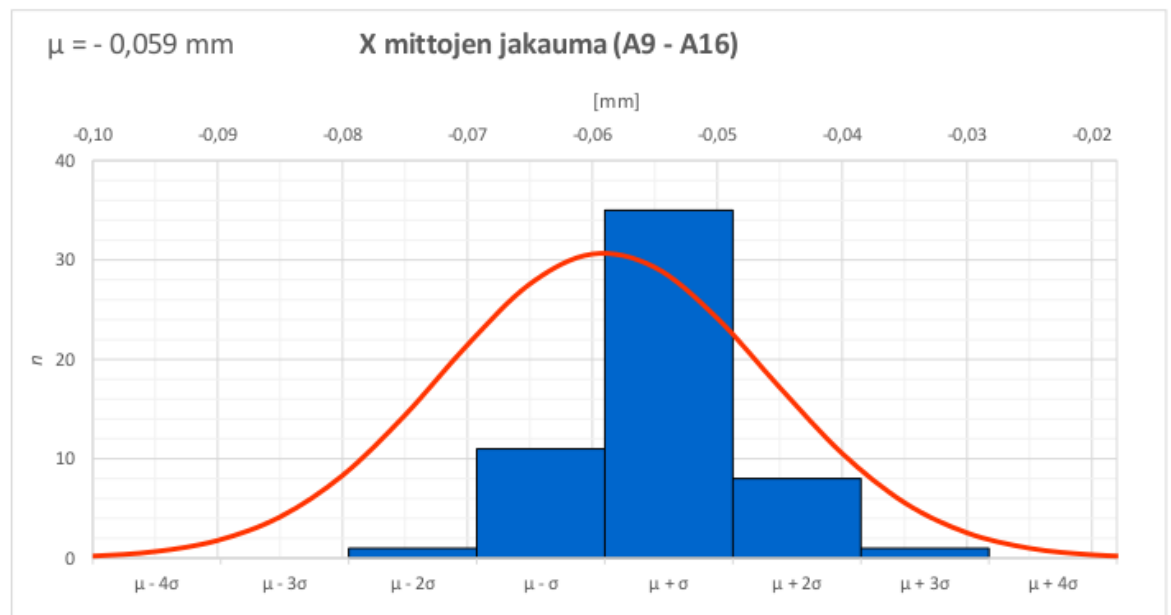
Mittapalojen A1 - A16 kappalekohtaiset leveysmitat sekä keskihajonnat



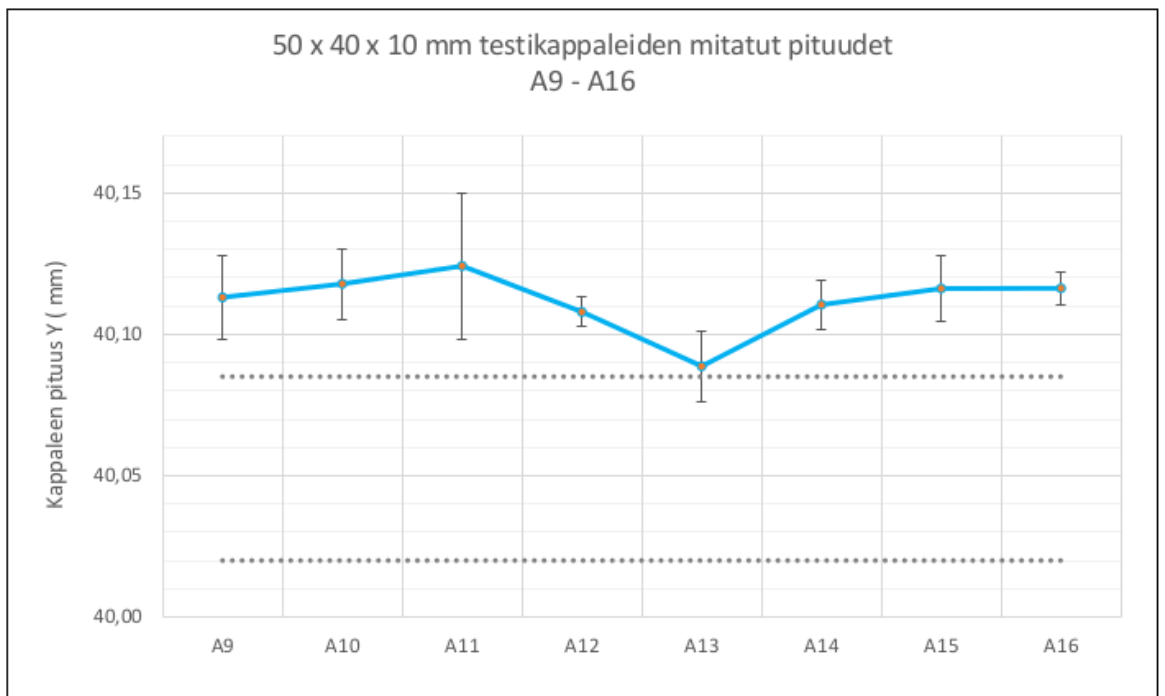
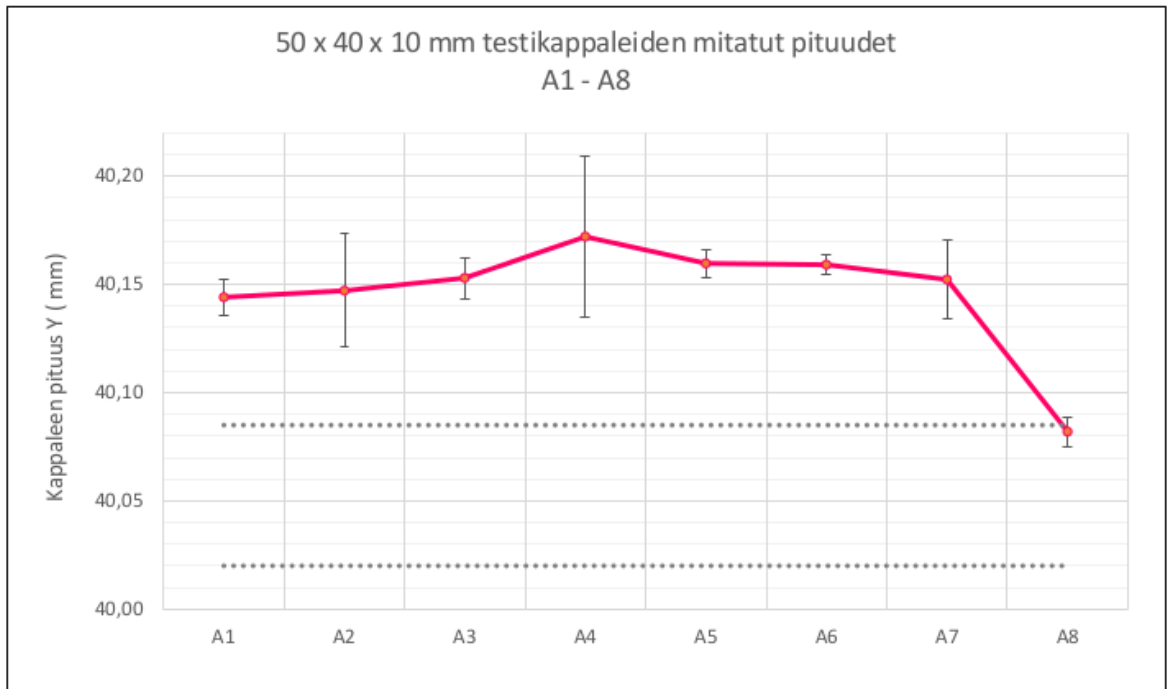
Leveysmittojen (50 mm) jakaumat



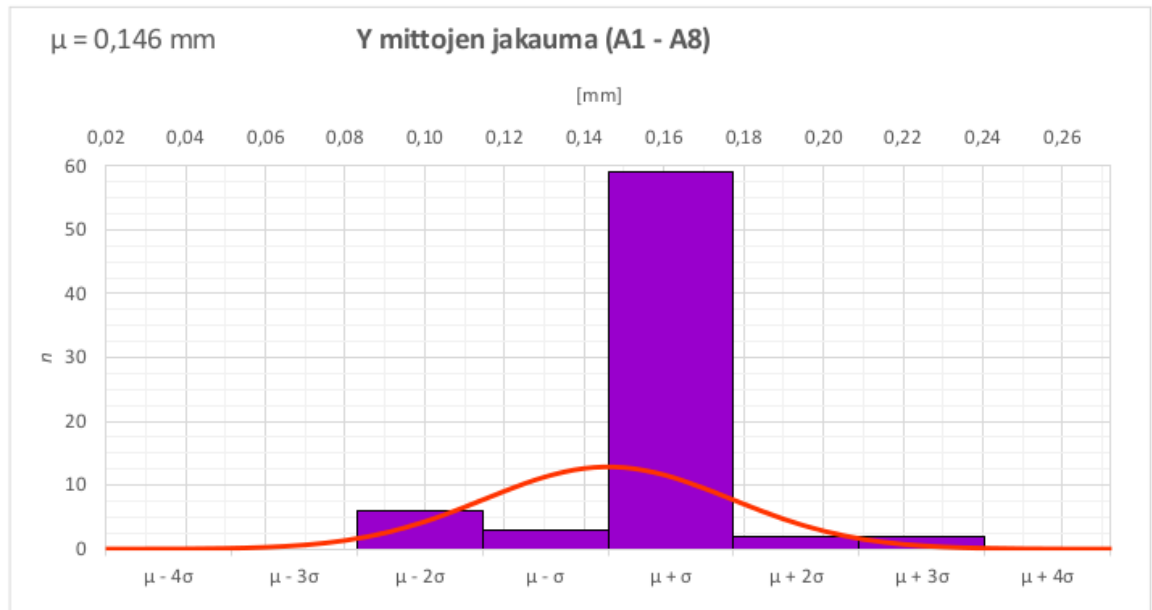
$\mu \pm \sigma$	86 %
$\mu \pm 2\sigma$	95 %
$\mu \pm 3\sigma$	98 %
$\mu \pm 4\sigma$	100 %



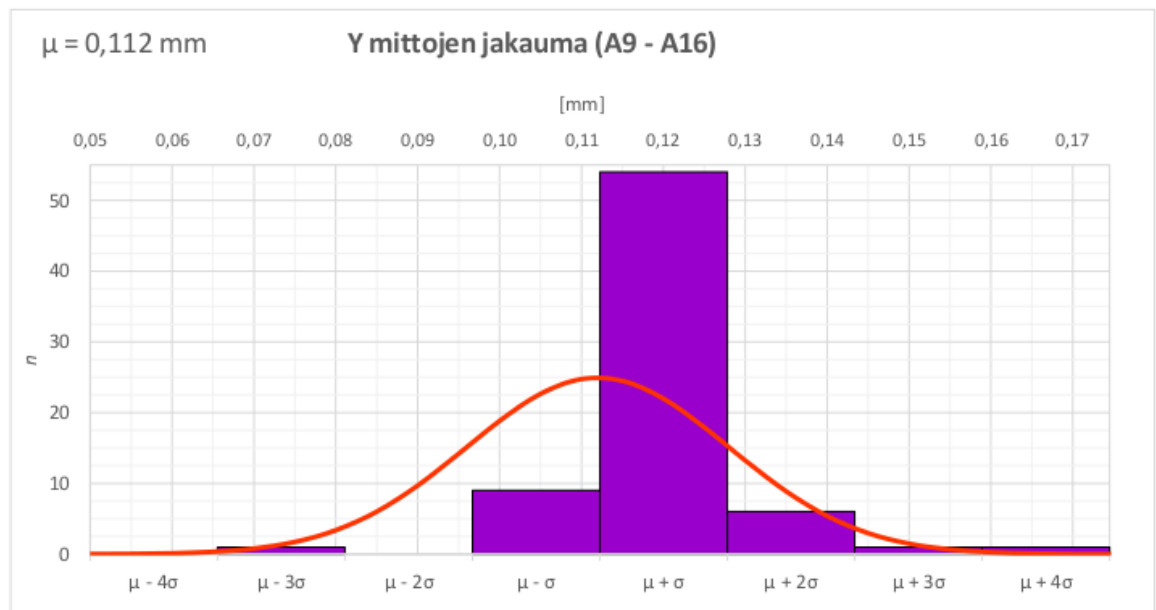
$\mu \pm \sigma$	82 %
$\mu \pm 2\sigma$	98 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %

Mittapalojen A1 - A16 kappalekohtaiset pituusmitat sekä keskihajonnat

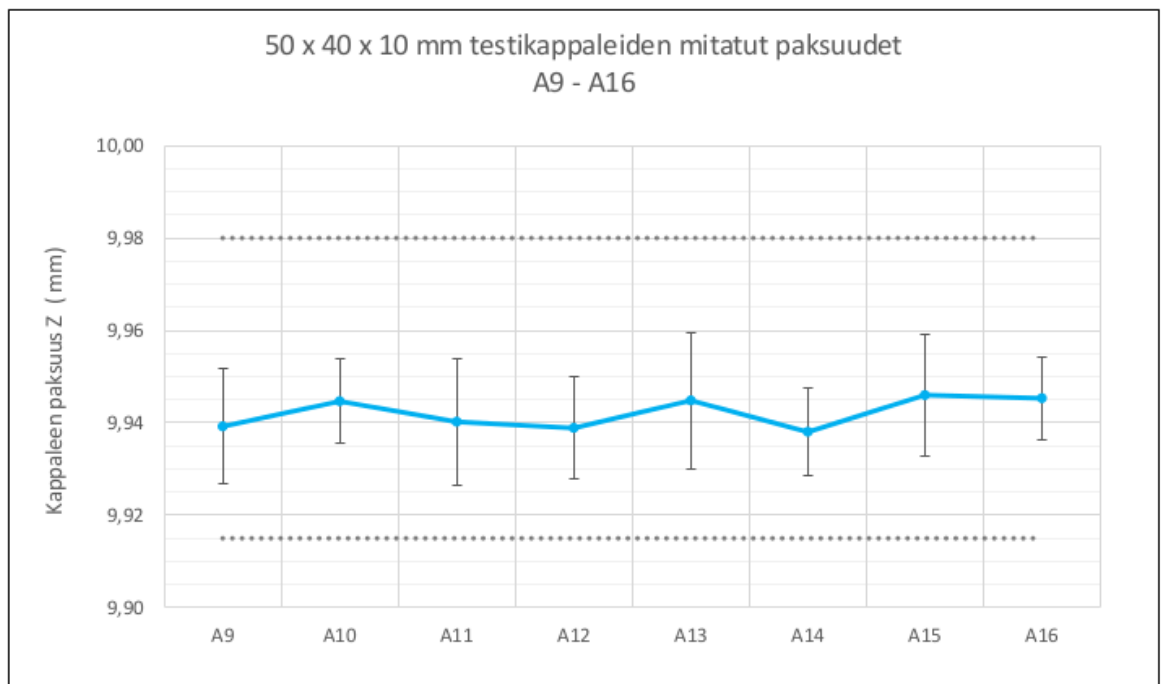
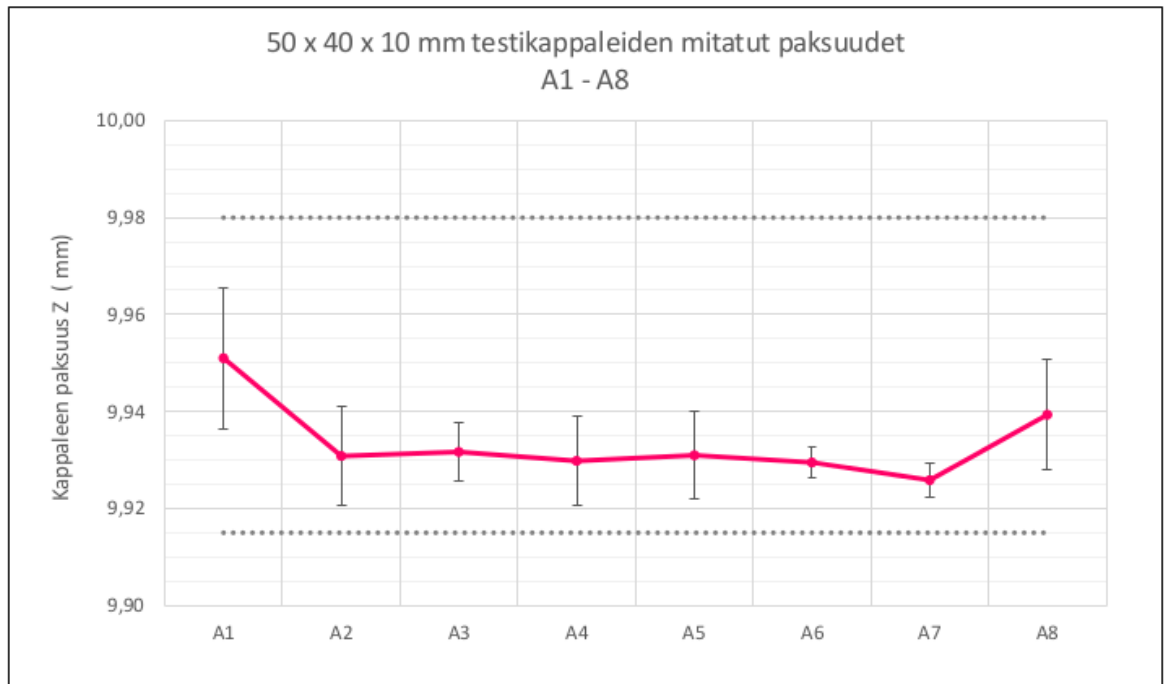
Pituusmittojen (40 mm) jakaumat



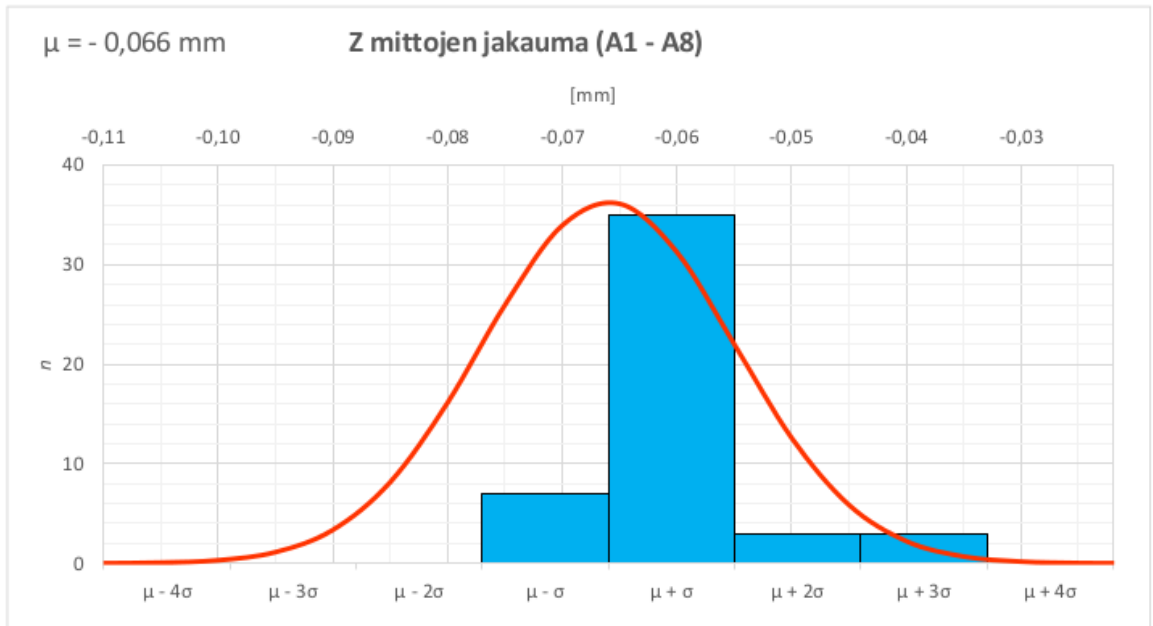
$\mu \pm \sigma$	86 %
$\mu \pm 2\sigma$	97 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %



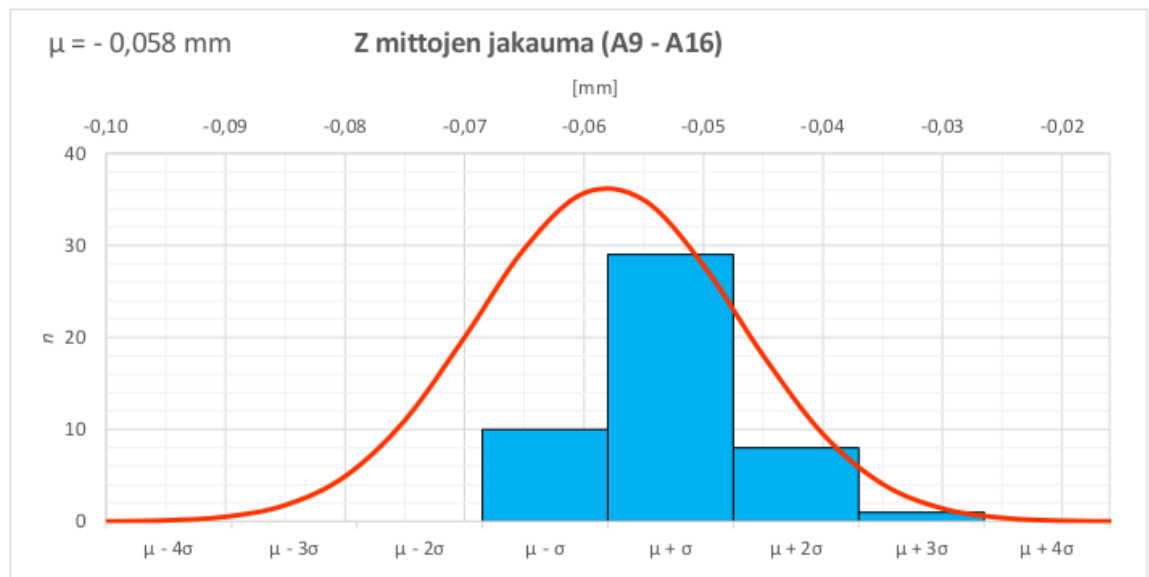
$\mu \pm \sigma$	88 %
$\mu \pm 2\sigma$	96 %
$\mu \pm 3\sigma$	99 %

Mittapalojen A1 - A16 kappalekohtaiset paksuusmitat sekä keskihajonnat

Paksuusmittojen (10 mm) jakaumat



$\mu \pm \sigma$	88 %
$\mu \pm 2\sigma$	94 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %



$\mu \pm \sigma$	81 %
$\mu \pm 2\sigma$	98 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %

Liite 2. 50 x 40 x 10 mm testikappaleiden mittaustulokset (Fortus 250mc)

1 (7)

50 x 40 x 10 mm mittapalojen tarkkuusmittausten tulokset

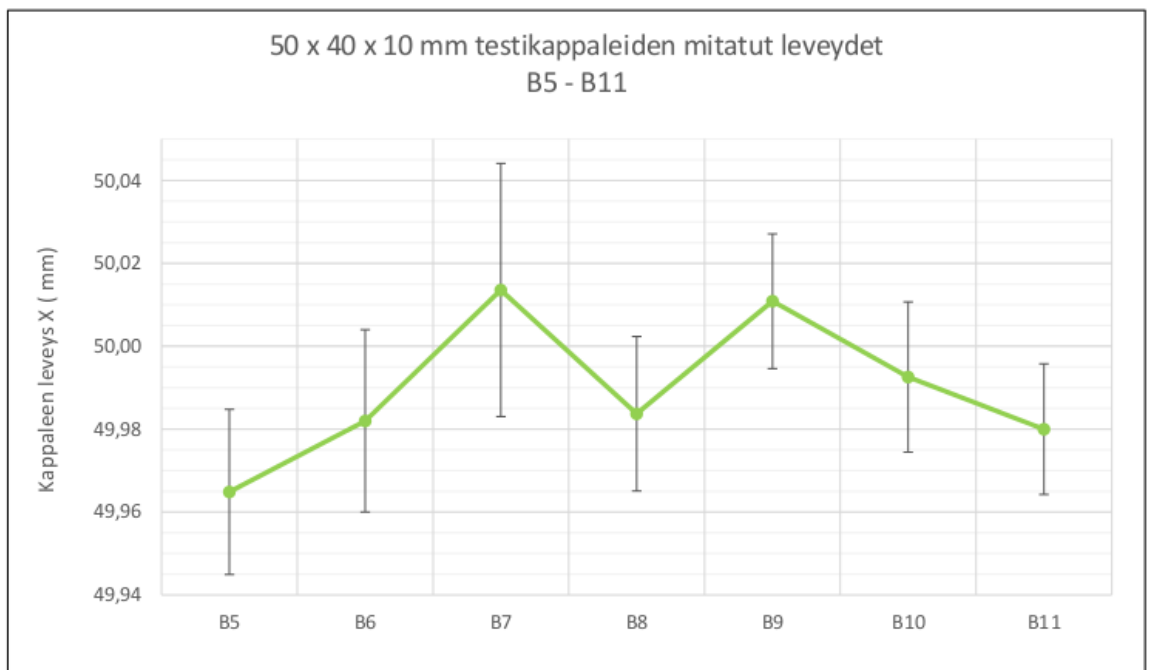
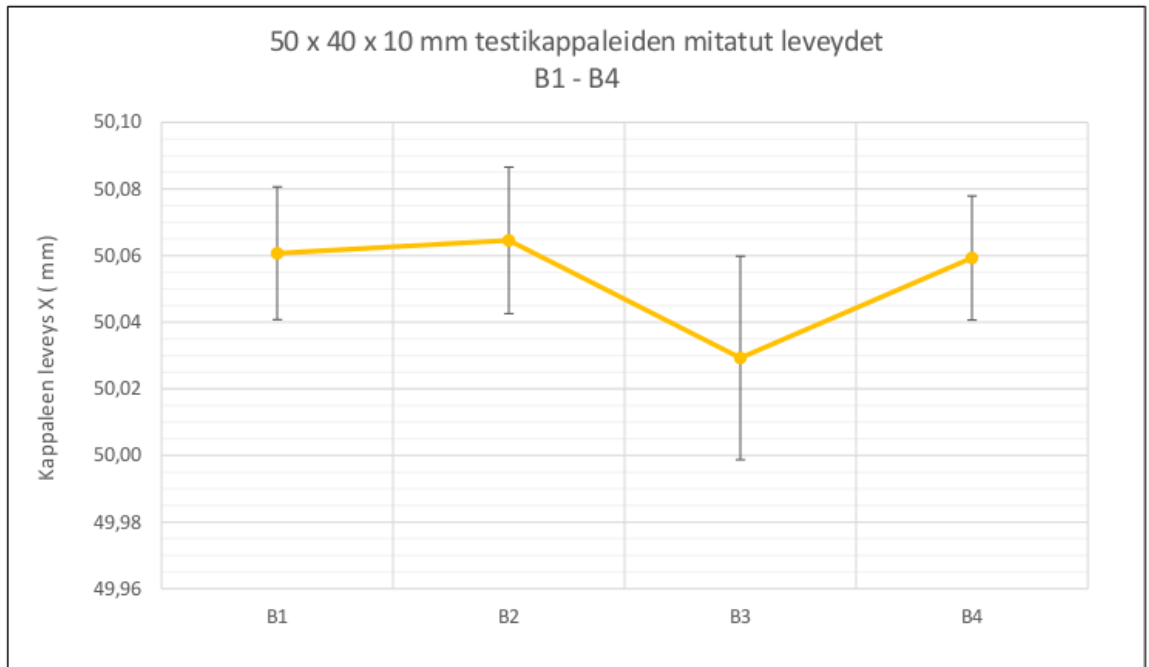
Fortus 250mc (B1 - B11):

		B1 - B4	B5 - B11
	Täyttö	solid	spare
X	Tavoitearvo	50 mm	50 mm
	Tulosten keskiarvo	50,053 mm	49,990 mm
	Virheen keskiarvo μ	0,053 mm (+ 0,11 %)	- 0,01 mm (- 0,02 %)
	Vaihteluväli	0,098 mm	0,096 mm
	Keskihajonta σ	0,026 mm (0,05 %)	0,021 mm (0,04 %)
	Mittapisteet	28 kpl	32 kpl
Y	Tavoitearvo	40 mm	40 mm
	Tulosten keskiarvo	40,083 mm	39,952 mm
	Virheen keskiarvo μ	0,083 mm (+ 0,21 %)	- 0,048 mm (- 0,12 %)
	Vaihteluväli	0,155 mm	0,138 mm
	Keskihajonta σ	0,042 mm (0,10 %)	0,037 mm (0,09 %)
	Mittauspisteiden määrä	36 kpl	63 kpl
Z	Tavoitearvo	10 mm	10 mm
	Tulosten keskiarvo	10,293 mm	10,314 mm
	Virheen keskiarvo μ	0,293 mm (+ 2,93 %)	0,314 mm (+ 3,14 %)
	Vaihteluväli	0,213 mm	0,409 mm
	Keskihajonta σ	0,061 mm (0,61 %)	0,102 mm (1,02 %)
	Mittapisteet	24 kpl	42 kpl

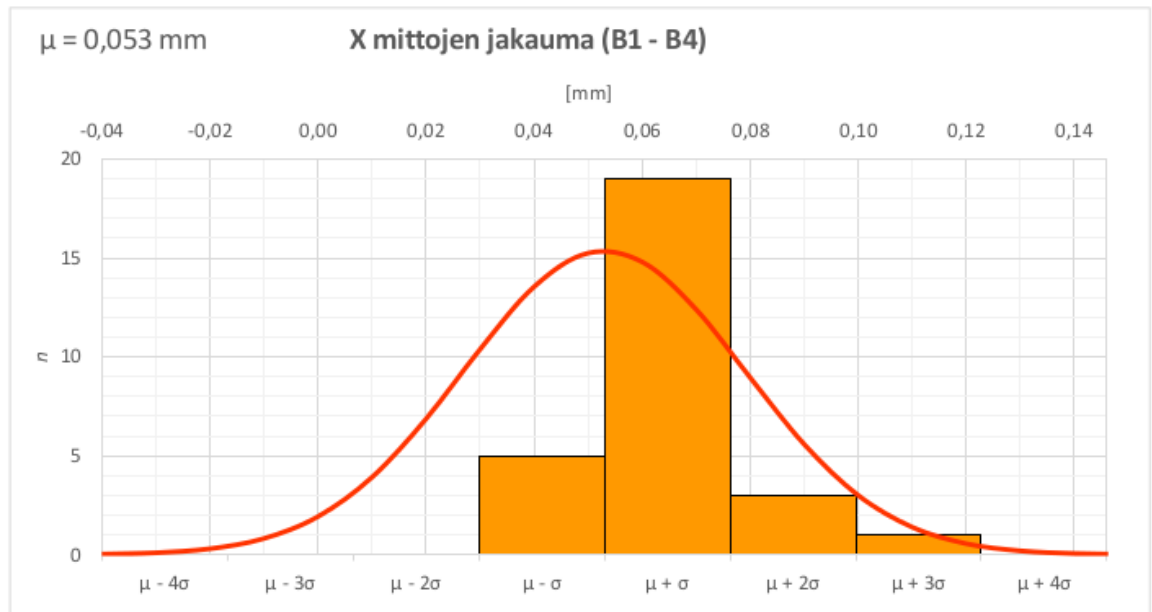
Valmistajan ilmoittama tarkkuus $\pm 0,241$ mm

Skannausmittausten keskiarvot:

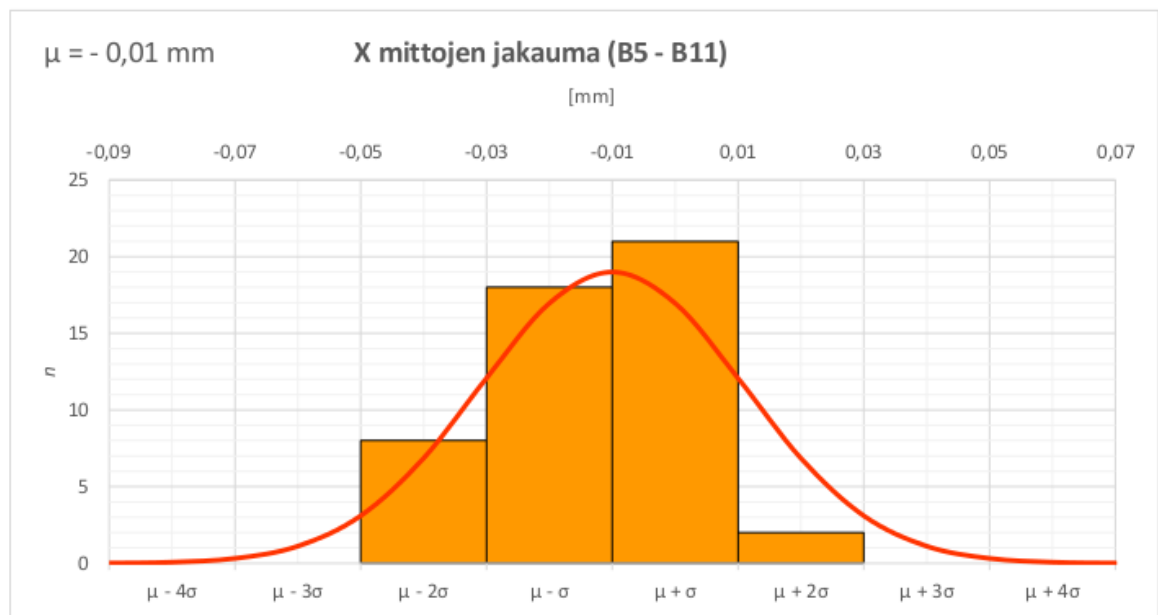
	B1 - B4	B5 - B11
Tasomaisuus (yläpinta)	0,189 mm	0,279 mm
Tasomaisuus (alapinta)	0,039 mm	0,056 mm
Suoruus	0,046 mm	0,036 mm
Rinnakkaisuus	0,066 mm	0,042 mm
Suorakulmaisuus	0,062 mm	0,037 mm

Mittapalojen B1 - B11 kappalekohtaiset leveysmitat sekä keskihajonnat

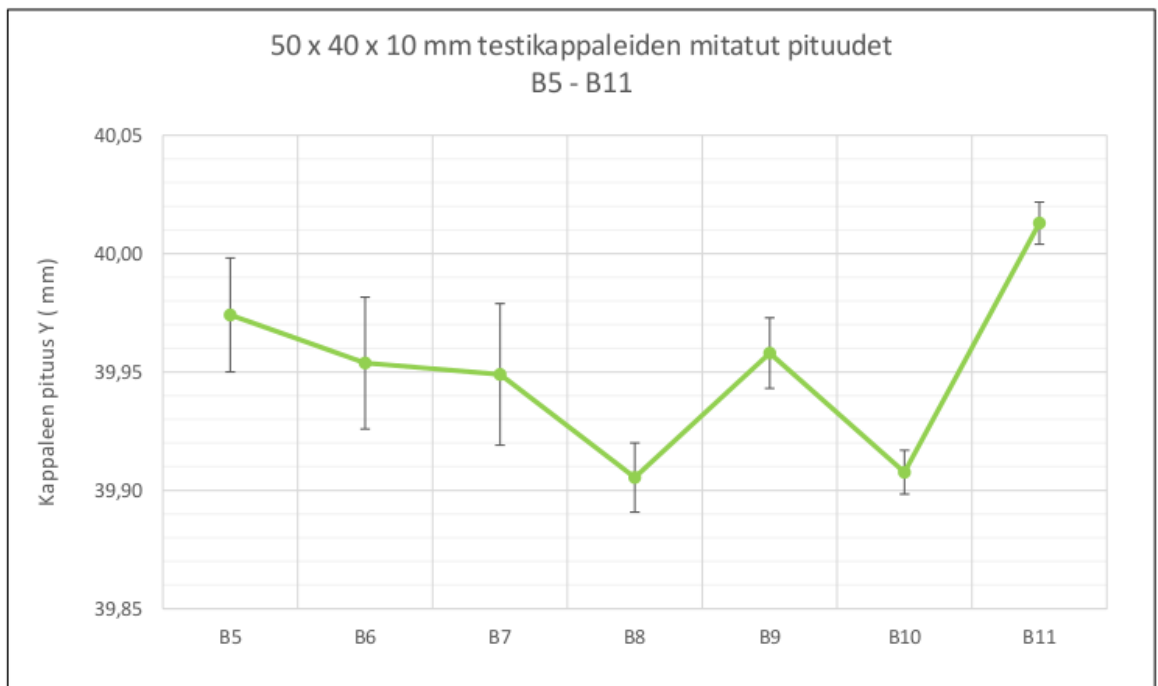
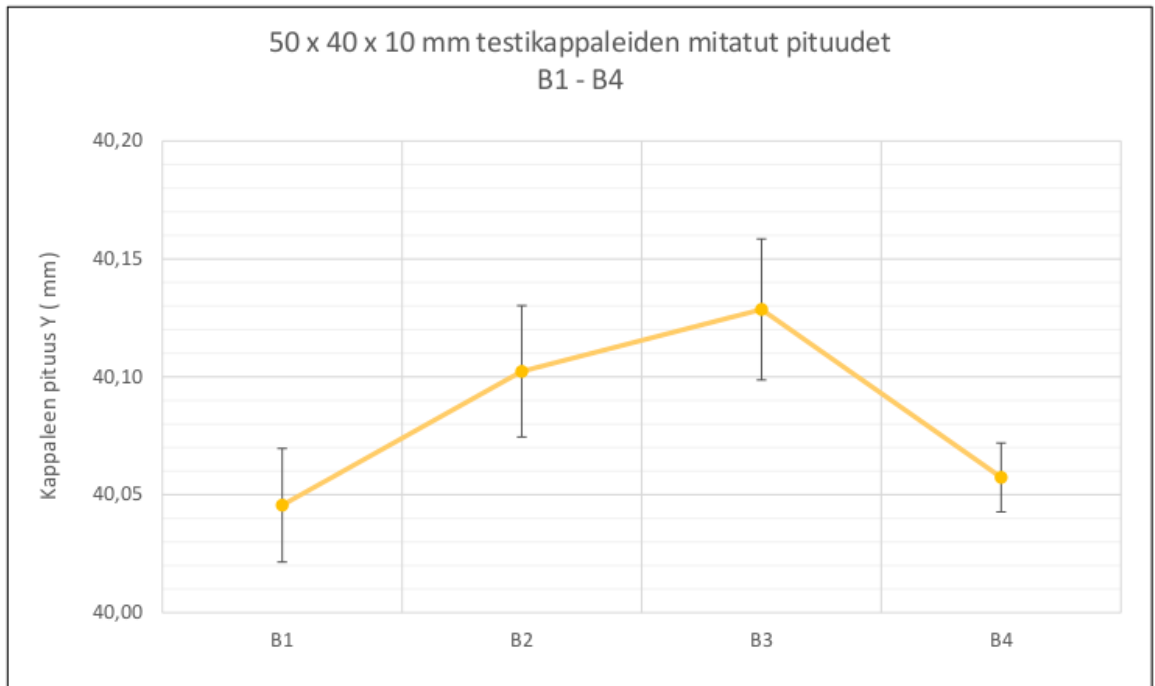
Leveysmittojen (50 mm) jakaumat



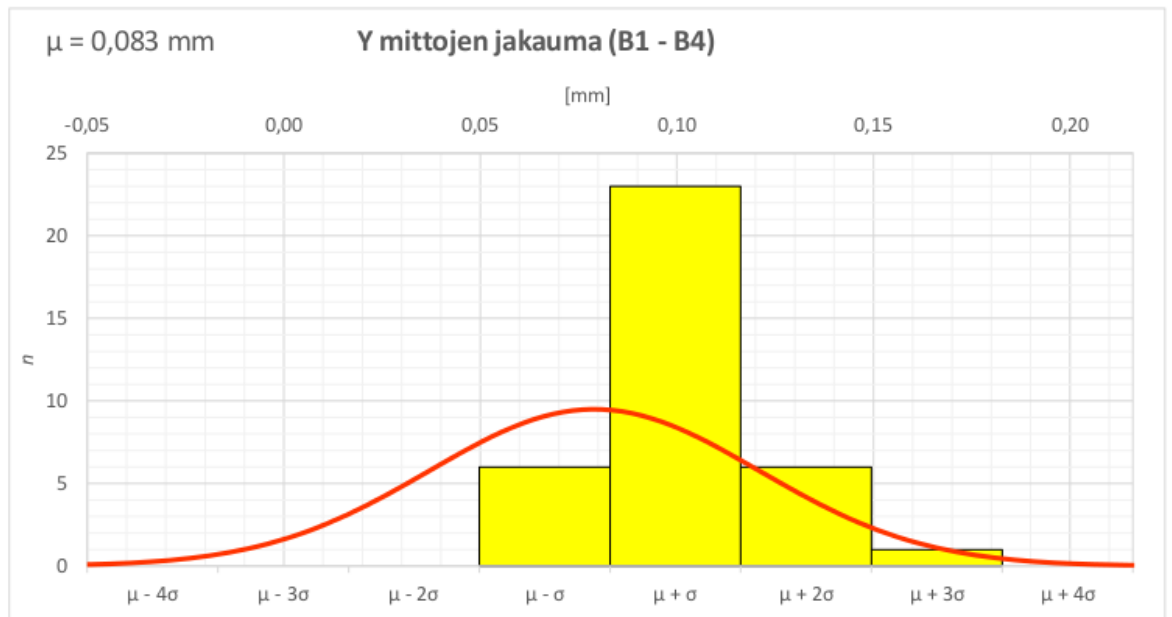
$\mu \pm \sigma$	86 %
$\mu \pm 2\sigma$	96 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %



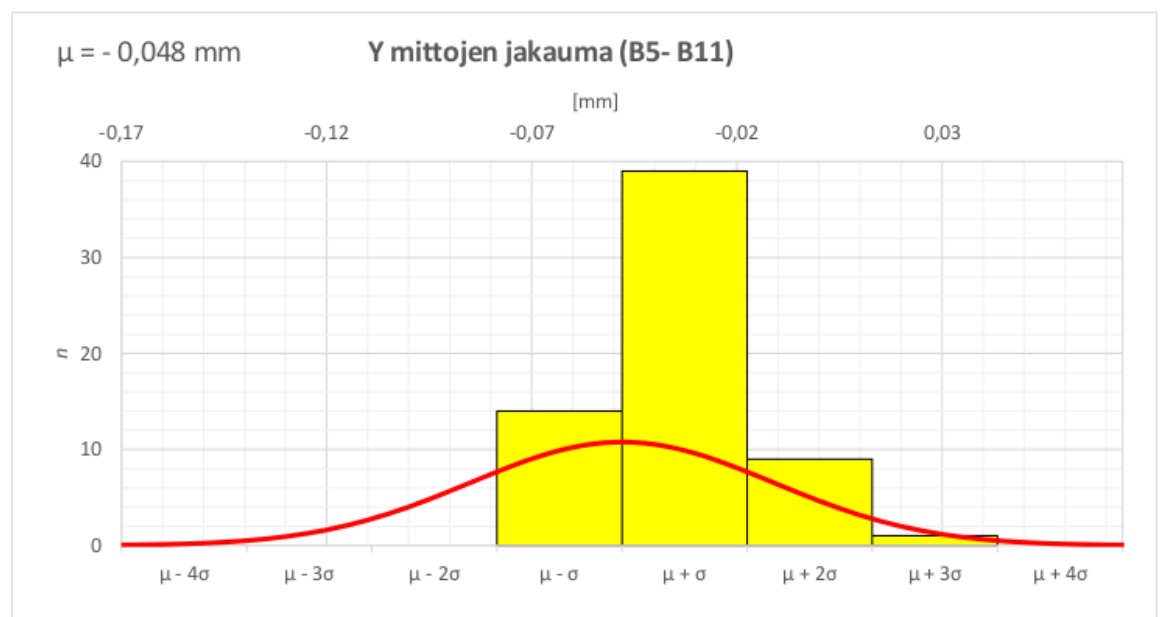
$\mu \pm \sigma$	80 %
$\mu \pm 2\sigma$	100 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %

Mittapalojen B1 - B11 kappalekohtaiset pituusmitat sekä keskihajonnat

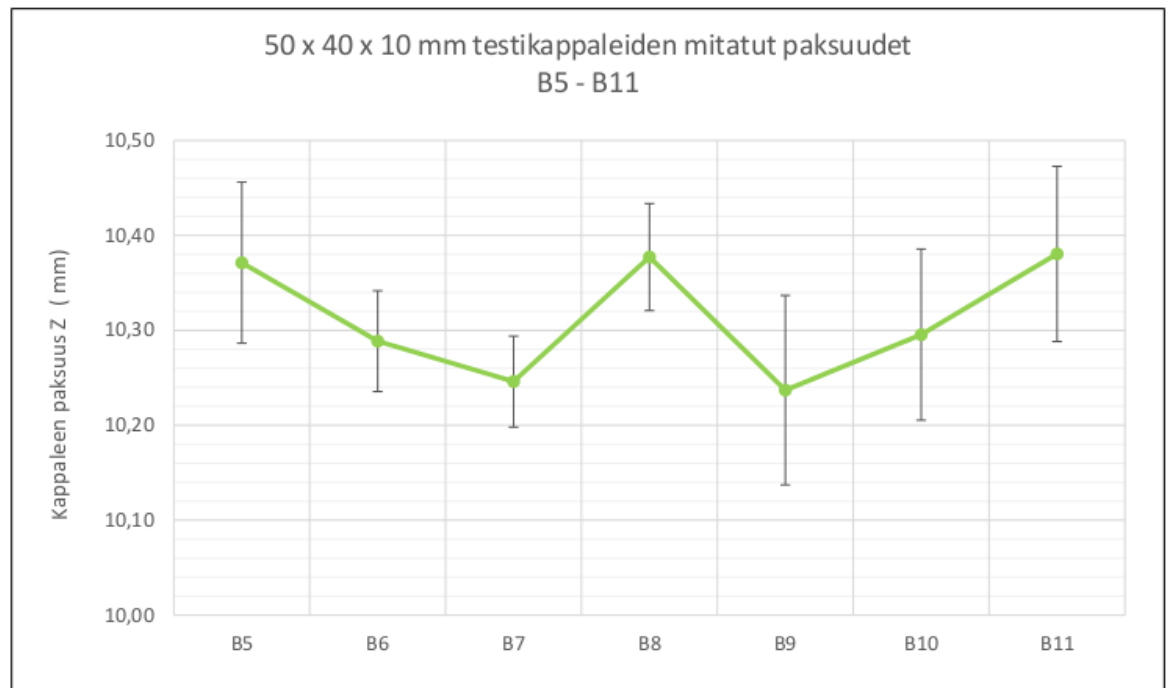
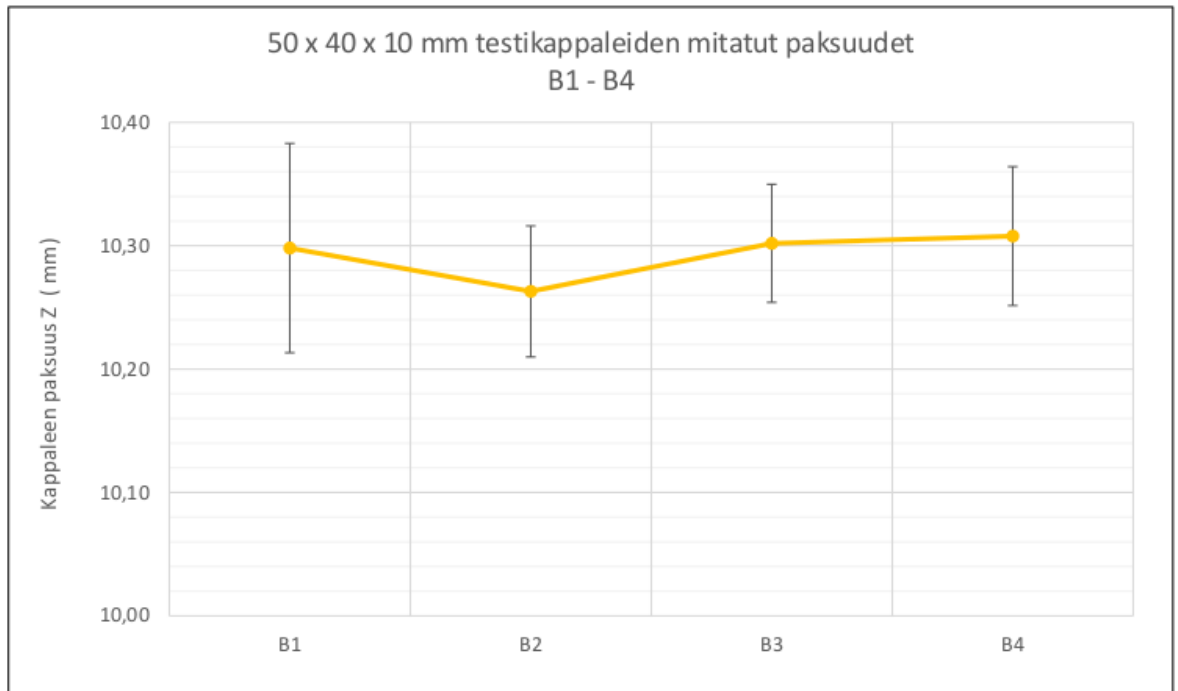
Pituusmittojen (40 mm) jakaumat



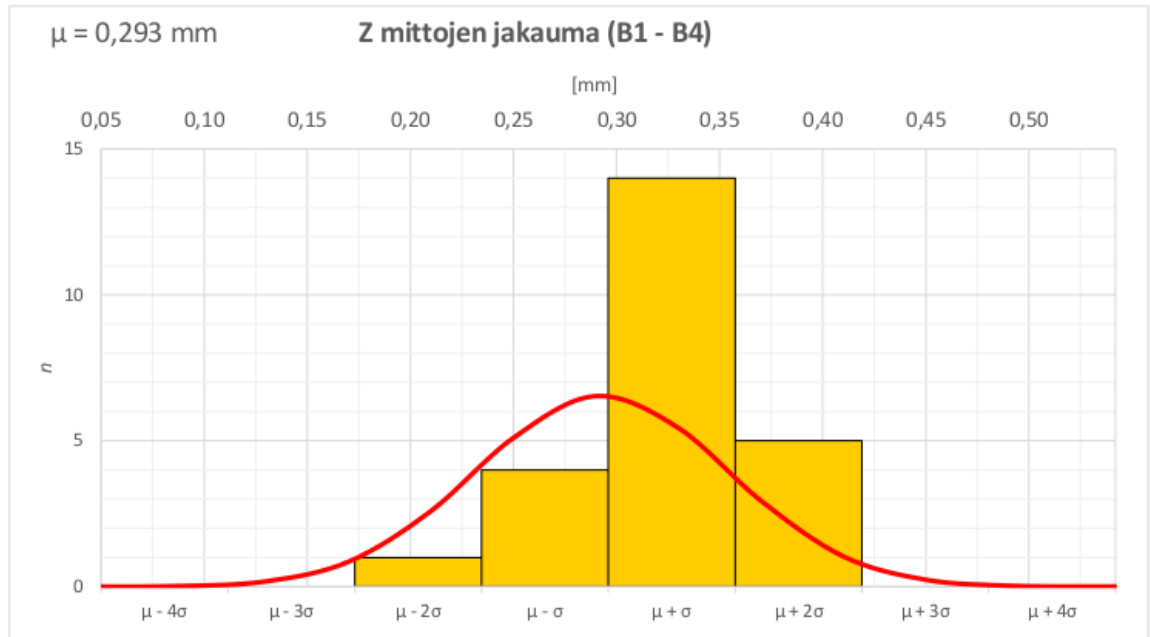
$\mu \pm \sigma$	81 %
$\mu \pm 2\sigma$	97 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %



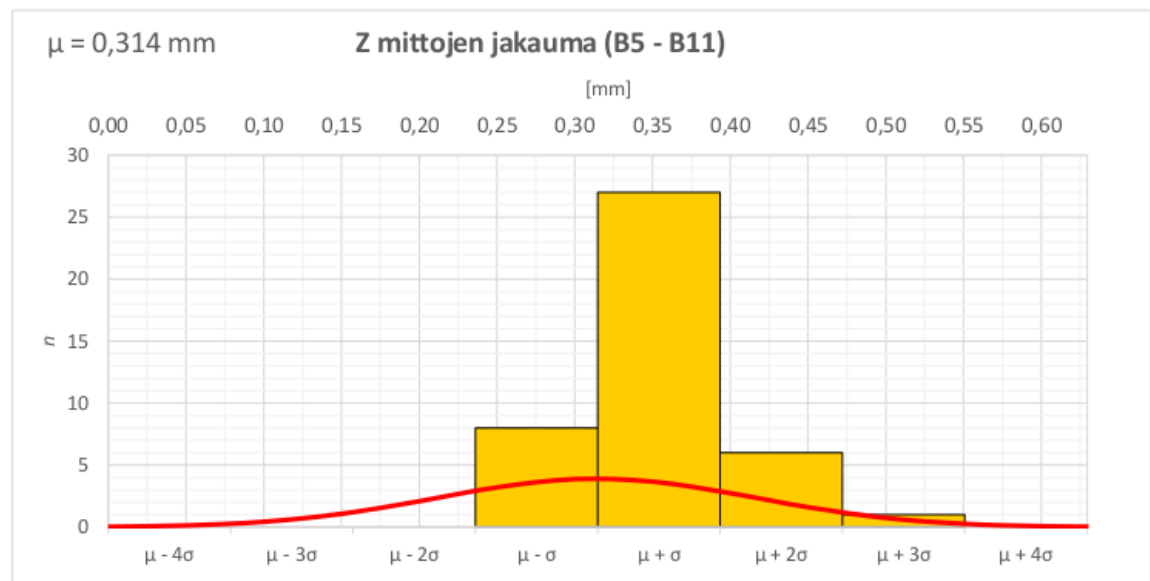
$\mu \pm \sigma$	84 %
$\mu \pm 2\sigma$	98 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %

Mittapalojen B1 - B11 kappalekohtaiset paksuusmitat sekä keskihajonnat

Paksuusmittojen (10 mm) jakaumat



$\mu \pm \sigma$	88 %
$\mu \pm 2\sigma$	94 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %



$\mu \pm \sigma$	83 %
$\mu \pm 2\sigma$	98 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %

Liite 3. D50 x 10 mm testikappaleiden mittaustulokset (Objet & Fortus)

1 (6)

D50 x 10 mm mittapalojen tarkkuusmittausten tulokset**Objet250 (A17 - A21):**

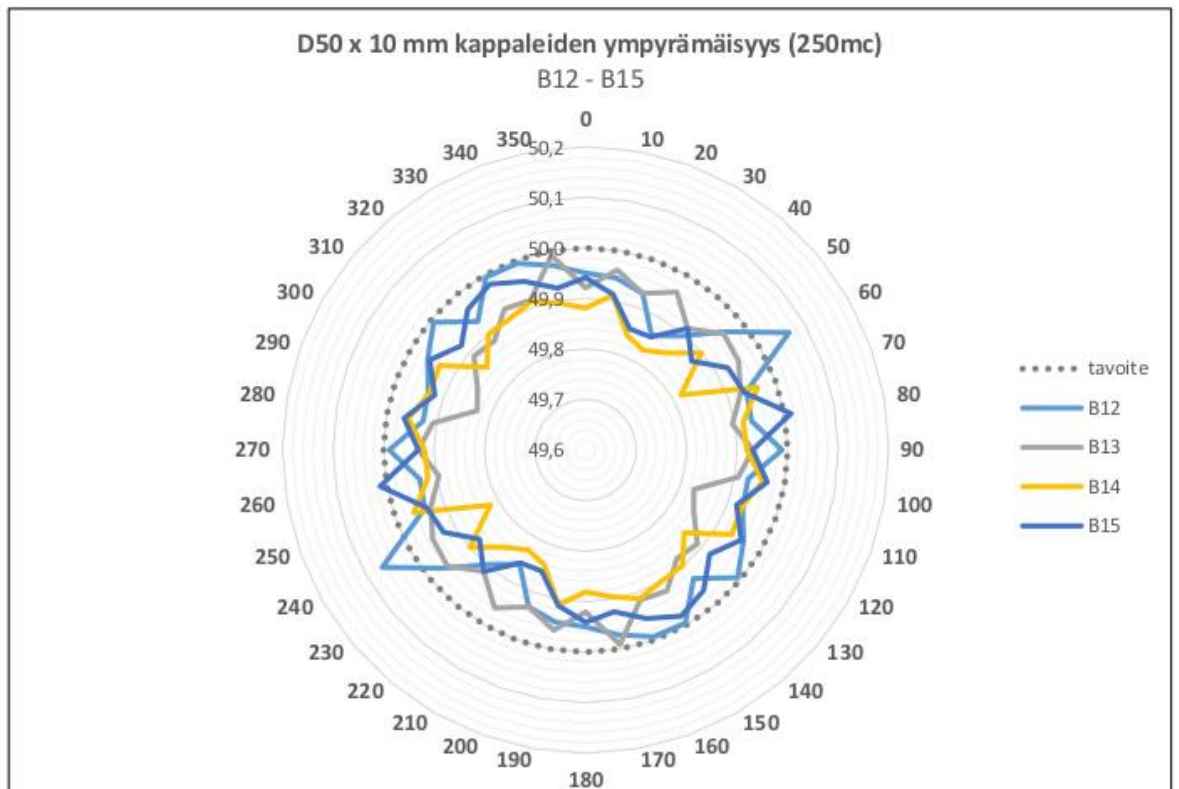
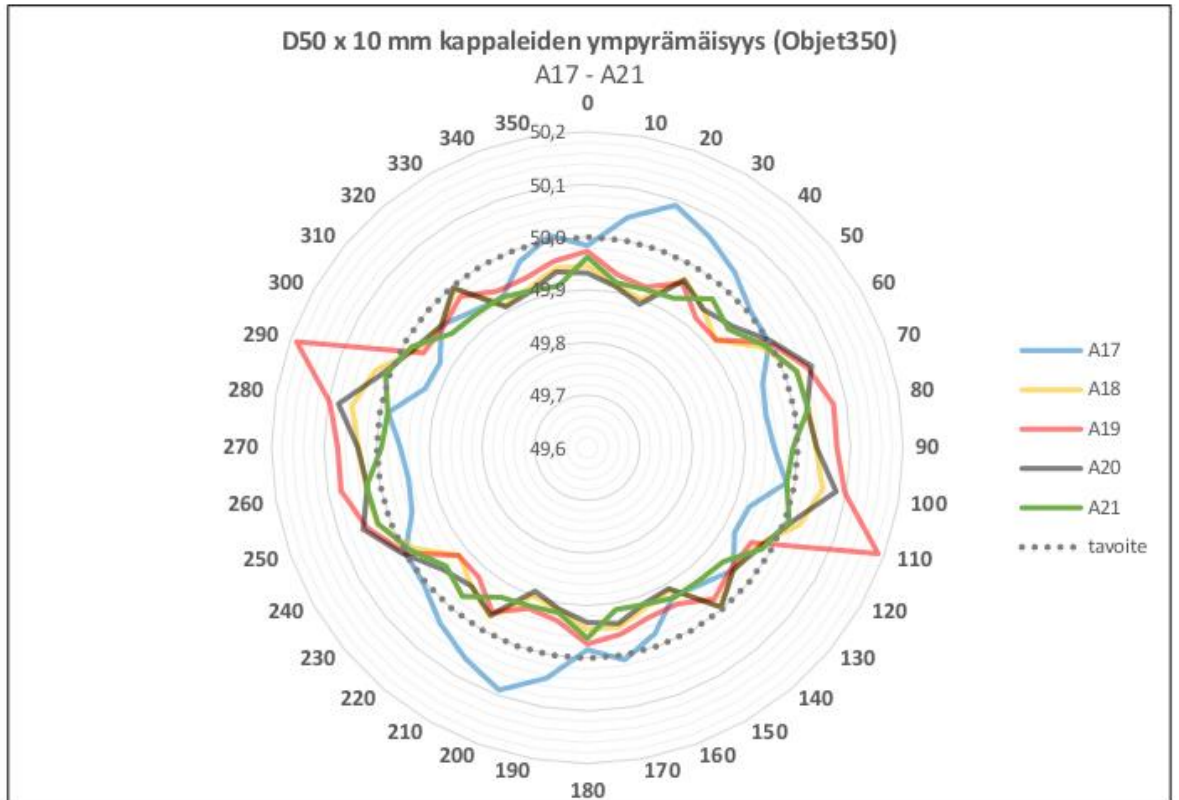
Suunta	D	Z
Tavoitearvo	50 mm	10 mm
Tulosten keskiarvo	49,976 mm	9,931 mm
Virheen keskiarvo μ	- 0,024 mm (- 0,05 %)	- 0,069 mm (- 0,69 %)
Vaihteluväli	0,298 mm	0,054 mm
Keskihajonta σ	0,054 mm (0,11 %)	0,011 mm (0,11 %)
Mittapisteen	90 kpl	35 kpl

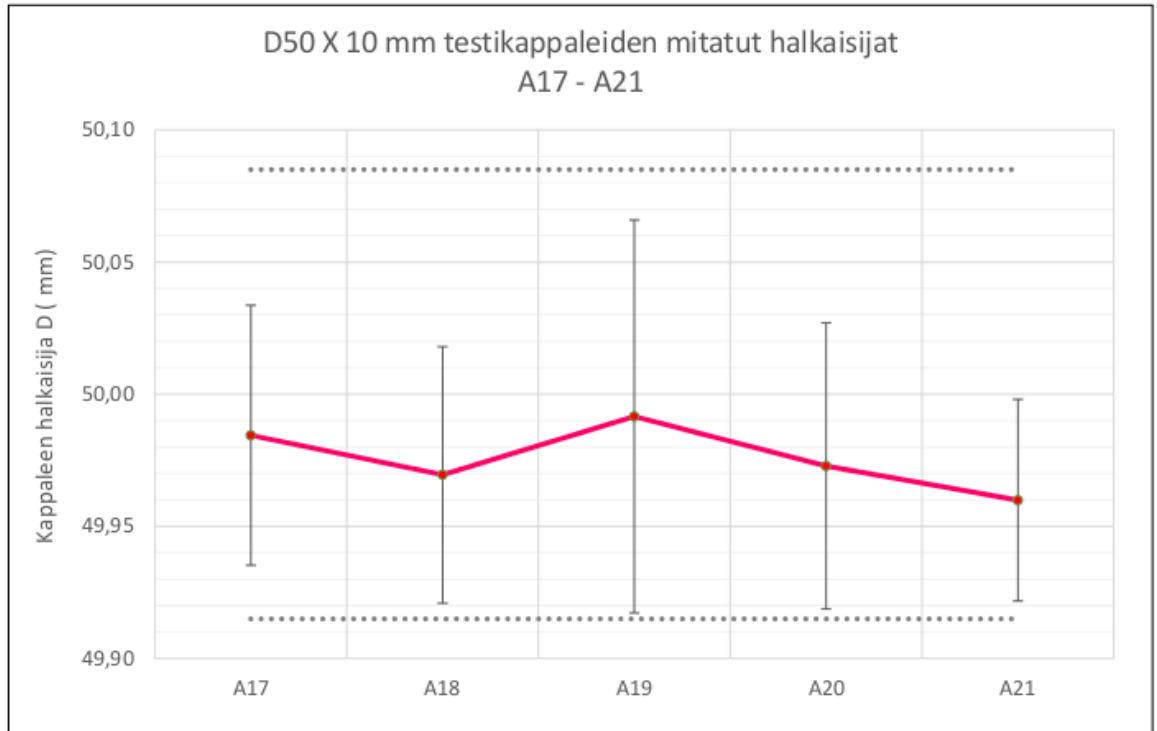
Fortus 250mc (B12 - B15):

Suunta	D	Z
Tavoitearvo	50 mm	10 mm
Tulosten keskiarvo	49,924 mm	10,375 mm
Virheen keskiarvo μ	- 0,076 mm (- 0,15 %)	0,375 mm (+ 3,75 %)
Vaihteluväli	0,247 mm	0,364 mm
Keskihajonta σ	0,046 mm (0,09 %)	0,086 mm (0,86 %)
Mittapisteen	72 kpl	28 kpl

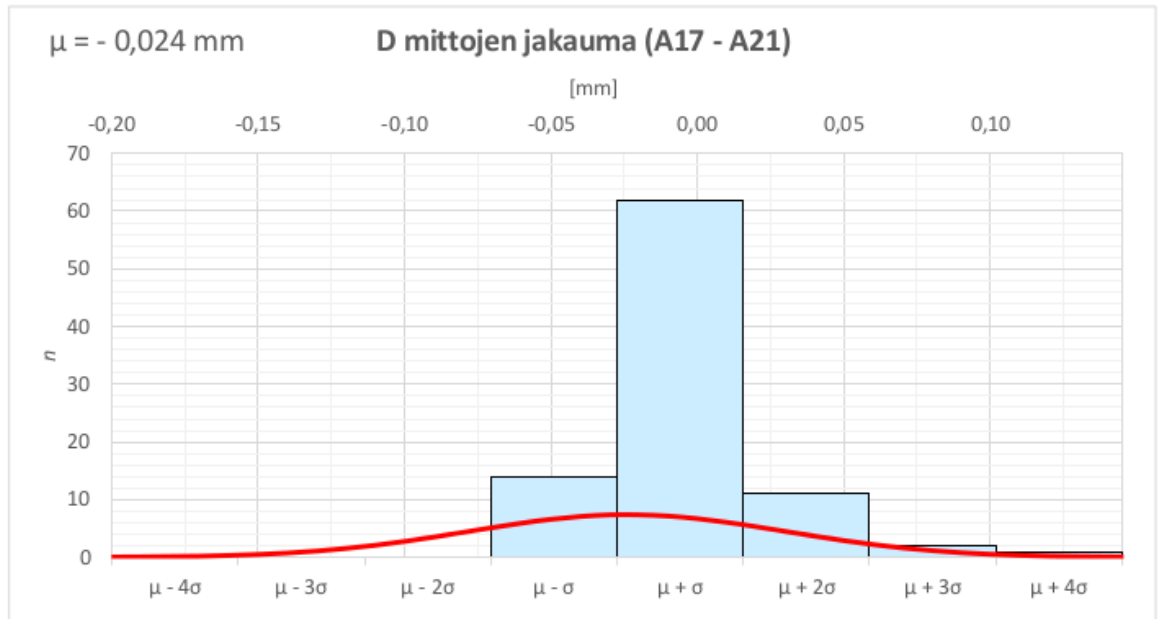
Skannausmittausten keskiarvot:

	A17 – A21	B12 – B15
Tasomaisuus (yläpinta)	0,017 mm	0,162 mm
Tasomaisuus (alapinta)	0,018 mm	0,054 mm
Rinnakkaisuus	0,026 mm	0,207 mm
Ympyrämäisyys (halkaisija)	0,163 mm	0,217 mm

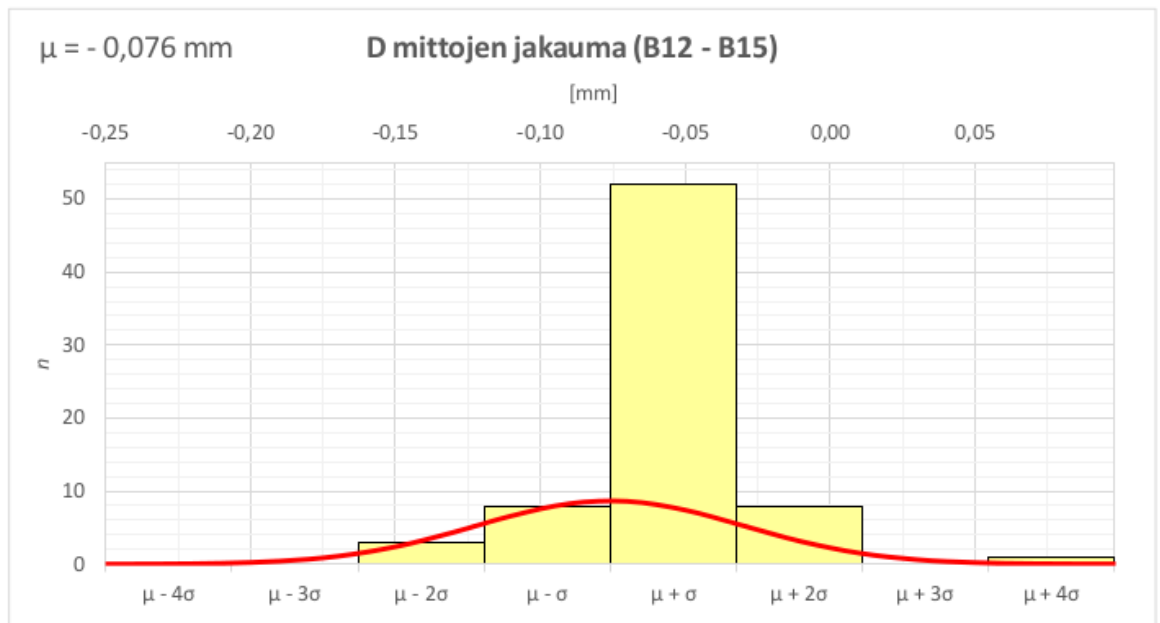


Mittapalojen kappalekohtaiset halkaisijamitat sekä keskihajonnat

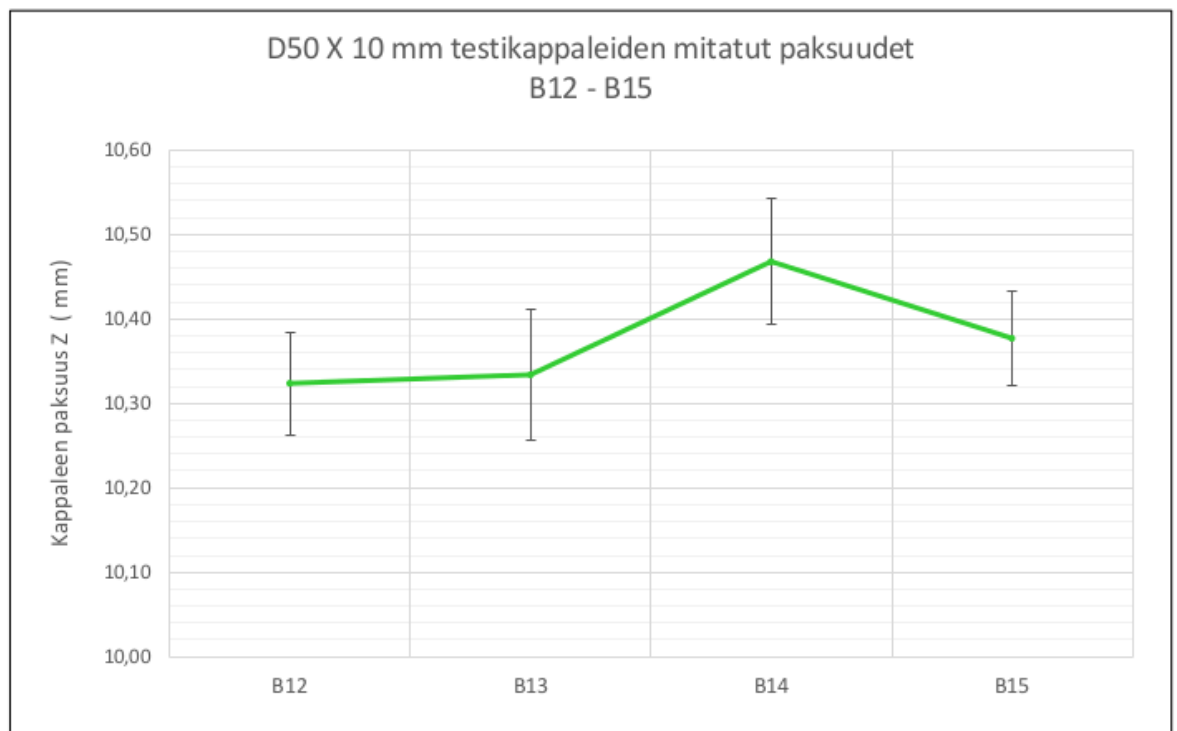
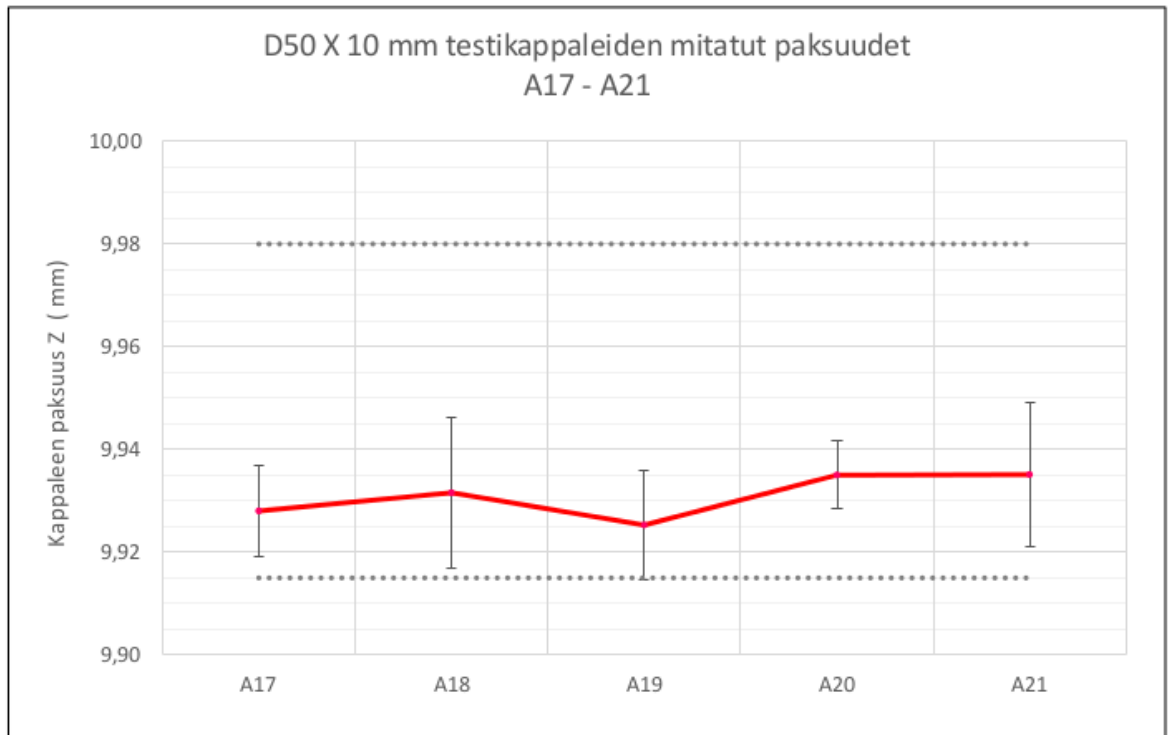
Halkaisijamittojen (50 mm) jakaumat



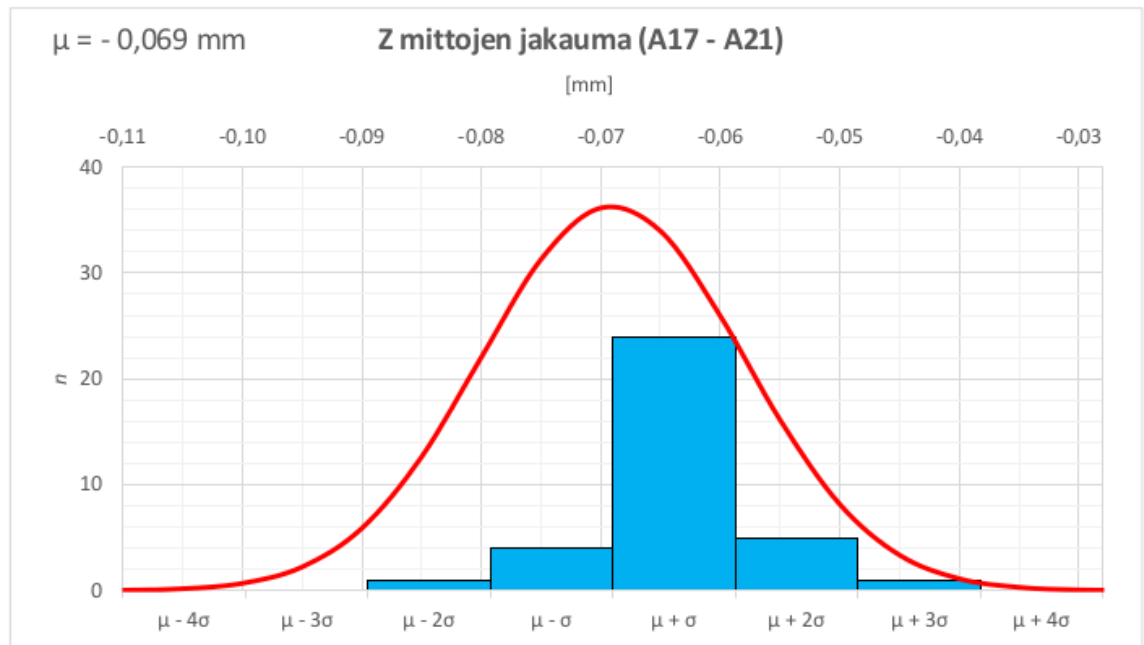
$\mu \pm \sigma$	84 %
$\mu \pm 2\sigma$	98 %
$\mu \pm 3\sigma$	99 %
$\mu \pm 4\sigma$	100 %



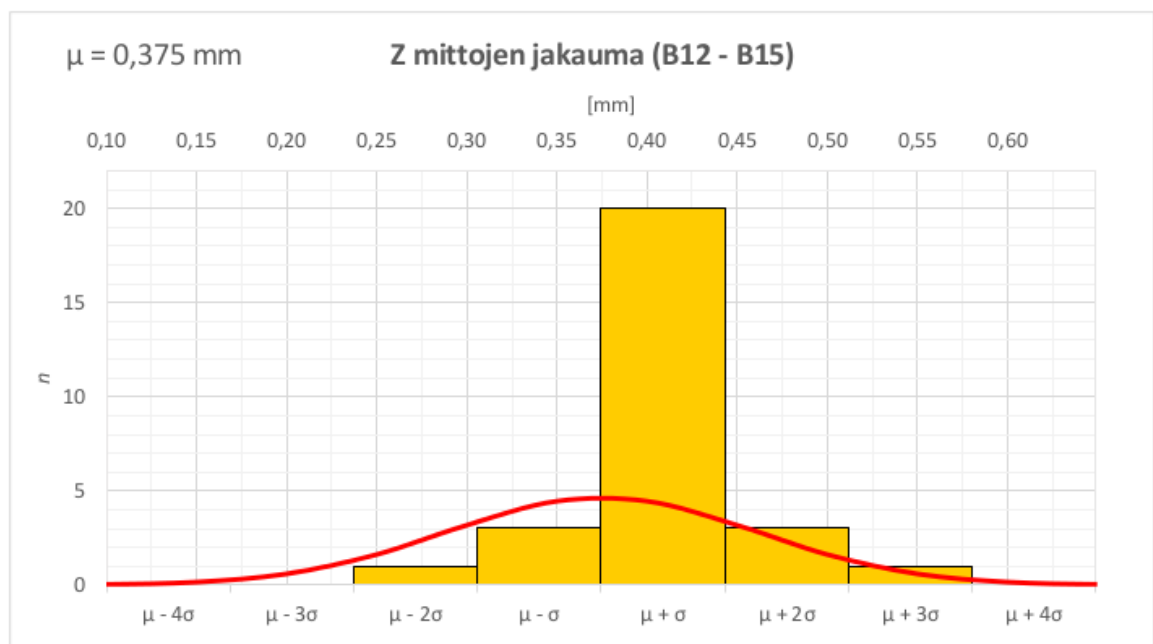
$\mu \pm \sigma$	83 %
$\mu \pm 2\sigma$	99 %
$\mu \pm 3\sigma$	99 %
$\mu \pm 4\sigma$	100 %

Mittapalojen kappalekohtaiset paksuusmitat sekä keskihajonnat

Paksuusmittojen (10 mm) jakaumat



$\mu \pm \sigma$	80 %
$\mu \pm 2\sigma$	97 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %



$\mu \pm \sigma$	82 %
$\mu \pm 2\sigma$	96 %
$\mu \pm 3\sigma$	100 %