

Tommi Reiman

3D-tulostuksen hyödyntäminen NDT-tarkastuksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinööriytyö

28.3.2018

Tekijä Otsikko	Tommi Reiman 3D-tulostuksen hyödyntäminen NDT-tarkastuksessa
Sivumäärä Aika	33 sivua + 1 liite 28.3.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Valmistus- ja tuotantotekniikka
Ohjaajat	Tekniikan lisensiaatti Matti Ruha Lehtori Markku Saarnio
<p>Tämä insinööriytyö käsittelee materiaalia lisääviä valmistustekniikoita sekä nykyistä tilannetta tulostettujen komponenttien käytössä rikkomattoman testauksen yhteydessä Kiwa Inspectalla.</p> <p>Työn tavoitteena oli helpottaa erilaisten tarkastuslaitteiden ja apuvälineiden tulostettavien komponenttien suunnittelua ja parantamaa mittatarkkuutta, mikä vähentää hukkaan menevän materiaalin määrää sekä epäonnistuneiden kappaleiden tulostamista.</p> <p>Työn aikana valmistettiin erilaisia testikappaleita, joiden mittaustuloksista selvitetään tuloslaatuja sekä eri materiaalien vaikutuksia toleransseihin. Lisäksi esiteltiin erilaisia sovelluksia, joissa 3D-tulostusta on jo käytetty hyväksi.</p> <p>Tuloksena saatiin hyvät lähtöarvot kappaleiden suunnitteluun, kun halutaan varmistaa kappaleiden kokoonpantavuus. Lisäksi todettiin, että paras mahdollinen tulostuslaatu ei aina johda parhaaseen lopputulokseen mittatarkkuuden osalta.</p>	
Avainsanat	3D-tulostus, NDT-tarkastus

Author Title	Tommi Reiman Utilizing 3D Printing in NDT-Applications
Number of Pages Date	33 pages + 1 appendix 28 March 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Production Engineering
Instructors	Matti Ruha, Lic.Tech. Markku Saarnio, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis examines different additive manufacturing methods and the current status of utilizing 3D printed components in non-destructive testing. The thesis was commissioned by Kiwa Inspecta.</p> <p>The objective of this thesis is to ease the design of printed components and decrease the amount of wasted materials and unsuccessful prints by improving dimensional accuracy.</p> <p>A series of test pieces were made for this study to examine the effects of different print qualities and print materials on the final tolerances. In addition, different applications of 3D printed components in non-destructive testing are presented.</p> <p>The result was a good starting point for the design process to ensure the assembly of 3D-printed components. Additionally, it was discovered that the best print quality (layer height) does not always produce the best results in dimensional accuracy.</p>	
Keywords	3D printing, Non-destructive testing

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	3
2	3D-tulostus	4
2.1	Materiaalit	5
2.2	Menetelmät	10
2.3	Ohjelmistot	15
3	Mittaukset	17
3.1	Vetokoe	17
3.2	Mittatarkkuuden määrittäminen	20
3.3	Kokeiden mittaustulokset	21
3.4	Tulosten tulkinta	27
4	3D-tulostuksen hyödyntäminen NDT-tarkastuksessa	29
4.1	Yhteenveto	31
	Lähteet	32
	Liite Koekappaleiden mittaustulokset	

Lyhenteet

ABS	Akrylinitriilibutadieenistyreeni.
AM	<i>Additive manufacturing</i> . Materiaalia lisäävä valmistus.
CAD	<i>Computer-aided design</i> . Tietokoneavusteinen suunnittelu.
CAM	<i>Computer-aided manufacture</i> . Tietokoneavusteinen valmistus.
DLP	<i>Digital light processing</i> . Valon peilaamiseen perustuva menetelmä.
FDM	<i>Fused deposition modeling</i> . Materiaalin pursotus.
NDT	<i>Non-destructive testing</i> . Rikkomaton aineenkoetus.
PA	Polyamidi. Nylon.
PC	Polykarbonaatti.
PLA	Polyaktidi.
PP	Polypropeeni.
PVA	Polyvinyylialkoholi. Vesiliukoinen polymeeri.
RFID	<i>radio frequency identification</i> . Radiotaajuinen etätunnistus.
SLA	Stereolitografia.
TPU	Termoplastinen polyuretaanielastomeeri.

1 Johdanto

Kolmiulotteisen tulostuksen käyttö on yleistynyt niin kotikäyttäjien kuin yritysten keskuudessa viime vuosina, mikä johtuu tekniikoiden kehityksestä ja laitteistojen hinnan laskusta kohtuulliselle tasolle erityisesti erilaisten muovimateriaalien tulostuksessa.

Tämän insinööriyön aiheena on 3D-tulostimen hyödyntäminen rikkomattomassa aineenkoetuksessa (NDT), eli käytännössä tarkastuslaitteiden apuvälineiden ja varaosien valmistuksessa. Työn tilaajana on Kiwa Inspecta, joka toimii tarkastuspalveluiden parissa.

Yritykseen on hankittu materiaalinpursotus-menetelmää (FDM) käyttävä 3D-tulostin (Ultimaker 3 Extended), millä on mahdollista käyttää useita erilaisia tulostusmateriaaleja, joiden ominaisuuksia tässä insinööriyössä tarkastellaan. Ongelmana on eri tulostusmateriaalien mittatarkkuus sekä toleranssit, jotka täytyy ottaa huomioon jo osien 3D-mallinnuksessa, sillä tulostusajat saattavat kappaleiden koosta riippuen olla pitkiä ja tulostuksen epäonnistuessa menee käytetty materiaali ja valmistusaika hukkaan. Tämän työn tarkoituksena on tarjota apuväline suunnittelua varten esimerkiksi materiaalin ja tulostuslaadun valinnassa, sekä mittaustuloksia niiden vaikutuksista lopullisiin mittatarkkuuksiin.

Osa Kiwa Inspectalla käytetyistä tarkastuslaitteista on automatisoituja ultraääniskanneita, joiden komponentteja on aikaisemmin valmistettu perinteisillä valmistusmenetelmillä. Nyt tarkoituksena on lisätä tulostettujen komponenttien käyttöä, millä mahdollisesti saavutetaan säästöä laitteiston painossa, parannetaan käytettävyyttä ja varaosien saatavuutta sekä taloudellisia säästöjä materiaalin ja työn osalta.

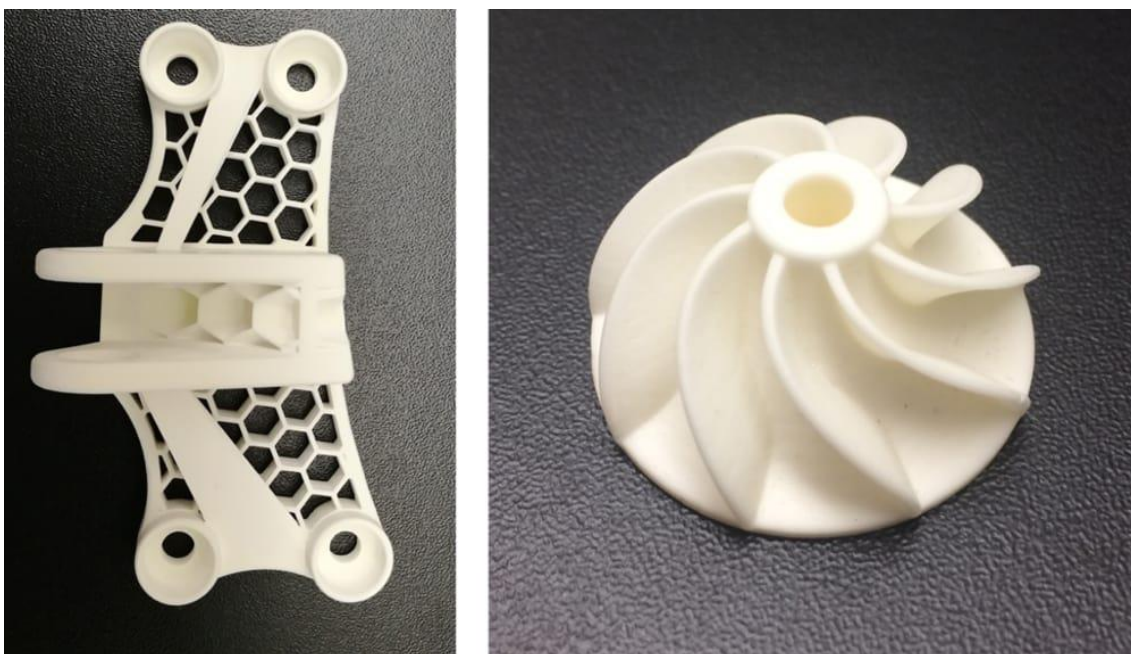
2 3D-tulostus

3D-tulostaminen on melko vakiintunut termi, kun puhutaan materiaalia lisäävästä valmistuksesta (AM). Sillä tarkoitetaan kappaleen valmistamista kerros kerrokselta alustalle, joka mahdollistaa kappaleensisäisiä muotoja, jotka olisivat mahdottomia toteuttaa käyttämällä perinteisiä valmistusmenetelmiä kuten lastuavaa työstöä. Alun perin käyttökohteena oli kuitenkin lähes pelkästään pikamallinnus, jossa suunnittelija sai nopeasti valmistettua suunnittelemaansa tuotteestaan fyysisen mallin. Sen avulla saatettiin havaita mahdolliset ongelmat kyseessä olevan tuotteen tai komponentin toimintaan, valmistettavuuteen tai kokoonpantavuuteen liittyen. Kehitys laitteiden ja menetelmien osalta on mennyt siinä määrin eteenpäin, että nykyään on mahdollista valmistaa käytökelpoisia tuotteita tai komponentteja käyttäen erilaisista materiaaleja, myös metalleja ja keraameja. [1, kpl. 1.2.]

2.1 Materiaalit

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa käytetyt rakennusaineet voidaan jakaa eri kategorioihin niiden ominaisuuksien tai käyttökohteiden perusteella. Materiaalin valintaan vaikuttavat käyttötarkoituksen asettamat vaatimukset sekä tulostustekniikan rajoitukset.

Keraamisista materiaaleista 3D-tulostuksessa käytössä ovat muun muassa savi, kipsi sekä posliini. Niitä voidaan käyttää esimerkiksi hammaslääketieteessä, taide-esineiden valmistuksessa tai kohteissa, joissa materiaaliin kohdistuu suuria lämpötiloja (kuva 1). Yhteistä näillä materiaaleilla on erityisen hyvä lämmönkestävyys, kovuus, jäykkyys sekä hyvä kulutuskestävyys. [2; 3; 4.]



Kuva 1. Keraamisesta materiaalista tulostettuja komponentteja [2].

Metallisia komponentteja tulostettaessa voidaan päästä hyvinkin paljon kevyempään tulokseen lopputuotteessa, kuin perinteisten valmistusmenetelmien rajoituksin suunnitellussa kappaleessa. Esimerkiksi VTT:n tekemässä projektissa hydrauliventtiilin massaa saatiin vähennettyä 76% kun se suunniteltiin uudelleen valmistettavaksi materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä kappaleen ominaisuuksien ylittäessä silti vaaditut arvot. [4.] (Kuva 2.)



Kuva 2. Metallista tulostettu hydrauliventtiili [4].

Polymeereillä tarkoitetaan monomeereistä kuten hiilivedyistä koostuvaa molekyylirakennetta. Molekyylit voivat kiinnittyä polymerointiprosessissa toisiinsa koostuen joko ketjumaiseksi, haaroittuneeksi, dendriittiseksi, rengasmaiseksi tai verkottuneeksi rakenteeksi. [6, s. 1.]

Termosettiset polymeerit eli kertamuovit muodostavat verkottuneen molekyylirakenteen jota ei voi kuumentamalla enää kovettumisen jälkeen hajottaa, eli se on sulamatonta muovia [6, s. 1]. Eräissä 3D-tulostuksen menetelmissä käytetty valopolymeeri on epoksi pohjainen termosettinen polymeeri, jota ei ole polymerisoitu loppuun saakka. Altistuksessa ultravioletti säteilylle se saattaa loppuun polymerisointiprosessin muodostaen verkottuneen rakenteen ja kovettaen aineen [7].

Termosettisellä elastomeerillä tarkoitetaan joustavaa ja venyvää verkottunutta polymeerirakennetta, joka ei ole muokattavissa lämmön avulla. Toisin kuin termosettisellä polymeerillä, elastomeerit eivät kovetu täysin vaan niillä on elastisia ominaisuuksia.

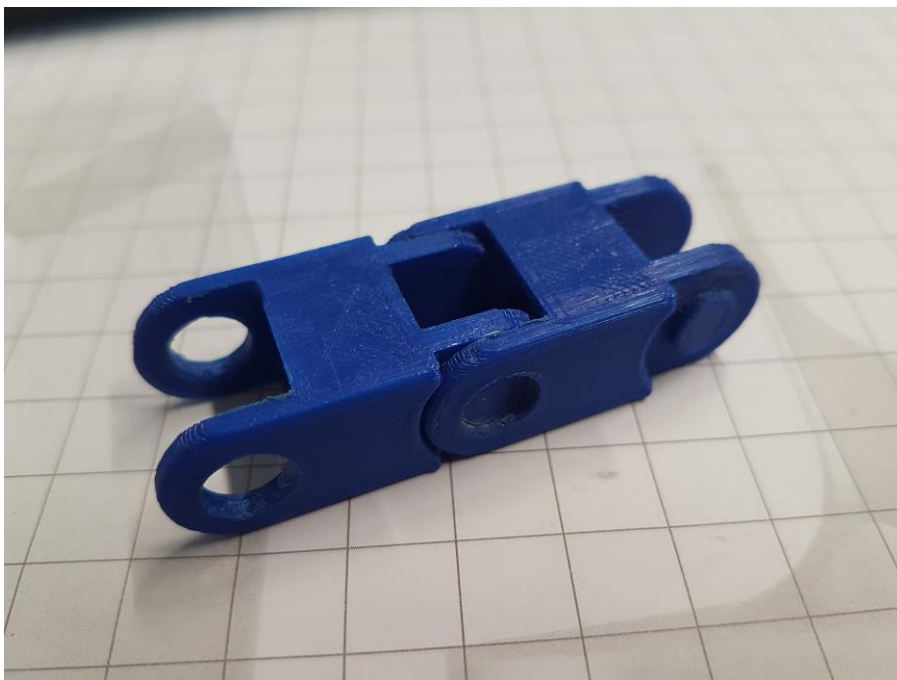
Termoplastisilla elastomeereillä on samankaltaisia ominaisuuksia kuin termosettisillä elastomeereillä, mutta niitä voidaan muovata lämmön avulla. [6, s. 1.]

- TPU eli termoplastinen polyuretaanielastomeeri on kumimainen materiaali, joka on hyvin kulutuksen kestävä [8].

Termoplastisia polymeerejä kutsutaan kestumuoveiksi ja niiden ominaisuuksiin kuuluu muokattavuus, eli niitä voidaan kuumentaa toistuvasti ja muokata haluttuun muotoon. Kestumuovit koostuvat ketjumaisista, haaroittuneista tai rengasmaisista molekyyli-rakenteista. [6, s. 1.]

- Nylon eli polyamidi (PA) on luja iskunkestävä, ja siinä iskulujuus säilyy alhaisiin lämpötiloihin asti, jos materiaali on sitkistetty. Korkea jatkuva käyttölämpötila noin 120 °C ja lyhytaikainen huippulämpötila 180 °C. Nylon ei ole vesiliukoinen, mutta absorboi paljon kosteutta, mikä voi vaikuttaa ominaisuuksiin negatiivisesti. [9.]
- ABS-muovi eli akryyliniiriibutadieenistyreeni on jäykkä, sitkeä ja iskunkestävä materiaali. ABS ei absorboi kosteutta kovin tehokkaasti, mutta on herkkä liuottimille ja altis jännityssäröille [9]. ABS-tuotteen pinnan voi tasoittaa asetonilla [10].
- PC eli polykarbonaatti on erittäin hyvän iskulujuuden omaava materiaali, joka kestää korkean käyttölämpötilan, mutta sillä on taipumus jännityssäröilyyn eikä se kestä kuumaa vettä tai liuottimien käyttöä [9].
- PLA eli polyaktidi on uusiutuvista raaka-aineista valmistettu biohajoava muovi-laatu, jolla on hyvä vetolujuus ja helppo tulostettavuus. Pinta voidaan tasoittaa kloroformilla [10]. Esimerkki PLA-muovista tulostetusta kappaleesta kuvassa 3.

- PP eli polypropeeni on yleinen muovimateriaali, millä on hyvä kemikaalien kesto. Se ei absorboi kosteutta tehokkaasti, mutta sietää huonosti ultraviolettisäteilyä ja alhaisia lämpötiloja. [9.]
- PVA eli polyvinyylialkoholi on vesiliukoinen polymeeri. Sitä voidaan käyttää 3D-tulostuksessa tukimateriaalina, jota ei tarvitse poistaa mekaanisesti. [10.]



Kuva 3. PLA:sta tulostettuja kaapeliketjun osia

Taulukossa 1 on esitetty yleisimpien tulostusmateriaalien ominaisuuksia. Lasittumislämpötila tarkoittaa lämpötilaa, jonka alapuolella polymeerimolekyylit pysyvät toisiinsa nähden liikkumattomina, eli materiaali menettää elastiset ominaisuutensa [6, s. 8].

Taulukko 1. Valmistajan ilmoittamia mekaanisia ja teknisiä ominaisuuksia [10.]

	Kimmokerroin [MPa]	Myötöraja [MPa]	Murtolujuus [MPa]	Murtovenymä [%]	Taivutuslujuus [MPa]	Lasittumislämpötila [°C]	Sulamispiste [°C]
PA	579,0	27,8	34,4	210,0	24	50	185-195
ABS	1681,5	30	33,9	4,8	70,5	97	225-245
PC	1904,0	-	53,7	5,9	95,5	112–113	-
PLA	2346,5	49,5	45,6	5,2	103	~60	145-160
TPU	26,0	8,6	39	580,0	4,3	-24	220

Komposiitti tarkoittaa useamman materiaalin yhdistelmää, jolloin mahdollistetaan käyttötarkoitukseen tarvittavat ominaisuudet, jotka eivät ole millekään yhdistelmän aineelle mahdollisia yksinään. Tällaisia ovat esimerkiksi hiilikuituvahvistetut muovimateriaalit, joissa yhdistyvät muovin muokattavuus, kuitujen rakenteeseen lisäämä lujuus sekä korkeampi lämmönsietokyky [11]. Myös erilaisten keraamien komposiitteja on tutkittu muun muassa suihkumoottorikäyttöä varten [12]. Myös hartsilla kovetettu hiilikuitu on komposiitti (kuva 4).

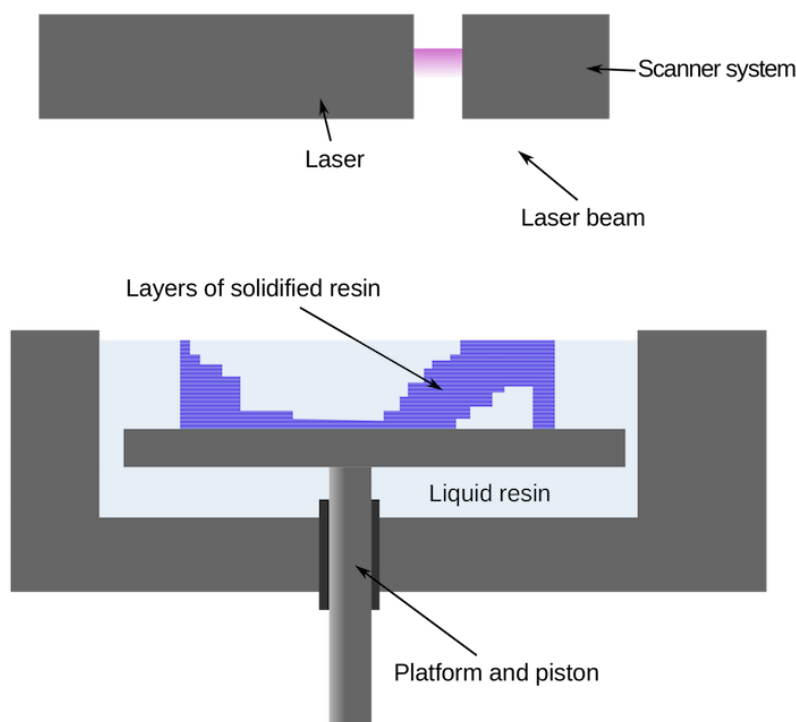


Kuva 4. Laminoituja hiilikuitulevyjä [11].

2.2 Menetelmät

Stereolitografia (SLA) on yksi ensimmäisistä kehitetyistä AM-menetelmistä. Se perustuu nestemäisen epoksipohjaisen polymeerin kovettumiseen kohdistetussa ultraviolettisäteilyssä kerros kerrallaan, minkä jälkeen kappale lasketaan yhden kerroksen verran nesteeseen alle uutta kovettamista varten (kuva 5). Menetelmällä saavutetaan tarvittaessa erittäin hyvä pinnanlaatu erityisesti, jos kappaleen valmistuttua se käsitellään tulostukseen käytetyllä nesteellä ja kovetetaan uudestaan altistamalla se UV-valolle. [13.]

Tulostusalusta on tulostimen merkistä ja mallista riippuen joko ylä- tai alapuolella. Yläpuolisen tulostusalustan etuna on tulostusmateriaalin hävikin vähentäminen, sillä tulostukseen ei tarvita tulostusalueen kokoista säiliötä syvyysuunnassa. Oikeinpäin tulostamista käytetäänkin lähinnä suurissa teollisen mittakaavan tulostimissa. [14.]

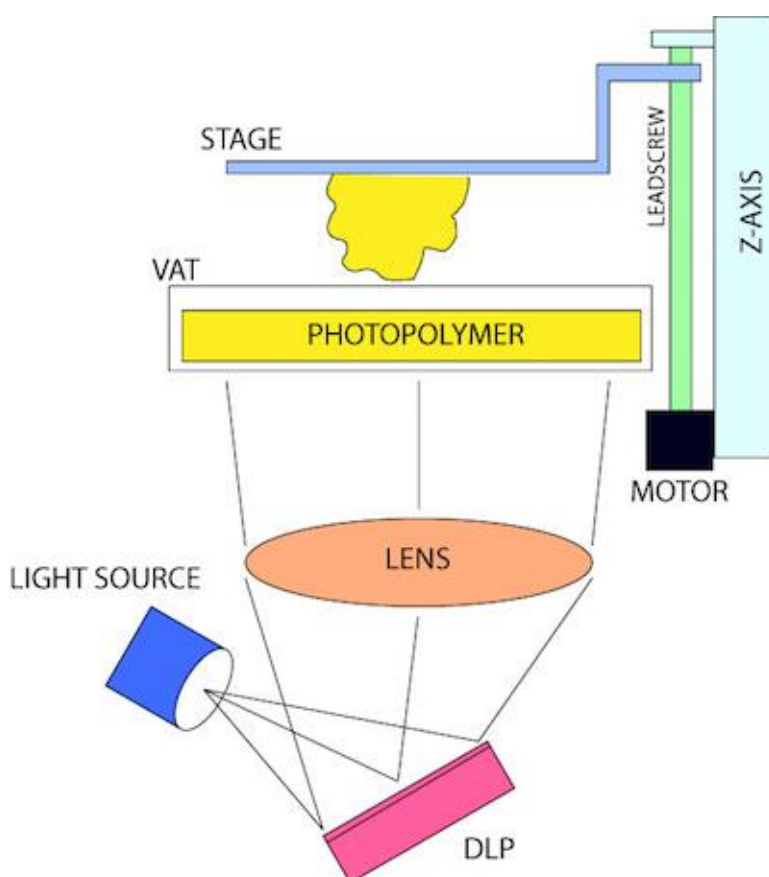


Kuva 5. SLA-menetelmän kuvaus [15].

Digital light processing-menetelmä (DLP) on hyvin samankaltainen kuin SLA, mutta valon lähteenä käytetään voimakasta näkyvää valoa ja se peilataan DLP-peilin kautta tulostustasoon, jossa nestemäinen polymeeri kovettuu (kuva 6) [15].

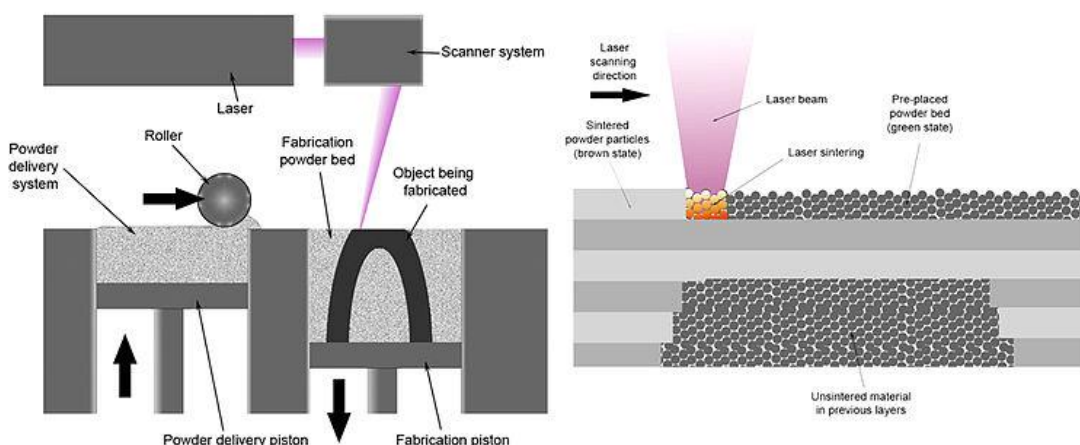
DLP-peili on elektronisesti ohjattava peili, joka koostuu jopa miljoonista mikropেيلةistä, joita jokaista voidaan ohjata yksittäisesti ja niiden avulla voidaan valaista koko tulostettavan kerroksen pinta-ala samanaikaisesti. Tällä saavutetaan erittäin suuri tulostusnopeus. Peilin on kehittänyt projektorikäyttöä varten Texas Instrumentsin työntekijä, Larry Hornbeck. [16.]

Haittapuolena on SLA-menetelmää heikompi resoluutio johtuen peilin rakenteesta, joka heijastaa tulostuspintaan pieniä neliöitä, joita kutsutaan voxeleiksi. Tästä johtuen tulosteeseen saattaa jäädä suurempia epätasaisuuksia SLA-tulostukseen verrattuna. [17.]



Kuva 6. DLP-menetelmän kuvaus [15].

Myös selective laser sintering-menetelmä (SLS) muistuttaa suuresti SLA-tulostusmenetelmää, mutta raaka-aine on nesteen sijasta jauhomaisessa muodossa. Tulostusalusta on tässä menetelmässä alapuolella, eli tulostukset syntyvät oikein päin. Metallijauhe sintrataan lasersäteen energialla ja jokaisen kerroksen jälkeen tulostusalustaa lasketaan hieman, minkä jälkeen päälle levitetään uusi materiaalikerros (kuva 7). Metallien tulostuksessa laserin energia ei riitä kuumentamaan materiaalia sulaksi asti vaan yhdistyminen tapahtuu kylmähitsauksena. [15.]



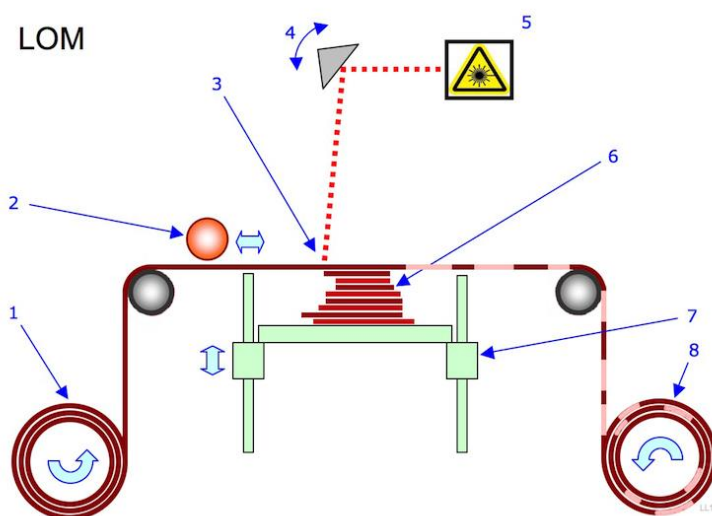
Kuva 7. SLS-menetelmän kuvaus [15.].

Selective laser melting-menetelmässä (SLM) on muuten sama periaate kuin SLS-tulostuksessa mutta laserin teho on suurempi, jotta käytetty metallijauhe saadaan kokonaan sulatettua. Tällöin saadaan materiaalista vahvempi kuin sintraamalla valmistetusta rakenteesta. [15.]

Kehitteillä on myös metallitulostusmenetelmä, jossa sirotellaan suuttimesta samanaikaisesti hiekkamuotti ja metallikerrokset upokkaaseen, joka lämmitetään myöhemmin uunissa metallipartikkeleiden sintrautumislämpötilaan. Sintrauksen jälkeen kappale poistetaan hiekkamuotista. Menetelmän etuna on muihin metallin tulostukseen tarkoitettuihin laitteistoihin verrattuna edullinen hintataso, sillä laite ei tarvitse erityisen kalliita komponentteja toimiakseen, kuten lasereita ja optiikkaa. [18.]

Laminoimalla voidaan valmistaa nopeasti fyysisiä malleja tai jopa toimivia komponentteja riippuen laminoitavasta materiaalista. Materiaali leikataan kerroksia vastaaviksi kappaleiksi ja pinotaan päällekkäin. Kerrokset voidaan kiinnittää toisiinsa esimerkiksi liimaamalla. [15.]

Kuvassa 8 esitetään tekniikan perustoiminta, mutta materiaalin leikkaus voidaan suorittaa laserin lisäksi myös mekaanisesti.

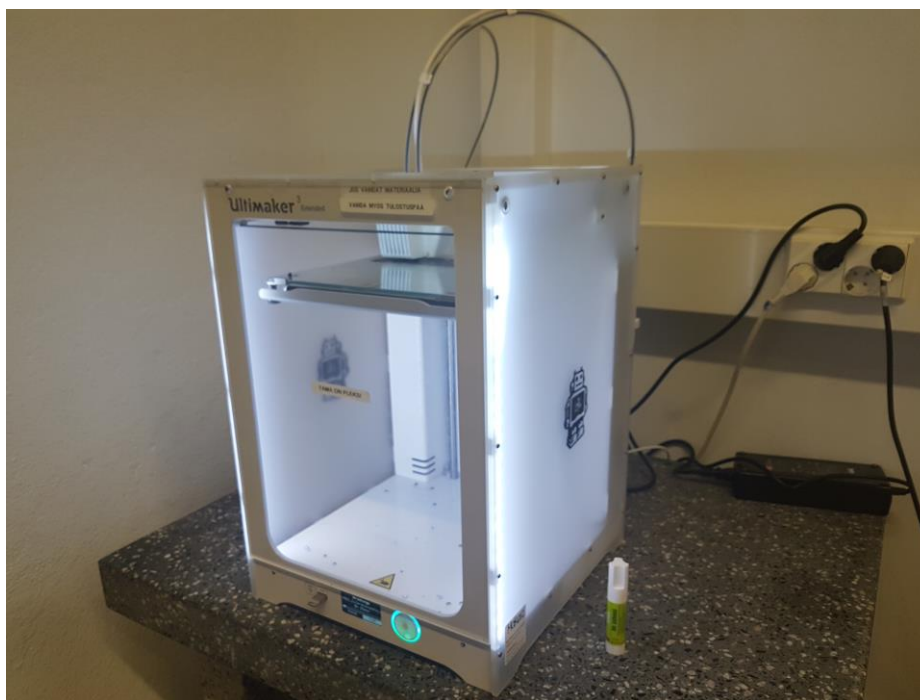


Kuva 8. Laminoititulosimen toiminta [15].

Fused deposit modeling-menetelmä (FDM) perustuu materiaalilangan pursotukseen kuuman suuttimen läpi, jossa se muuttuu sulaksi. Materiaalin vaatimuksista riippuen myös tulostusalustan pitää olla lämmitettävä, jottei kappale pääse jäähtymään epätasaisesti ja irtoa alustasta kesken tulostuksen. Usein tulostusalusta on lasia, jonka alla on lämmityselementti. Lämmitetyn alustan lisäksi voidaan alustaan levittää liimaa tai teippiä, jotta voidaan edelleen parantaa kappaleen kiinnittymistä. [19, s. 16.]

FDM-tulostimien rakenteita on olemassa erilaisia, mutta yleisimmät ovat deltamallin tulostin ja karteesinen tulostin. Deltamallin tulostimessa suutin on sijoitettu deltarobotin käteen ja tulostusalue on lieriömäinen. Karteesinen tulostin toimii X-Y-Z -akseleilla ja tulostusalue on kuution muotoinen. [19, s. 13–15.]

Akselien liikkeet on toteutettu eri tulostinmallista riippuen eri lailla, mutta tässä insinöörityössä käytetyn tulostimen (Ultimaker 3 Extended, kuva 9) suutinyksikkö liikkuu X- ja Y-akselilla (vaakatasossa) ja tulostusalueelta siirtyy Z-akselilla (pystysuunnassa). Tulostusalueen koko on 215 x 215 x 300 mm.



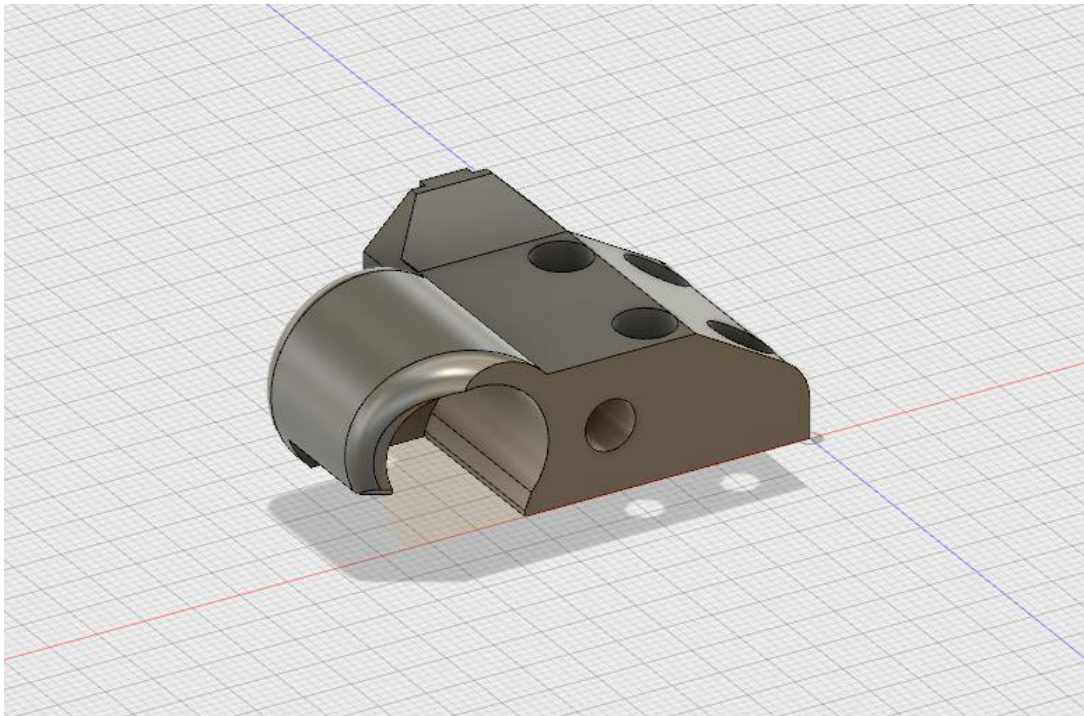
Kuva 9. Karteesinen 3D-tulostin, jota tässä työssä käytetään.

Edullisemmissä tulostimissa on yleensä vain yksi suutin, joten koko tulostettavan kappaleen on oltava samaa materiaalia. Ultimakerissa on kaksi vierekkäistä suutinta, joten sillä voidaan tulostaa kaksivärisiä komponentteja tai käyttää kokonaan eri materiaalia esimerkiksi tukirakenteen tulostukseen, jos kappaleen geometria vaatii sellaisen käyttöä.

Jokaisella 3D-tulostusmenetelmällä on yhteistä kappaleen konstruoiminen taso kerrallaan ja se, että tyhjän päälle tulostaminen ei onnistu. Siitä syystä tason suuntaisten ulkonemien (overhang) alle täytyy tulostaa tukimateriaalia, jonka saa valmiista tulosteesta helposti irrotettua mekaanisesti. Materiaalin ominaisuuksista riippuen voidaan jonkin verran tehdä ulkonemaa, mutta jos ei haluta käyttää tukimateriaalia, täytyy ulkonemia välttää komponentin suunnittelussa ja mahdollisesti muuttaa tulosteen asentoa tulostettaessa, esimerkiksi ylösalaisin tulostaminen tai tulostaa kappale useammassa osassa ja lopuksi liimata osat yhteen. [19, s. 54.]

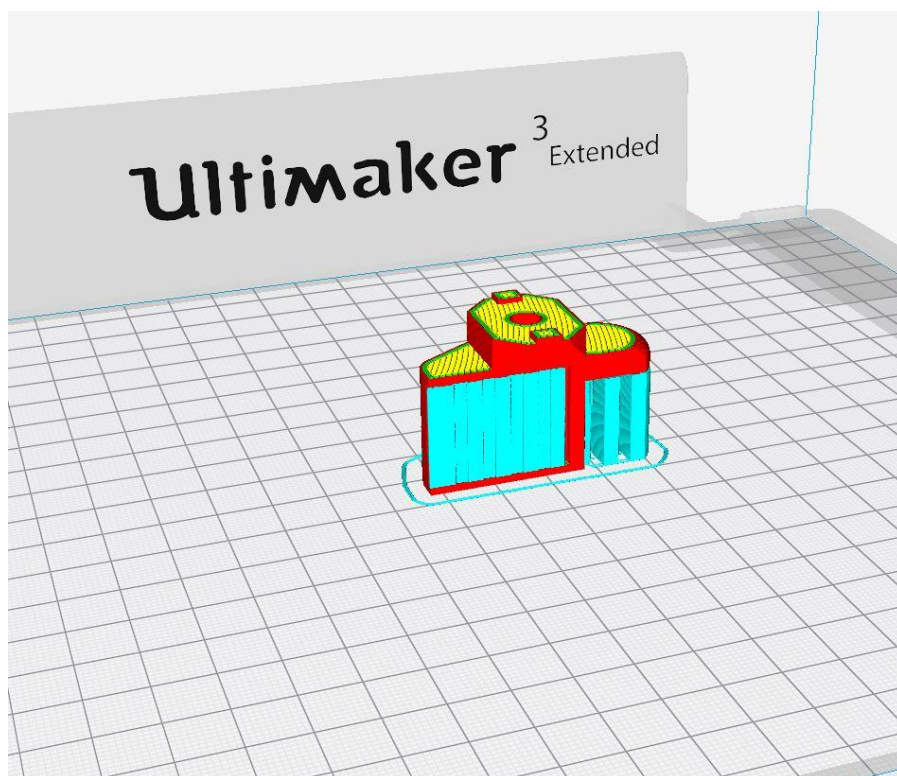
2.3 Ohjelmistot

3D-tulostusta varten on ensin luotava 3D-malli (kuva 10) rakennettavasta kappaleesta millä tahansa käyttöön sopivalla CAD-ohjelmistolla ja tallennettava se slicer-ohjelmiston (joka on käytännössä sama asia kuin 2.5D CAM-ohjelma lastuavassa työssä) ymmärtämään tiedostomuotoon.



Kuva 10. 3D-tulostettavan kappaleen CAD-malli.

Slicer-ohjelmistolla (Ultimaker Cura, kuva 11) luodaan mallin perusteella G-koodi, joka sisältää tulostimen suorittamat työradat ja käskyt muista toiminnoista, esimerkiksi tulosalustan lämmityksestä ja alustan koordinaatistokalibroinneista.



Kuva 11. CAD-malli tuotuna Ultimakerin Cura-ohjelmistoon.

Tässä työssä CAD-mallinnuksien tekoon on käytetty Autodesk Fusion 360-ohjelmaa ja g-koodin tuottamiseen Ultimakerin omaa Cura-ohjelmistoa, josta voi lähettää g-koodin tulostimelle lähiverkkoyhteyden yli tai muistitikun välityksellä tulostuksen aloittamiseksi. Curassa on myös web-kamera, josta voi seurata tulostuksen etenemistä lähiverkkoyhteyden kautta ja tarvittaessa keskeyttää tulostus, jos vaikuttaa siltä, että kappaleen valmistus epäonnistuu jostakin syystä.

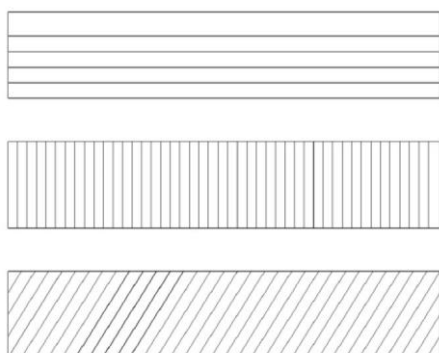
Myös muiden valmistajien ohjelmistoja voidaan käyttää, mutta tulostetuista kappaleista ei usein kannata tehdä kovin monimutkaisia, joten kevyemmätkin CAD-ohjelmistot riittävät hyvin tähän tarkoitukseen ja näin ei välttämättä tarvitse ylläpitää kalliita ohjelmistolisenssejä. Cura on käytössä siksi, että se toimii hyvin yhteen saman valmistajan tulostimen kanssa ja on helppokäyttöinen.

3 Mittaukset

Insinööriyötä varten valmistettiin useita koekappaleita vetokokeeseen, sekä mittatarkkuuden määrittämistä varten.

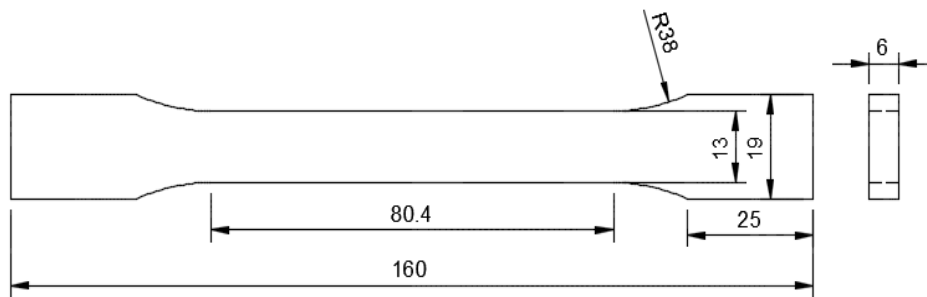
3.1 Vetokoe

Vuonna 2014 tehdyssä tutkimuksessa vertailtiin eri tulostussuuntien vaikutusta kappaleen teknisiin ominaisuuksiin. Tutkimusta varten oli PLA materiaalista valmistettu kolmeen eri suuntaan tulostettuja vetosauvoja (kuva 12). [20.]



Kuva 12. Vetosauvojen tulostussuunnat [20].

Tarkoituksena oli valmistaa vetosauvoja, joiden tulostussuunnat ovat 45 asteen kulmassa 90 astetta ristikkäin, eli samankaltaisilla tulostusasetuksilla kuin normaalisti kappaleita valmistaessa, ja vertailla murtolujuutta, venymää ja kimmokerrointa aikaisemmin tehtyyn tutkimukseen ja valmistajan ilmoittamiin arvoihin. Tulostettavat kappaleet jäivät sisältä osittain ontoiksi täyttöprosentin ollessa luokkaa 20 – 50 %. Ontosta kappaleesta ei voida luotettavasti määrittää murtoalueen poikkipinta-alaa, joten vetosauvat on tulostettu 100 %:n täytöllä ja 0.4 mm:n suutinkoolla parhaalla mahdollisella laadulla (0.06 mm). Vetosauvan pituutta täytyi kasvattaa johtuen käytössä olleen vetolaitteen extensometrin mitta-alueesta (50 mm) joka oli suurempi kuin aiemmassa tutkimuksessa käytetty (25 mm). (Kuva 13.)



Kuva 13. Vetosauvan dimensiot.

Koevedot suoritettiin nopeudella 1.05 mm/min, sillä suuremmalla nopeudella, jota aiemmassa tutkimuksessa käytettiin, vetosauva katkesi epäonnistuneesti ja hitaammalla nopeudella saavutettiin toistettavimmat tulokset. Vetolaitteessa oli extensometri 50 mm:n mittausvälillä (kuva 14). Vetosauvaan merkittiin kolme paria mittauspisteitä stanssilla. Pisteiden etäisyys toisistaan oli 50 mm. Kokeet suoritettiin huoneen lämpötilan ollessa 23 ± 0.1 °C



Kuva 14. Vetosauva asetettuna vetolaitteeseen.

Mittauksesta saadaan tietoon voimat sekä venymä, joista mittausohjelmisto piirtää jännitys-venymäkuvaajan sekä laskee murtolujuuden ja kimmokertoimen. Tarvittavat ominaisuudet voidaan laskea myös manuaalisesti:

Murtolujuus σ_m

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A}, \quad (1)$$

jossa F_{max} on maksimivoima ja A on kappaleen poikkipinta-ala.

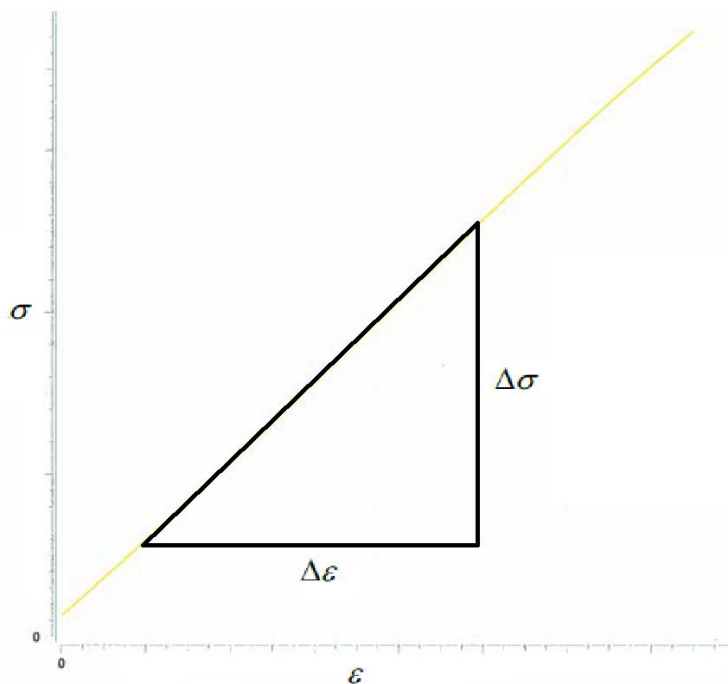
Suhteellinen venymä ε

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

jossa L_0 on alkuperäinen pituus millimetreissä, L on pituus millimetreissä murtumisen jälkeen ja ΔL on pituuden muutos millimetreissä.

Kimmokerroin E saadaan jännityksen (σ) muutoksen ja venymän (ε) muutoksen suhteesta, kerrottuna 100 %:lla. [22.] (kuva 15.)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 100\%, \quad (3)$$



Kuva 15. Kimmokerroin määritellään jännitys-venymäkuvaajan alkupään lineaariselta osuudelta.

Murtovenymä A50 saadaan muuttamalla suhteellinen venymä prosenteiksi.

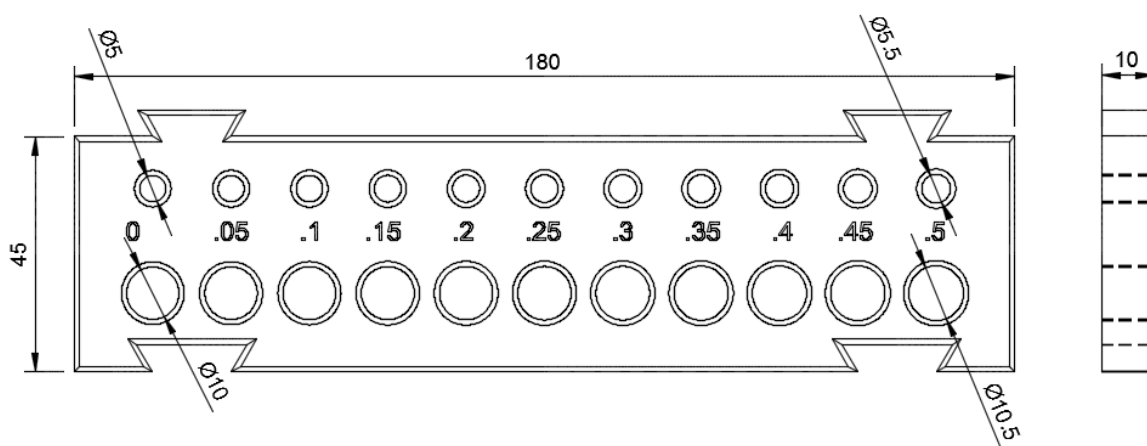
$$A50 = \varepsilon \times 100\% \quad (4)$$

3.2 Mittatarkkuuden määrittäminen

Koekappaleita valmistettiin jokaisesta materiaalista (PLA, PC, PA, ABS) 0.4 mm:n suutinkoolla kahdella eri tulostuslaadulla (0.10 mm:n ja 0.15 mm:n tulostuskerros).

Kappaleet suunniteltiin siten, että koelevyihin tehtiin kaksi erikokoista reikäsarjaa ($\varnothing 5$ - 5.5 mm ja $\varnothing 10$ - 10.5 mm) 0.05 mm portain, sekä lisäksi tasan $\varnothing 10$ mm ja $\varnothing 5$ mm tapit. (Kuva 16.) Todelliset sisähalkaisijat mitattiin työntömitalla kahdesta suunnasta ja tuloksista laskettiin keskiarvo. Kappaleet tulostettiin 20 %:n täytöllä. Kappaleisiin suunniteltiin myös lohenpyrstöliitokset, joilla koekappaleet saadaan kiinnitettyä toisiinsa.

Lisäksi nylonista (PA) valmistettiin 0.15 mm:n tulostuslaadulla ylimääräinen koekappale, jossa oli sisähalkaisijat 5 – 45 mm. Tästä koekappaleesta oli tarkoitus määrittää, pitääkö epätarkkuus paikkaansa myös suuremmilla sisähalkaisijoilla.



Kuva 16. Mittatarkkuuden määrittämiseen käytetyn koelevyn dimensiot.

3.3 Kokeiden mittaustulokset

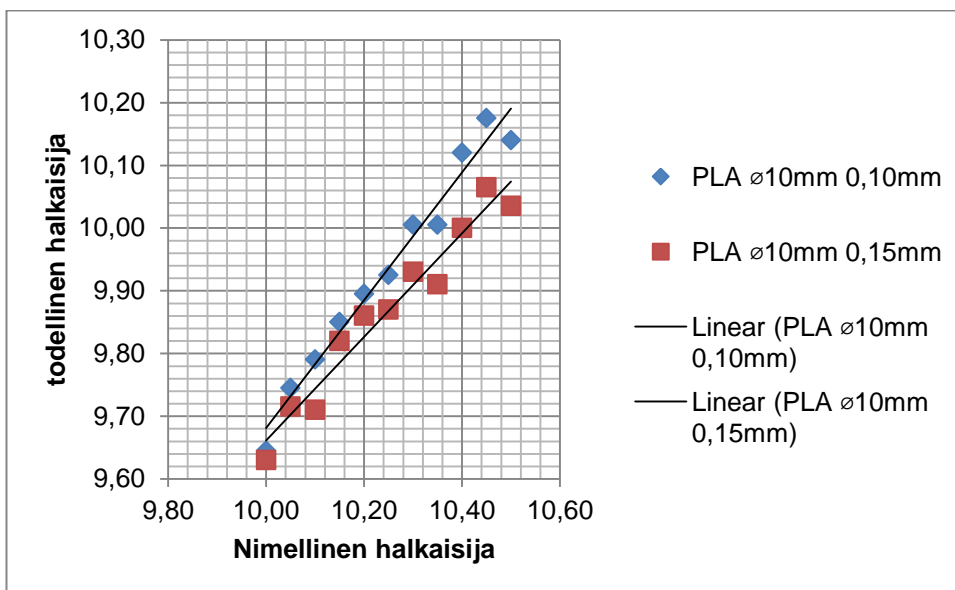
Onnistuneita vetokokeita suoritettiin kolme kappaletta. Murtovenymä saatiin mitattua luotettavasti vain yhdestä koekappaleesta, jonka murtopinta jäi mittauspisteiden välille. Kahdessa kappaleessa murtokohta syntyi vetokoneen puristusleuan lähelle. (Taulukko 2.)

Taulukko 2. Vetokokeiden tuloksia

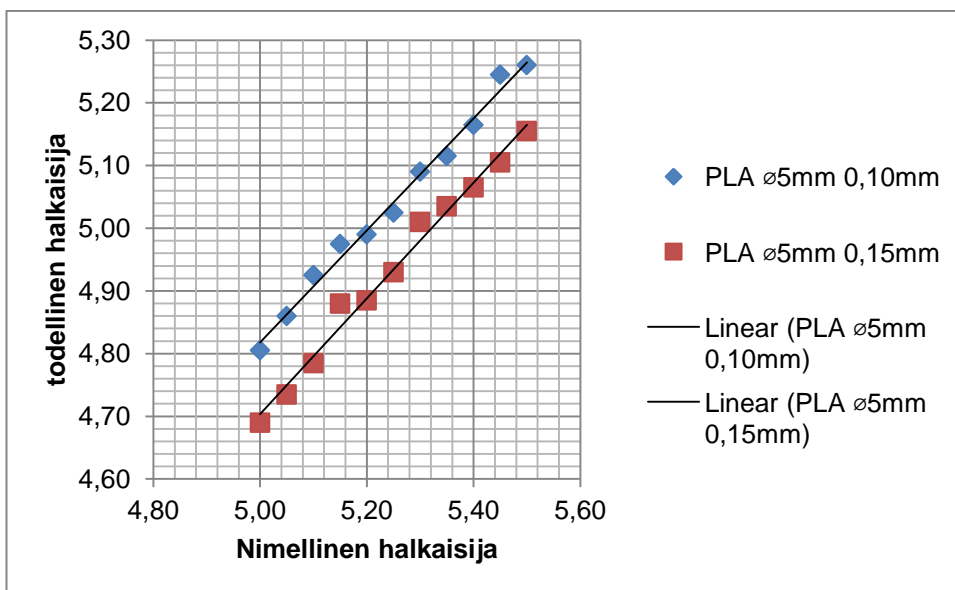
Maksimivoima F [N]	Poikkipinta-ala A [mm ²]	Murtolujuus Rm [MPa]	L ₀ [mm]	L [mm]	A50 [%]	Kimmokerroin [MPa]
4347,30	80,17	54,22	-	-	-	2304
4237,65	78,60	53,91	50,00	51,80	3,60	2459
4046,30	77,78	52,02	-	-	-	2236

Koe suoritettiin vetolaitteella, joka on säädetty teräksen vetokoetta varten joten kimmo kertoimet on laskettu erilailla kuin muovin standardissa. Jännitys-venymäkäyrästä manuaalisesti tarkistamalla tarkan arvon määrittäminen on kuitenkin epätarkempi menetelmä, eikä suurta eroa lopputuloksessa lopulta ole.

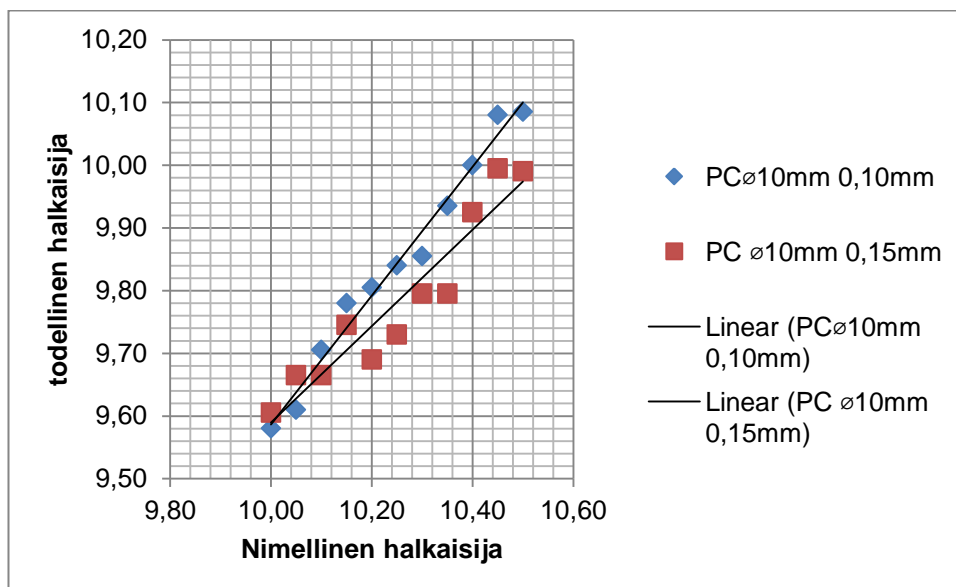
Mittatarkkuuden määrittämistä varten valmistettiin yhteensä kahdeksan koekappaletta eri materiaaleilla ja tulostuskerroksien paksuuksilla. Lisäksi jokaisella laadulla ja materiaaleilla valmistettiin tapit ulkohalkaisijoiden mittausta varten. (Kuvat 17 – 24.)



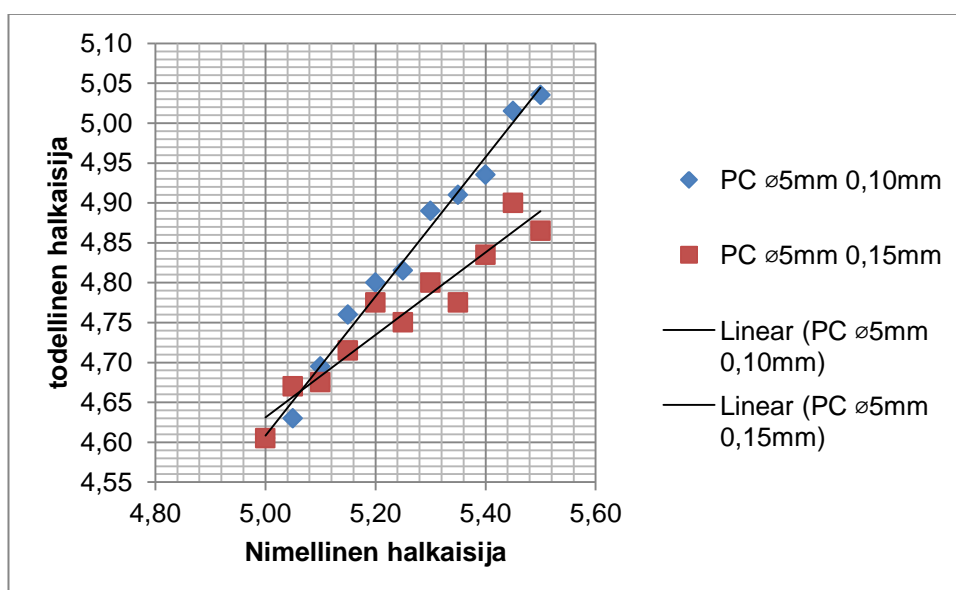
Kuva 17. Materiaalina PLA, sisähalkaisija 10 mm.



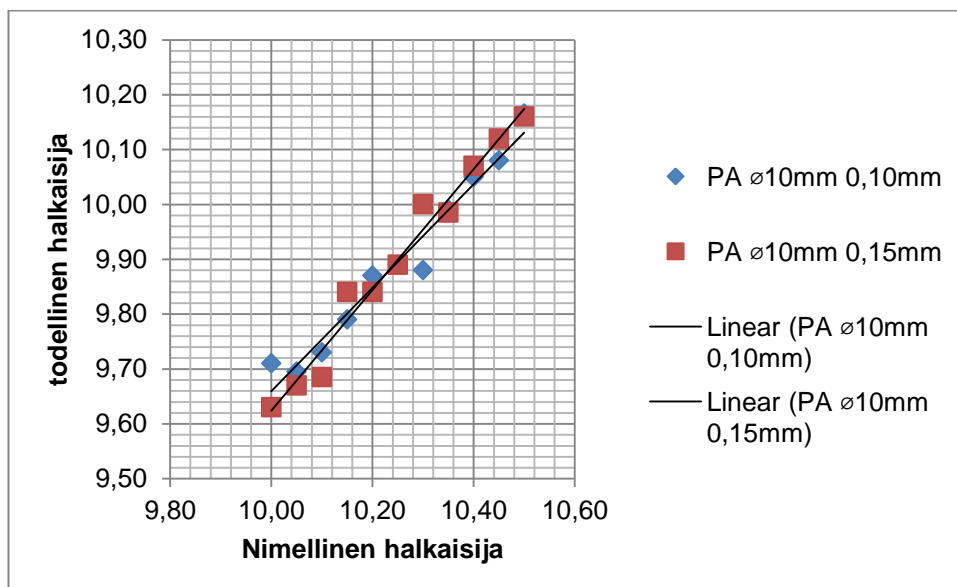
Kuva 18. Materiaalina PLA, sisähalkaisija 5 mm.



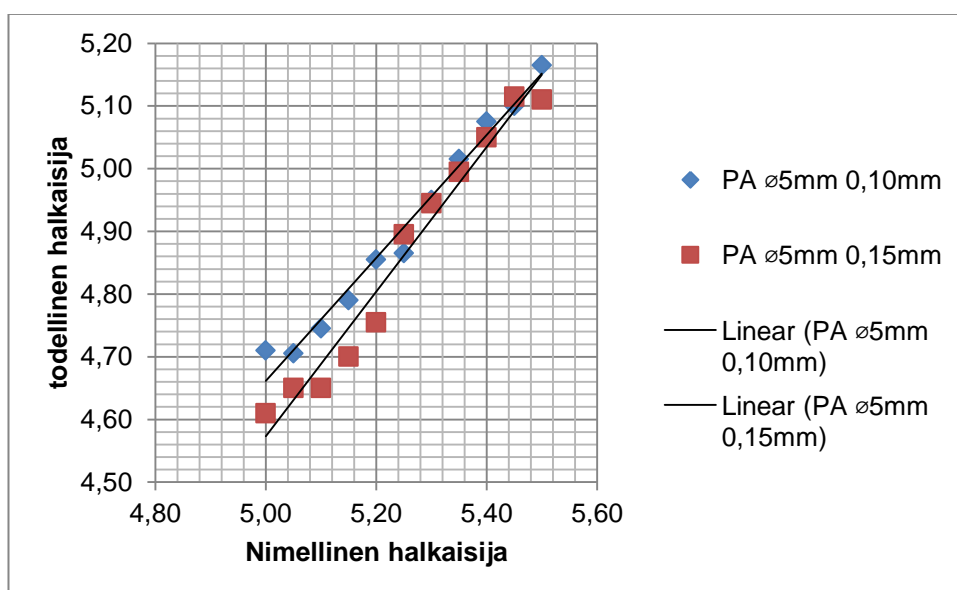
Kuva 19. Materiaalina PC, sisähalkaisija 10 mm.



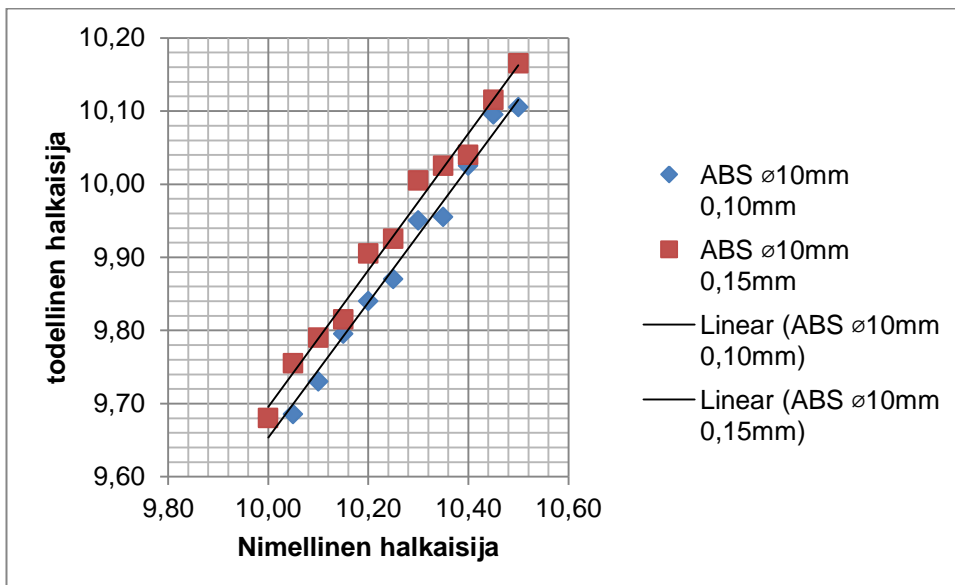
Kuva 20. Materiaalina PC, sisähalkaisija 5 mm.



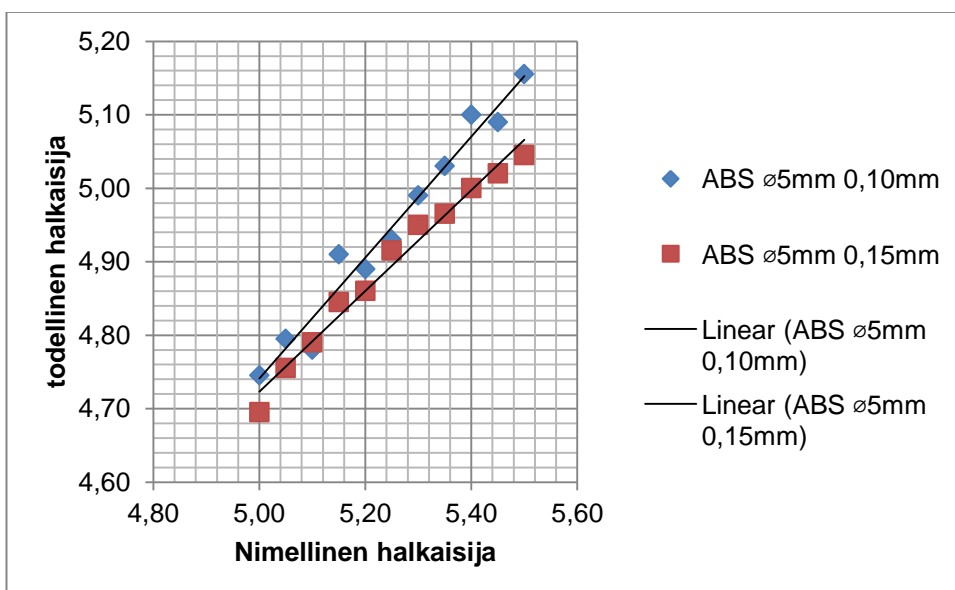
Kuva 21. Materiaalina PA, sisähalkaisija 10 mm.



Kuva 22. Materiaalina PA, sisähalkaisija 5 mm.



Kuva 23. Materiaalina ABS, sisähalkaisija 10 mm.



Kuva 24. Materiaalina ABS, sisähalkaisija 5 mm.

Taulukossa 3 esitetään reikäsarjojen halkaisijoiden keskiarvoinen erotus nimellisistä arvoista eri materiaaleilla, sekä tulostuslaaduilla.

Taulukko 3. Todellisten sisähalkaisijoiden ja nimellisten halkaisijoiden erotusten keskiarvo.

Reikäsarja	PLA	PC	PA	ABS
∅ 10 mm, 0.10	-0,31	-0,41	-0,35	-0,37
∅ 10 mm, 0.15	-0,38	-0,47	-0,35	-0,32
∅ 5 mm, 0.10	-0,21	-0,42	-0,34	-0,30
∅ 5 mm, 0.15	-0,32	-0,49	-0,39	-0,36

Taulukossa 4 esitetään muiden halkaisijoiden mittaustulokset nylonista valmistetusta koekappaleesta 0.15mm:n tulostuslaadulla.

Taulukko 4. Epätarkkuuden määrittäminen muille sisähalkaisijoille.

nimellinen	mittaus 1	mittaus 2	KA	erotus
∅ 5 mm	4,81	4,78	4,795	-0,205
∅ 10 mm	9,77	9,82	9,795	-0,205
∅ 15 mm	14,86	14,75	14,805	-0,195
∅ 20 mm	19,7	19,84	19,77	-0,23
∅ 25 mm	24,85	24,72	24,785	-0,215
∅ 30 mm	29,65	29,87	29,76	-0,24
∅ 35 mm	34,66	34,75	34,705	-0,295
∅ 40 mm	39,77	39,64	39,705	-0,295
∅ 45 mm	44,71	44,81	44,76	-0,24

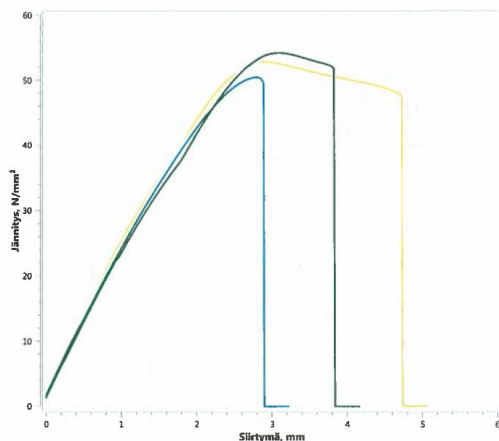
Taulukossa 5 esitetään valmistettujen tappien halkaisijoiden mittaustulokset eri materiaalien, sekä tulostuslaadun osalta.

Taulukko 5. Tappien todellisten ulkohalkaisijoiden ja nimellisten halkaisijoiden erotusten keskiarvo.

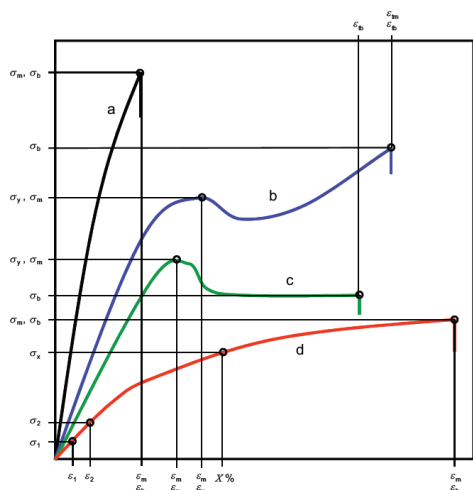
Tappisarja	PLA	PC	PA	ABS
∅ 10 mm, 0.10	0,05	0,00	-0,13	-0,07
∅ 10 mm, 0.15	-0,04	-0,04	0,00	-0,03
∅ 5 mm, 0.10	0,10	0,09	-0,06	0,00
∅ 5 mm, 0.15	0,13	0,15	0,04	0,15

3.4 Tulosten tulkinta

Verrattaessa kuvan 25. jännitys-venymäkuvaajaa kuvan 26. tyypillisiin kuvaajiin, voidaan todeta, että kokeessa käytetty materiaali (PLA) oli suhteellisen haurasta. Murtolujuudet olivat vuoden 2014 tutkimuksen [20] ja valmistajan ilmoittamien lujuuksien (Taulukko 1) välillä. Eron tuloksien välillä voidaan olettaa johtuvan eri materiaalseoksista sekä koelaitteistojen eroista, sillä nyt käytössä ollut vetolaitteisto oli säädetty käytettäväksi teräksen testaukseen.



Kuva 25. Suoritetujen vetokokeiden jännitys-venymäkäyrät yhdistettynä saman kuvaajaan.



Kuva 26. Tyypillisiä muovien jännitys-venymäkuvaajia, jossa a-käyrällä on hauras materiaali ja d-käyrällä elastinen materiaali [23].

Mittatarkkuuskappaleiden osalta todettiin todellisen sisähalkaisijan olevan jokaisella materiaalilla pienempi kuin suunniteltu sisähalkaisija. Epätarkkuuden suuruus oli riippuvainen valitusta materiaalista sekä tulostuslaadusta eli tulostuskerroksien paksuudesta. Epätarkkuuden todettiin olevan samansuuruisia myös suuremmilla sisähalkaisijoilla.

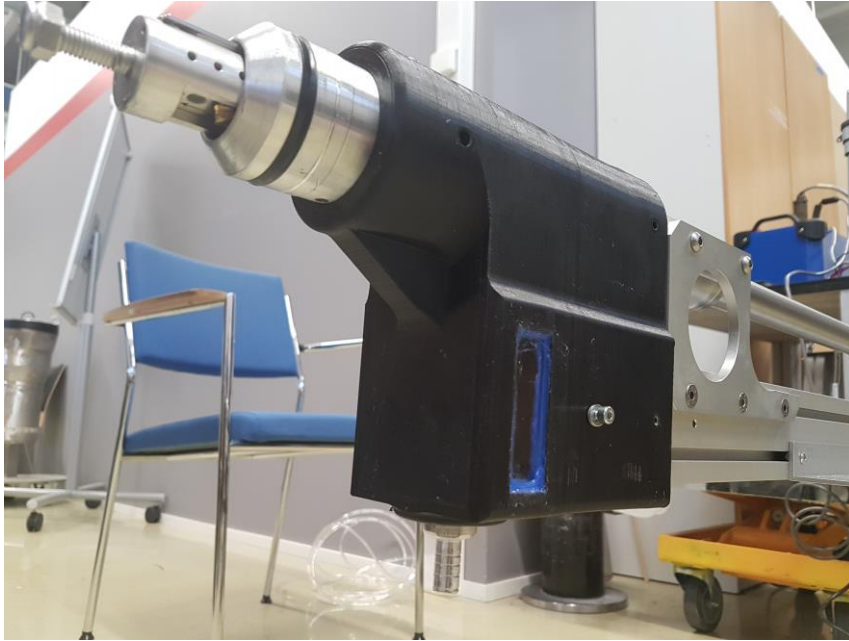
Mittausten perusteella todettiin, että ulkohalkaisijoiden muutos ei ole niin suurta kuin sisähalkaisijoilla. Suurin osa eroista nimellishalkaisijoihin oli seurausta muotovirheistä, joita syntyy kiinnityksestä tulostusalustaan, sekä tulostinpään liikeradasta ulkokehällä jolloin materiaalisuuttimen liikeradan pysähtymisen aikana kappaleen reunan läheisyydessä tapahtui lämpömuovautumista. Suuremmilla kappaleilla ulkomitat pysyvät paremmin hallinnassa. Sama ilmiö liikeradan pysähtymisessä tapahtui myös sisähalkaisijan osalta.

4 3D-tulostuksen hyödyntäminen NDT-tarkastuksessa

NDT-tarkastus (Nondestructive testing) tarkoittaa materiaalin rikkomatonta testausta, jossa toisin kuin rikkovassa testauksessa tarkastettava kappale jää ehjäksi käyttöä varten. NDT sisältää erilaisia tutkimusmenetelmiä, joista yleisimmät ovat pintatarkastusmenetelmät, joihin voidaan luokitella visuaalinen-, magneettijauhe-, tunkeumaneste- ja pyörrevirtatarkastus, sekä volymetriset menetelmät joihin kuuluvat ultraäänitarkastus ja radiografia. [21.]

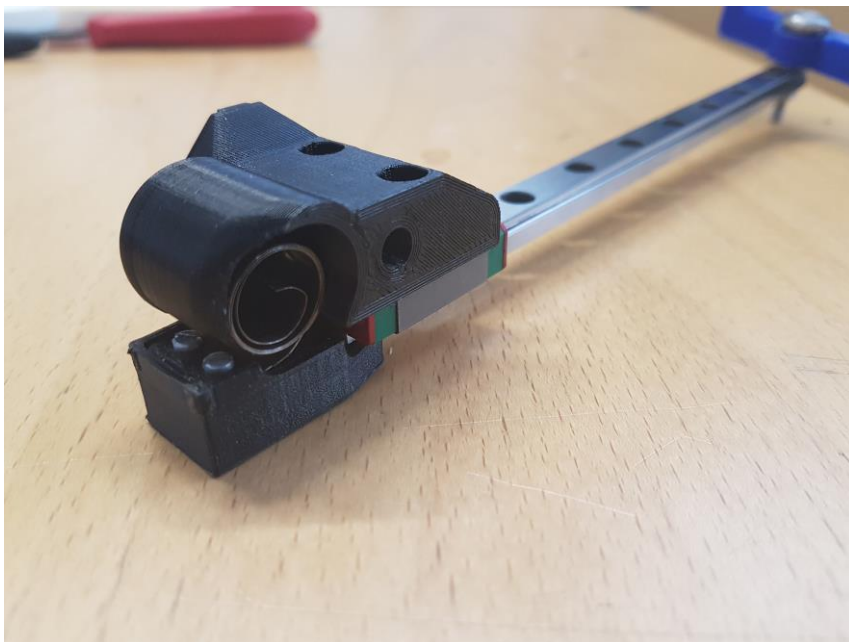
Taulukoita 3, 4 ja 5 voidaan käyttää apuvälineenä suunniteltaessa CAD-ohjelmistolla komponentteja, joissa mittatarkkuudella on merkitystä. Esimerkiksi erilaisissa konstruktioissa täytyy toleranssit ottaa huomioon, jotta vältetään materiaalin työstöstä johtuvista lisätyövaiheista.

Taloudellisia kustannuksia voidaan vertailla tilanteessa, jossa valmistettiin tulostamalla junan akselin tarkastukseen tarkoitettun skannerin keskityskappale (kuva 27). Kappaleen valmistuksessa kulutettiin noin 900 g nylonmateriaalia, jonka hinta on n. 55 € / 750 g:n rulla. Tulostamiseen kului aikaa n. 95 tuntia, ja se suoritettiin viikonlopun aikana ilman valvontaa. Perinteisillä valmistusmenetelmillä saman kappaleen valmistukseen käytettäisiin raaka-aineena polyasetalia eli POM-muovia, jota useimmat jälleenmyyjät kauppaavat vähintään metrin mittaisena tankona. Tangon hinta oli ostettaessa vuonna 2015 n. 830 € / m. Materiaalikustannuksen lisäksi koneistukseen joudutaan käyttämään yhden henkilön normaali työpäivä, kun taas tulostaessa henkilöresurssi on vapaana muuhun käyttöön. Täten voidaan katsoa kyseisen yksittäiskappaleen tulostamisen olevan hyvin edullista verrattuna koneistukseen.



Kuva 27. 3D-tulostettu akselin ultraääniskannerin keskityskappale asennettuna paikalleen.

Toinen esimerkki tehdystä tulostuksesta on aikaisemmin kuvassa 10 ja 11 esitetyn vakiovoimajousen kotelo sekä jousen kiinnike. Jousen avulla aikaansaadaan lineaarijohteen toiseen päähän kiinnitettyyn ultraääniluotaimen liikkeeseen säätövaraa sekä hyvä kontakti tarkastettavan kohteen pintaan. (Kuva 28.)



Kuva 28. Vakiovoimajousen kiinnike ja kotelo tulostettuna ja asennettuna.

Suurin osa resursseista 3D-tulostuksessa kuluu kappaleiden suunnitteluun sekä mallinnukseen, koska tulostus ei sovellu hyvin osien sarjatuotantoon eli valmistettavat komponentit ovat usein yksittäisiä kappaleita eikä valmiita malleja ole aina käytettävissä, tai vähintään niitä on muokattava käyttötärpeeseen.

4.1 Yhteenveto

Työn aikana kävi selväksi, että tulostuslaitteen käyttö vaatii jonkin verran harrastuneisuutta ja tulostusasetusten muuttaminen Curassa ei välttämättä vaikuta tulostuksen laatuun lineaarisesti ja halutulla tavalla.

Työssä käytetty tulostin tunnistaa saman valmistajan tuottamat materiaalirullat radio frequency identification -tunnisteella (RFID) ja osaa antaa ohjelmistoon oletusasetukset kyseiselle materiaalille, mutta tietyissä tilanteissa arvoja voidaan joutua hieman säätämään, jotta saavutetaan haluttu lopputulos. Myös muiden valmistajien materiaaleja voidaan käyttää, mutta arvoja voidaan joutua muuttamaan vielä enemmän.

Kappaleiden pinnanlaatua suurempi merkitys on niiden toiminta ja kestävyys käyttökohteessa. Tämän ansiosta voidaan useat kappaleet tulostaa heikommalla laadulla, jotta saavutetaan lyhyempi tulostusaika. Heikomman laadun lisäksi tulostusaika kannattaa optimoida siten, että suuremmat tulostukset suoritetaan ilta-aikaan, jolloin työpäivän aikana tulostin on vapaana pienempiä ja ajallisesti lyhyempiä tulostustöitä varten.

Kokeissa sisähalkaisijan mittavirheen todettiin olevan välillä 0.21–0.49 mm riippuen käytetystä materiaalista sekä tulostuslaadusta. Taulukosta 3 saadaan kuitenkin hyvä arvio mitoitusvirheeseen kappaleen suunnittelussa.

Taulukosta 4 havaittiin virheen pysyvän samansuuruisena myös suuremmilla halkaisijoilla.

Lähteet

1. Gibson, I. & Rosen, D. & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies. Verkkodokumentti. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3> Luettu 4.1.2018.
2. Molitch-Hou, M. (2017). Best 3D Printer Materials: Ceramics, Sand, Food, Organs and More. Verkkodokumentti. <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15103/Best-3D-Printer-Materials-Ceramics-Sand-Food-Organs-and-More.aspx> Luettu 4.1.2018.
3. Coorstek. (N.d). Properties. Verkkodokumentti. <http://www.dynacer.com/properties/> Luettu 4.1.2018.
4. Johnson, M. (2017). Dental 3D Printing: Teeth, Implants, Dentures and Crowns. Verkkodokumentti. <https://www.embodi3d.com/blogs/entry/384-dental-3d-printing-teeth-implants-dentures-and-crowns/> Luettu 4.1.2018.
5. VTT (N.d). Case Study: Hydraulic valve block redesign for additive manufacturing. Verkkodokumentti. http://www.vtt.fi/files/services/mav/ValveBlock_VTTInternetVersion.pdf Luettu 5.1.2018.
6. Höök, T. (2009). Muotin valmistus. Verkkodokumentti. http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/mould_injmoulding_materials_FI.pdf Luettu 5.1.2018.
7. Photopolymers. (N.d). What are photopolymers? Verkkodokumentti. <http://photopolymer.com/> Luettu 8.1.2018.
8. Muoviteollisuus ry. (N.d). Muovisanastoa. Verkkodokumentti. <http://www.plastics.fi/fin/muovitieto/sanasto/> Luettu 8.1.2018.
9. Muoviplast (2014). Hyvä tietää muovista verkkodokumentti. <http://www.muoviyhdistys.fi/tietoa-muovista/> Luettu 8.1.2018.
10. Ultimaker. (N.d). Tekniset tiedot PLA Verkkodokumentti. <https://ultimaker.com/en/resources/50461-technical-and-safety-data-sheets> Luettu 8.1.2018.
11. Gardiner, B. (2016). Three new 3D printing technologies for composites. Verkkodokumentti. <https://www.compositesworld.com/blog/post/three-new-3d-printing-technologies-for-composites> Luettu 5.1.2018.

12. Halbig, M. & Singh, M. (2015). Additive Manufacturing of SiC-Based Ceramics and Ceramic Matrix Composites. Verkkodokumentti. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150018259> Luettu 5.1.2018.
13. 3D systems. (N.d.). What is Stereolithography (SLA)? Verkkodokumentti. <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla> Luettu 3.1.2018.
14. Formlabs. (N.d.). The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. Verkkodokumentti. <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/> Luettu 11.1.2018.
15. 3D insider. (N.d.). The 9 Different Types of 3D Printers. Verkkodokumentti <http://3dinsider.com/3d-printer-types/> Luettu 3.1.2018.
16. Texas Instruments (N.d). How TI DLP® technology works. Verkkodokumentti. <http://www.ti.com/dlp-technology/about/how-it-works.html> Luettu 11.1.2018.
17. Formlabs. (2016). 3D Printing Technology Comparison: SLA vs. DLP. Verkkodokumentti. <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/> Luettu 3.1.2018.
18. Iro3D. (2017). \$5000 3D printer that prints steel. Verkkodokumentti. <http://iro3d.com/> Luettu 22.1.2018.
19. Horvath, J. (2014). Mastering 3D printing. Verkkodokumentti. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0025-4> Luettu 20.12.2017.
20. Lecher, T. & Waytashek, M. (2014). Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer. Verkkodokumentti. https://www.researchgate.net/publication/272623242_Material_Property_Testing_of_3D-Printed_Specimen_in_PLA_on_an_Entry-Level_3D_Printer Luettu 2.1.2018.
21. ASNT. (N.d). Introduction to Nondestructive Testing. Verkkodokumentti. <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT> Luettu 22.1.2018.
22. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry. (2016). SFS-EN ISO 6892-1:2016 Metallien vetokoe. Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa. Standardi. Luettu 25.1.2018.
23. International Organization for Standardization. (2012). ISO 527-1:2012(E) Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles. Standardi. Luettu 24.1.2018.

PLA	Kerroksen paksuus 0.10mm			Kerroksen paksuus 0.15mm		
	Nimellinen	mittaus 1	mittaus 2	0,06mm	mittaus 1	mittaus 2
10,00	9,65	9,64	9,65	9,63	9,63	9,63
10,05	9,74	9,75	9,75	9,73	9,70	9,72
10,10	9,78	9,80	9,79	9,70	9,72	9,71
10,15	9,82	9,88	9,85	9,80	9,84	9,82
10,20	9,91	9,88	9,90	9,83	9,89	9,86
10,25	9,86	9,99	9,93	9,86	9,88	9,87
10,30	10,07	9,94	10,01	9,98	9,88	9,93
10,35	9,92	10,09	10,01	9,90	9,92	9,91
10,40	10,19	10,05	10,12	10,03	9,97	10,00
10,45	10,11	10,24	10,18	10,04	10,09	10,07
10,50	10,20	10,08	10,14	10,05	10,02	10,04
Ø10 Tappi	10,03	10,07	10,05	9,91	10,01	9,96

PLA	Kerroksen paksuus 0.10mm			Kerroksen paksuus 0.15mm		
	Halkaisija	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo	mittaus 1	mittaus 2
5,00	4,80	4,81	4,81	4,72	4,66	4,69
5,05	4,83	4,89	4,86	4,72	4,75	4,74
5,10	4,97	4,88	4,93	4,77	4,80	4,79
5,15	5,00	4,95	4,98	4,90	4,86	4,88
5,20	4,96	5,02	4,99	4,89	4,88	4,89
5,25	5,08	4,97	5,03	4,94	4,92	4,93
5,30	5,03	5,15	5,09	5,02	5,00	5,01
5,35	5,17	5,06	5,12	5,06	5,01	5,04
5,40	5,09	5,24	5,17	5,09	5,04	5,07
5,45	5,29	5,20	5,25	5,16	5,05	5,11
5,50	5,19	5,33	5,26	5,20	5,11	5,16
Ø5 Tappi	5,15	5,04	5,10	5,08	5,17	5,13

PC	Kerroksen paksuus 0.10mm			Kerroksen paksuus 0.15mm		
	Halkaisija	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo	mittaus 1	mittaus 2
10,00	9,64	9,52	9,58	9,55	9,66	9,61
10,05	9,59	9,63	9,61	9,71	9,62	9,67
10,10	9,74	9,67	9,71	9,62	9,71	9,67
10,15	9,74	9,82	9,78	9,75	9,74	9,75
10,20	9,83	9,78	9,81	9,74	9,64	9,69
10,25	9,78	9,90	9,84	9,72	9,74	9,73
10,30	9,90	9,81	9,86	9,81	9,78	9,80
10,35	9,90	9,97	9,94	9,75	9,84	9,80
10,40	10,04	9,96	10,00	9,96	9,89	9,93
10,45	10,05	10,11	10,08	9,97	10,02	10,00
10,50	10,11	10,06	10,09	10,02	9,96	9,99
Ø10 Tappi	9,98	10,03	10,01	9,85	10,07	9,96

PC	Kerroksen paksuus 0.10mm			Kerroksen paksuus 0.15mm		
	Halkaisija	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo	mittaus 1	mittaus 2
5,00	4,61	4,60	4,61	4,55	4,66	4,61
5,05	4,58	4,68	4,63	4,76	4,58	4,67
5,10	4,71	4,68	4,70	4,62	4,73	4,68
5,15	4,71	4,81	4,76	4,78	4,65	4,72
5,20	4,86	4,74	4,80	4,71	4,84	4,78
5,25	4,74	4,89	4,82	4,80	4,70	4,75
5,30	4,92	4,86	4,89	4,75	4,85	4,80
5,35	4,86	4,96	4,91	4,84	4,71	4,78
5,40	4,99	4,88	4,94	4,75	4,92	4,84
5,45	4,94	5,09	5,02	4,99	4,81	4,90
5,50	5,08	4,99	5,04	4,80	4,93	4,87
Ø5 Tappi	5,10	5,07	5,09	5,18	5,11	5,15

PA	Kerroksen paksuus 0.10mm			Kerroksen paksuus 0.15mm		
Halkaisija	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo
10,00	9,68	9,74	9,71	9,65	9,61	9,63
10,05	9,62	9,77	9,70	9,58	9,76	9,67
10,10	9,70	9,76	9,73	9,77	9,60	9,69
10,15	9,82	9,76	9,79	9,81	9,87	9,84
10,20	9,83	9,91	9,87	9,90	9,78	9,84
10,25	9,93	9,85	9,89	9,84	9,94	9,89
10,30	9,89	9,87	9,88	10,05	9,95	10,00
10,35	10,04	9,94	9,99	9,95	10,02	9,99
10,40	10,11	9,99	10,05	10,16	9,98	10,07
10,45	10,10	10,06	10,08	10,15	10,09	10,12
10,50	10,14	10,19	10,17	10,20	10,12	10,16
Ø10 Tappi	9,93	9,81	9,87	10,01	9,99	10,00

PA	Kerroksen paksuus 0.10mm			Kerroksen paksuus 0.15mm		
Halkaisija	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo
5,00	4,74	4,68	4,71	4,67	4,55	4,61
5,05	4,67	4,74	4,71	4,60	4,70	4,65
5,10	4,81	4,68	4,75	4,69	4,61	4,65
5,15	4,68	4,90	4,79	4,62	4,78	4,70
5,20	4,89	4,82	4,86	4,81	4,70	4,76
5,25	4,82	4,91	4,87	4,84	4,95	4,90
5,30	4,96	4,94	4,95	4,89	5,00	4,95
5,35	4,98	5,05	5,02	5,07	4,92	5,00
5,40	5,08	5,07	5,08	5,01	5,09	5,05
5,45	5,08	5,12	5,10	5,18	5,05	5,12
5,50	5,20	5,13	5,17	5,05	5,17	5,11
Ø5 Tappi	4,87	5,01	4,94	5,07	5,01	5,04

ABS	Kerroksen paksuus 0.10mm			Kerroksen paksuus 0.15mm		
Halkaisija	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo
10,00	9,64	9,72	9,68	9,59	9,77	9,68
10,05	9,67	9,70	9,69	9,79	9,72	9,76
10,10	9,72	9,74	9,73	9,75	9,83	9,79
10,15	9,77	9,82	9,80	9,80	9,83	9,82
10,20	9,82	9,86	9,84	9,86	9,95	9,91
10,25	9,82	9,92	9,87	9,99	9,86	9,93
10,30	9,99	9,91	9,95	9,97	10,04	10,01
10,35	9,92	9,99	9,96	10,09	9,96	10,03
10,40	10,07	9,98	10,03	9,99	10,09	10,04
10,45	10,05	10,14	10,10	10,06	10,17	10,12
10,50	10,15	10,06	10,11	10,17	10,16	10,17
Ø10 Tappi	9,89	9,96	9,93	10,01	9,94	9,98

ABS	Kerroksen paksuus 0.10mm			Kerroksen paksuus 0.15mm		
Halkaisija	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo	mittaus 1	mittaus 2	keskiarvo
5,00	4,71	4,78	4,75	4,71	4,68	4,70
5,05	4,78	4,81	4,80	4,73	4,78	4,76
5,10	4,79	4,77	4,78	4,81	4,77	4,79
5,15	4,92	4,90	4,91	4,80	4,89	4,85
5,20	4,88	4,90	4,89	4,90	4,82	4,86
5,25	4,96	4,90	4,93	4,87	4,96	4,92
5,30	4,94	5,04	4,99	5,02	4,88	4,95
5,35	5,07	4,99	5,03	4,91	5,02	4,97
5,40	5,05	5,15	5,10	5,06	4,94	5,00
5,45	5,17	5,01	5,09	4,97	5,07	5,02
5,50	5,12	5,19	5,16	5,10	4,99	5,05
Ø5 Tappi	4,93	5,07	5,00	5,20	5,09	5,15



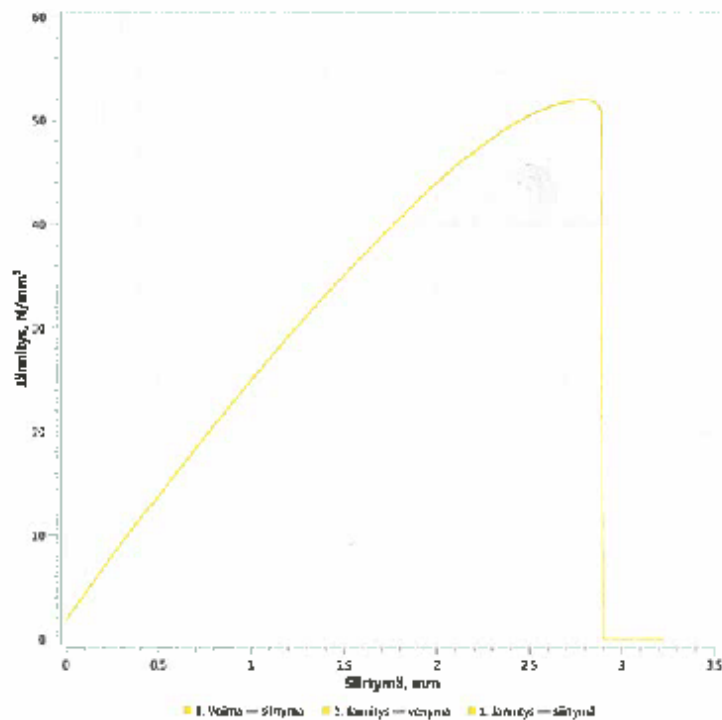
Koestaja hvi

Testi	2 V2	Asiakas	Koeveto muovi
2018-01-04 09:12:48	00:01:01	Standardi	6892-1
Testitulokset		Materiaali	PLA muovi

Murtovenymä		%	Murtokuorma		%
Kimmokerroin (E1)	2238,471	N/mm ²	Murtolujuus (Rm)	52,024	N/mm ²
Alempi murtöraja (ReL)		N/mm ²	Maksimivoima	4046,300	N
Ylämpi murtöraja (ReH)		N/mm ²	Muistimerkit		
0,2%:n venymä (Rp0,2)	35,019	N/mm ²	katkesi alaleuassa		
1,0%:n venymä (Rp1,0)	35,019	N/mm ²			

Syöttötiedot

Loppuhalkaisija		mm	Putkiasgm. alusenvahv.		mm
Loppupituus		mm	Putkiasgm. leveys	0,00	mm
Lo	50,00	mm	Suorakulmion sivu a	13,05	mm
Le	50,00	mm	Suorakulmion sivu b	5,96	mm
Lc	85,00	mm	Pinta-ala S0	77,78	mm ²
Halkaisija	0,00	mm	Nopeus elastisella alueella	0,083	mm/s
			Kavennusalueen isoin m	13,07	mm

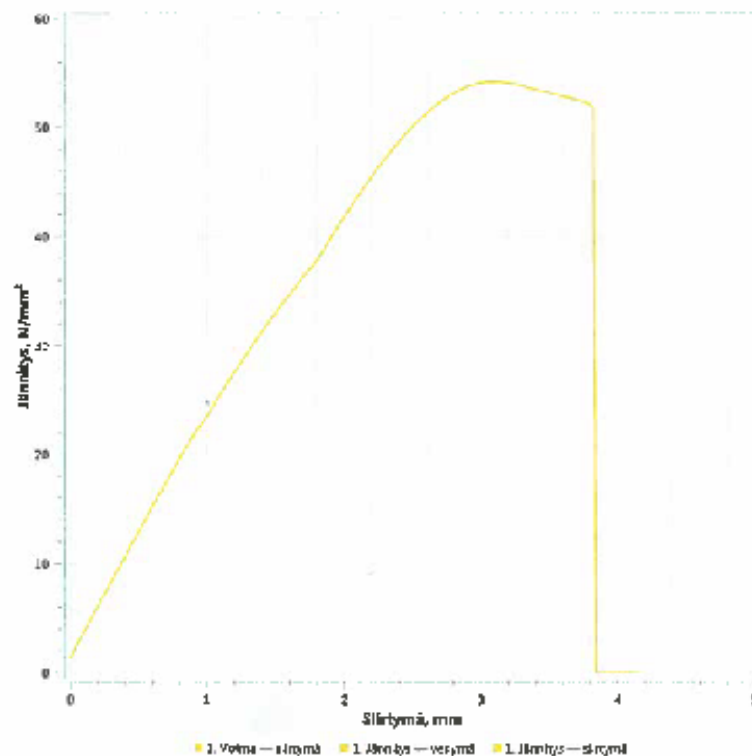


Koestaja hvi

Testi	3 V3	Asiakas	Koevero muovi		
2018-01-04 09:22:55	00:02:34	Standardi	6892-1		
Testitulokset		Materiaali PLA muovi			
Murtovenymä		%	Murtokuorma		%
Kimmokerroin (E1)	2303.568	N/mm ²	Murtolujuus (Rm)	54.229	N/mm ²
Alempi murtöraja (ReL)		N/mm ²	Maksimivoima	4347.300	N
Ylempi murtöraja (ReH)		N/mm ²	Muistilpanot		
0.2%:n venymä (Rp0.2)	37.302	N/mm ²	katkesi alaleuassa		
1.0%:n venymä (Rp1.0)	37.302	N/mm ²			

Syöttötiedot

Loppuhalkaisija		mm	Putkisegm. aineenvahv.		mm
Loppupituus		mm	Putkisegm. leveys	0.00	mm
Lo	50.00	mm	Suorakulmion sivu a	13.23	mm
Le	50.00	mm	Suorakulmion sivu b	6.08	mm
Lc	35.00	mm	Pinta-ala S0	80.17	mm ²
Halkaisija	0.00	mm	Nopeus elastisella alueella	0.083	mm/s
			Kavennusalueen isoin m	13.26	mm



Koestaja hvi

Testi	3 V3	Asiakas	Koeveito muovi	
2018-01-04 09:22:56	00:02:34	Standardi	6882-1	
Testitulokset		Materiaali	PLA muovi	
Murtovenymä		%	Murtokouruma	%
Kimmokerroin (E1)	2303.588	N/mm ²	Murtolujuus (Rm)	54.223 N/mm ²
Alempi myötöraja (ReL)		N/mm ²	Maksimivoima	4347.300 N
Ylämpi myötöraja (ReH)		N/mm ²	Muistimerkit	
0.2%:n venymä (Rp0.2)	37.302	N/mm ²	katkesi alaleuassa	
1.0%:n venymä (Rp1.0)	37.302	N/mm ²		

Syöttötiedot

Loppuhalkaisija		mm	Putkisegm. alueenvahv.		mm
Loppupituus		mm	Putkisegm. leveys	0.00	mm
Lp	50.00	mm	Suorakulmion sivu a	13.23	mm
Le	50.00	mm	Suorakulmion sivu b	6.06	mm
Lc	85.00	mm	Pinta-ala SD	80.17	mm ²
Halkaisija	0.00	mm	Nopeus elastisella alueella	0.083	mm/s
			Kevennusalueen isoin m	13.26	mm

