

Tommi Räsänen

3D-SKANNAUS- JA -TULOSTUSPROSESSIN KEHITTÄMINEN

3D-SKANNAUS- JA -TULOSTUSPROSESSIN KEHITTÄMINEN

Tommi Räisänen
Opinnäytetyö
Kevät 2016
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, tuotantotekniikka

Tekijä: Tommi Räisänen
Opinnäytetyön nimi: 3D-skannaus- ja tulostusprosessin kehittäminen
Työn ohjaaja: Helena Tolonen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2016 Sivumäärä: 60 + 5 liitettä

Opinnäytetyö käsitteli 3D-skannausta ja 3D-tulostusta. Työn tilaajana oli oululainen suunnittelupalveluja tarjoava yritys. Työssä kehitettiin 3D-skannausprosesseja ja esitettiin toimenpiteitä 3D-tulostuslaitteiston parantamiseksi.

Työn aikana tutustuttiin 3D-skannauksen perusteisiin ja 3D-skannausprosessiin sekä perehdyttiin yrityksen käytössä olleeseen Shining 3D EinScan-S -3D-skannauslaitteiston ja EinScan-S-skannerinohjausohjelmiston käyttöön. Skannausprosessissa käytettiin MeshLab- ja Meshmixer-ilmaisojelmistoja pisteverkon luomiseen 3D-skannaustiedostoista sekä kaupallista SolidWorks-ohjelmistoa digitaalisen 3D-mallin luomiseen. Lisäksi perehdyttiin Velleman Vertex K8400 -3D-tulostuslaitteiston, Vertex 3D Printer Repetier-Host -tulostuksenohjausohjelmiston hallintaan.

3D-skannausprosessi muodostuu skannattavan kappaleen esikäsittelystä esimerkiksi liitumaalilla, 3D-skannauslaitteiston kalibroinnista ja asetusparametrien valitsemisesta sekä pistepilvi- ja pisteverkkotiedostojen käsittelystä esimerkiksi työssä käytetyillä MeshLab- ja Meshmixer-ilmaisojelmistoilla. Pistepilvitiedostot kohdistetaan ja yhdistetään toisiinsa, jolloin ne luovat pisteverkon. Pisteverkkoa käytettiin 3D-CAD-mallin luomiseen SolidWorks-ohjelmistoa hyödyntäen.

3D-tulostusprosessia käsittelevässä osiossa laitteisto kalibroitiin, minkä jälkeen valittiin materiaaliokohtaiset asetusparametrit. 3D-tulostuslaitteiston toiminnan laatua tutkittiin ja käsiteltiin laitteistossa ilmenneitä puutteita.

Opinnäytetyön lopputuloksena muodostui ohjeistettu 3D-skannausprosessi, skannattavasta mallikappaleesta muodostettu 3D-CAD-malli, 3D-tulostuslaitteiston ilmanohjain sekä ehdotukset 3D-tulostinlaitteiston tärähtelyn vaimennukseen ja PLA-materiaalin ilmatiiviiseen kotelointiin. 3D-skannausprosessi mahdollistaa skannattavan kappaleen valmistuslaadun tarkkailun sekä prosessin luoman 3D-CAD-mallin muokkaamisen ja kehittämisen. 3D-tulostuslaitteistoon kehitetyt ilmanohjain, tärähtelyn vaimennus ja PLA-materiaalin kotelointi parantavat 3D-tulostuslaatua ja mahdollistavat aiempaa luotettavampien pikamallien valmistamisen. Ongelmia työssä aiheutti ohjelmistojen huono käytettävyys.

Asiasanat: 3D-skannaus, valoa heijastava skannaus, 3D-tulostus, 3D-mallinnus

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	5
2 3D-SKANNAUS- JA -TULOSTUSMENETELMÄT	6
2.1 3D-mittatietoa hyödyntävät skannauslaitteistot	6
2.2 Einscan-S-3D-skanneri	10
2.3 CAD-malleja hyödyntävät 3D-tulostuslaitteistot	11
2.4 Vertex K8400-3D-tulostin	12
3 3D-SKANNAUSPROSESSI	14
3.1 3D-skannattavan kappaleen esikäsittely	14
3.2 Skannerin kalibrointi ja asetukset	18
3.2.1 3D-mittatiedon tallentaminen	22
3.2.2 Asetusten vaikutus mittatarkkuuteen	22
3.3 Pistepilven käsittely	24
3.4 3D-mallin luominen	32
4 3D-TULOSTUSPROSESSI	41
4.1 Tulostusparametrien määrittäminen	41
4.2 Materiaalisuorituksen kehittäminen	44
4.3 Tulostuspään kehittäminen	46
4.4 ABS-muovin tulostus	50
5 YHTEENVETO	54
LÄHTEET	56

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tilaajana on Oulussa sijaitseva suunnittelupalveluja tarjoava yritys. Yritys tarjoaa palveluita ja tukea tuotesuunnittelusta tuotannon loppuvaiheisiin asti. Korkea laatu ja laaduntarkkailu ovat tärkeä osa tätä toimintamallia. Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää 3D-skannausprosessi laaduntarkkailua silmälläpitäen sekä perehtyä 3D-tulostimen toimintaan laadukkaiden prototyyppikappaleiden valmistuksen mahdollistamiseksi. Opinnäytetyössä mallikappaleena 3D-skannauksessa käytetään monimuotoista alumiinikappaletta. 3D-tulostuskappaleina käytetään puhelimen TOH-takakantta sekä yksinkertaisia muotoja sisältäviä kappaleita.

3D-skanneri on laitteisto, joka havainnoi ympäristöään tai tunnettua kohdetta ja muuttaa havaitut referenssipisteet kolmiulotteiseen X-, Y- ja Z-akselit sisältävään koordinaattitiedostoon. 3D-skannerin luomaa koordinaattitiedostoa kutsutaan pistepilvitiedostoksi. Pistepilveä voidaan tarkastella, muokata ja hyödyntää 3D-mallin luomiseen. (1; 2, s. 3–5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9.)

3D-skannausta hyödynnetään erityisesti teollisuudessa, jossa 3D-skannausta voidaan käyttää hyödyksi jokaisessa tuotannon vaiheessa. 3D-skannausta voidaan hyödyntää esimerkiksi työkalujen kulumisen tarkkailuun sekä valmistettavien tuotteiden laaduntarkkailuun. (1; 3; 4; 6; 7; 10.)

3D-tulostuslaitteisto on ainetta lisäävä pikavalmistusmenetelmä, joka valmistaa digitaalisesta 3D-mallista fyysisen kappaleen. 3D-tulostusta voidaan hyödyntää prototyyppien valmistamiseen suunnittelun avuksi sekä valmistamaan tuotantoa avustavia työkaluja ja osia. (11; 12; 13; 14; 15.)

Opinnäytetyön aikana perehdytään eri 3D-skannauslaitteistojen toimintatapoihin sekä Shining 3D Einscan-S -3D-skannausjärjestelmän käyttöön ja sitä tukevien ohjelmistojen hallintaan. Lisäksi perehdytään mittatarkan 3D-mallin luomiseen 3D-skannerilla luotujen pistepilvitiedostojen avulla. Näiden lisäksi perehdytään FFF-menetelmään perustuvan Velleman Vertex K8400 -3D-tulostuslaitteistoon, sen toimintaa ohjaavaan ohjelmistoon sekä tutkitaan eri tapoja kehittää laitteiston 3D-tulostuslaatua (15).

2 3D-SKANNAUS- JA -TULOSTUSMENETELMÄT

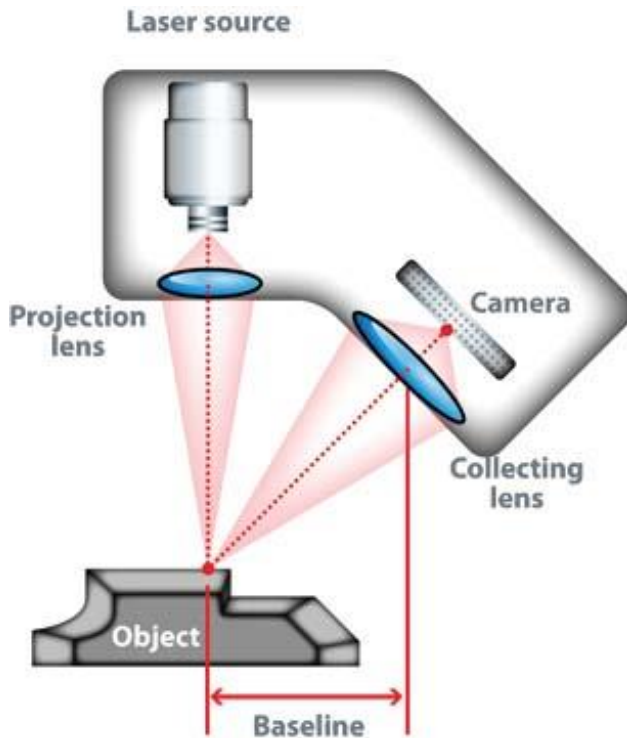
3D-skannaus on nopea ja tarkka menetelmä fyysisen mittatiedon luomiseen halutusta kappaleesta. Skannauslaitteisto luo 3D-mittatietoa, joka voidaan esittää graafisena 3D-mallina. Graafisesta mallista voidaan tutkia haluttuja mittatietoja, kuten tilavuutta tai pinnan ominaisuuksia. Skannauslaitteistojen luomaa 3D-mittatietoa kutsutaan pistepilveksi, joka sisältää kappaleesta saatujen referenssipisteiden koordinaattitiedot. (1; 2, s. 3–5.)

3D-skannaus- ja -tulostusmenetelmiä voidaan käyttää hyödyksi lähes kaikissa tuotteen elinkaaren vaiheissa tuotteen ideoinnista jakeluun sekä myös huolto- ja korjaustoimenpiteissä. Tuotteen ideointivaiheessa 3D-skannauksella saadaan esimerkiksi luotua vahamallista digitaalinen versio. 3D-tulostuksella voidaan luoda nopeasti ideoista fyysisiä malleja kokeiltavaksi, mikä lyhentää suunnittelun protovaiheen kestoa. 3D-skannausta voidaan käyttää suunnittelun apuna esimerkiksi skannaamalla ympäristö, johon suunniteltava osa on tarkoitus sijoittaa. Tällä tavoin saadaan tarkat rajoittavat mitat tuotteelle. (3.)

Skannausta voidaan hyödyntää myös käänteisessä suunnittelussa luomaan 3D-malleja kappaleista, joihin ei ole saatavilla 2D-piirustuksia tai CAD-malleja. Tuotantovaiheessa skannausta ja tulostusta voidaan hyödyntää eri tavoin. 3D-skannerilla voidaan esimerkiksi mitata työkalujen kulumista ja suorittaa tuotteen laadunvalvontaa. 3D-tulostusta voidaan käyttää työkalujen, koontialustoiden ja varaosien valmistukseen tuotannon tarpeiden mukaisesti. (1; 3.)

2.1 3D-mittatietoa hyödyntävät skannauslaitteistot

3D-informaatiota tuottavia 3D-skannereita on erityyppisiä. Näitä ovat muun muassa kuvan 1 periaatteella toimivat 3D-laserskannerit, jotka voidaan lajitella kolmeen tyyppiin. Kolmiomittauslaser projisoi laserlinjan tai -pisteen kappaleen pintaan. Pinnan etäisyyden laitteisto laskee laservalon heijastuman kautta. Laservalon kulku-aikaan perustuva laitteisto lähettää laserpulssin kappaleeseen ja mittaa ajan, milloin pulssi heijastuu takaisin skannerin lukupäähän. Vaihe-eroon perustuvat skannerit toimivat pulssilaserin tavoin, mutta mittaavat ajan sijaan lähetetyn lasersignaalin muutosta. (4; 5; 6; 7.)



KUVA 1. Laserskannerin toimintaperiaate (5)

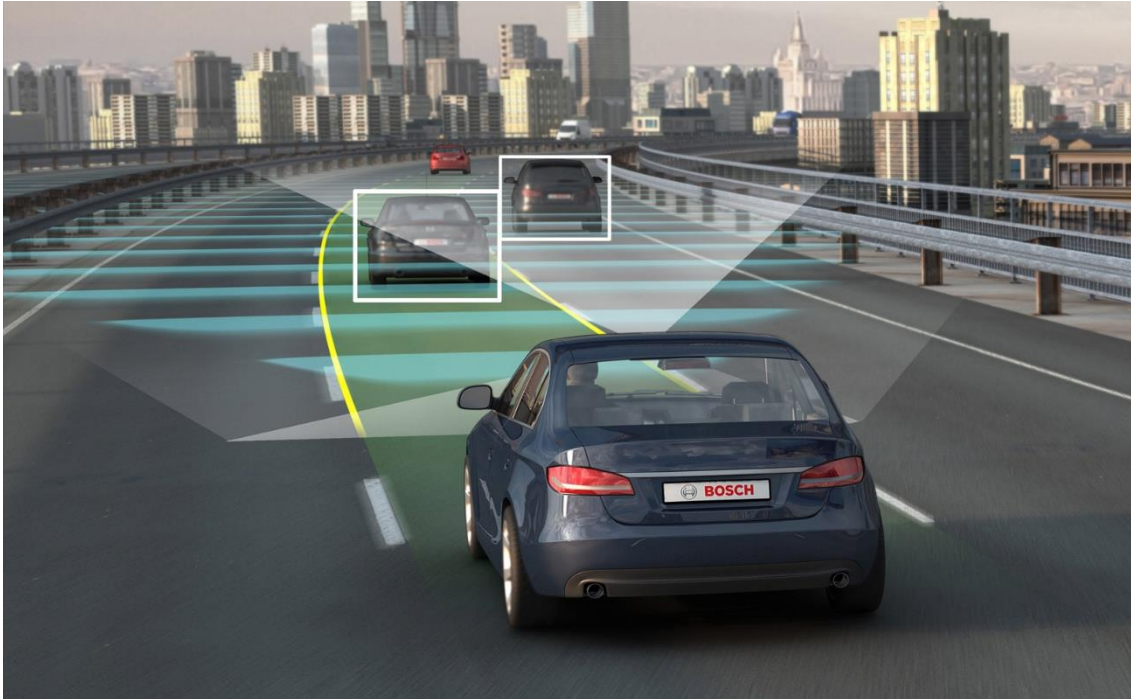
Kaikissa laserskannereissa valonlähteen ja kameran etäisyys on jokin tunnettu vakio. Näin ollen laservalon kulkeman ajan, heijastuskulman tai signaalimuutoksen avulla voidaan laskea kappaleen etäisyyksiä. Kolmiomittaukseen perustuvien laserskannerien tarkkuus on hyvä, mutta mittausetäisyys on hyvin rajoittunut. Laservalon kulkuaikaan perustuvat laitteistot ovat puolestaan epätarkkoja, mutta niillä voidaan mitata pitkiäkin matkoja. (4; 5; 7.)

Valkoista valoa hyödyntävät 3D-skannerit muodostavat kappaleen pintaan kuvassa 2 näkyviä kuvioita. Kappaleen pinnan aiheuttamaa vääristymää analysoimalla laitteisto luo kappaleesta 3D-mittatietota. Valkoista valoa eli strukturoitua valoa hyödyntävillä skannereilla päästään hyvään mittatarkkuuteen, mutta heijastavien pintojen skannaaminen on lähes mahdotonta. (4; 5; 6; 7)



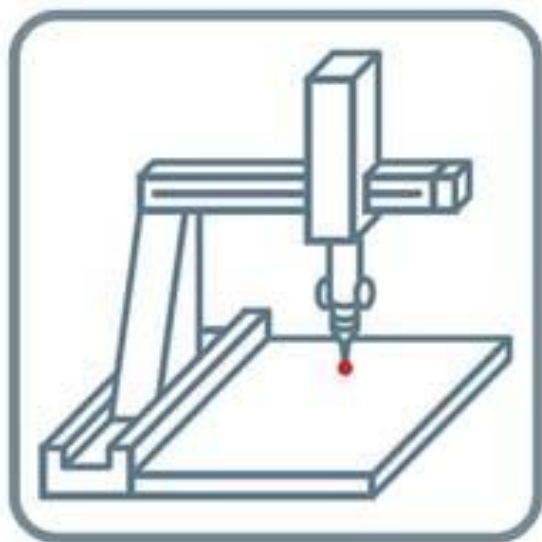
KUVA 2. Valkoista valoa hyödyntävän skannerin luoma kuvio

Fotogrammetria eli kuvanmittaus puolestaan perustuu digitaalisista videoista tai kuvista hahmotettujen referenssipisteiden etäisyyksien mittaamiseen. Fotogrammetria on skannausmenetelmistä yksinkertaisin. Fotogrammetria voidaan toteuttaa millä tahansa digitaalisella kameralla. Lisäksi tarvitaan referenssipisteitä tunnistava sekä mittaava ohjelmisto, kuten VisualSFM-ohjelmisto (8). Konenäkö toimii fotogrammetrian tavoin, mutta sensoreista tai kuvatiedoista saatujen referenssipisteiden tarkastelu tapahtuu reaaliajassa. Konenäkö voidaan yhdistää lasertekniikkaan, optiikkaan, magnetismiin sekä akustiikkaan perustuviin paikannusskannereihin, jotka mahdollistavat esimerkiksi kuvan 3 mukaisten autonomisten laitteistojen itsenäisen toimimisen. (4; 5; 6.)



KUVA 3. Ympäristön 3D-Skannauksen avulla itsenäisesti ajava auto (9)

Valoon perustuvien skannauslaitteistojen ohella on myös kappaletta koskettavia sekä ainetta rikkovia skannausmenetelmiä. Kappaletta koskettavat skannerit tallentavat 3D-mittatietoa koskettamalla kappaleen pintaa mittapäällä. Kuvassa 4 näkyvä koskettava 3D-skannausmenetelmä on tarkka, mutta voi vaurioittaa skannattavan kappaleen pintaa. (4; 5; 6; 7.)

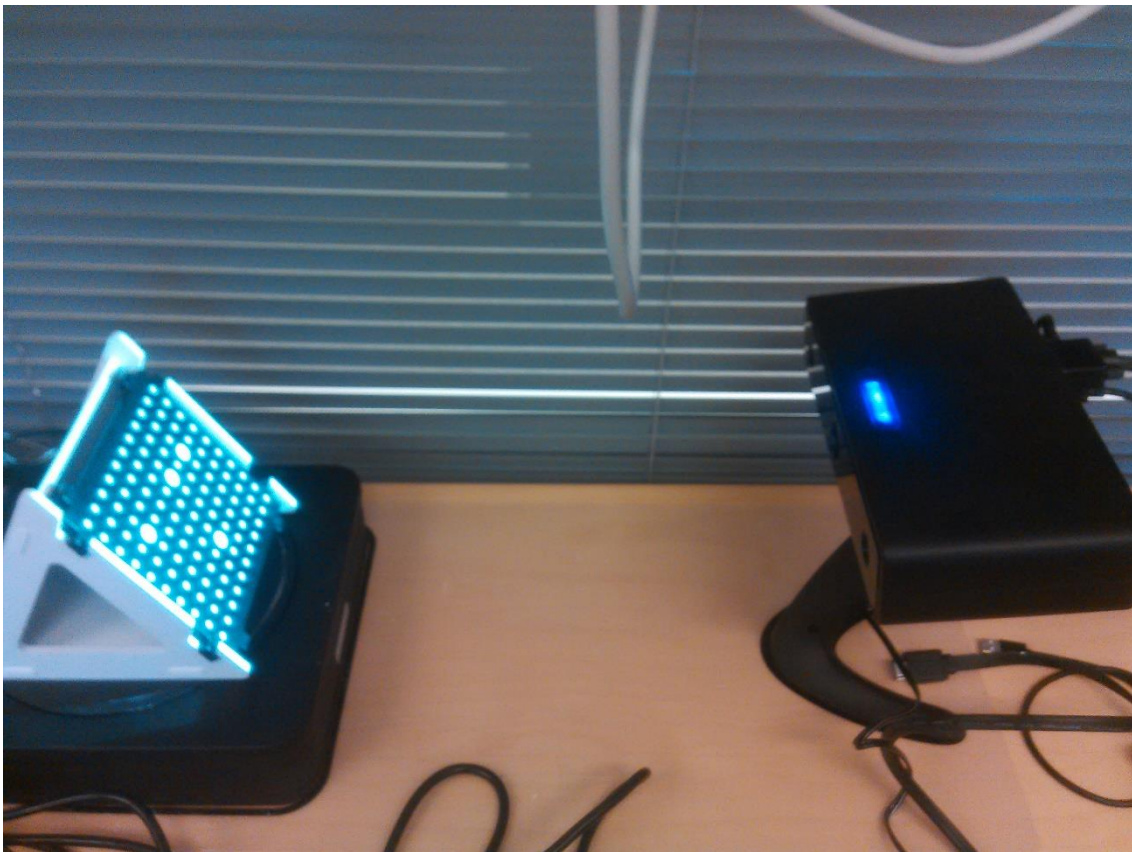


KUVA 4. Moniakselinen koordinaattien mittauslaitteisto (5)

Ainettarikkovassa skannausmenetelmässä 3D-mittatietoa luodaan pilkkomalla skannattava kappale siivuihin. Jokainen siivu kuvataan ennalta määritellyltä etäisyydellä referenssipisteiden mittatarkkuuden säilyttämiseksi. Kuvat pinotaan ohjelmallisesti ja niistä luodaan täysi 3D-malli. (4; 5.)

2.2 Einscan-S-3D-skanneri

Opinnäytetyön aikana käytettiin yrityksen Shining 3D EinScan-S -skanneria ja 3D-skannaukset suoritettiin yrityksen työtilassa. EinScan-S-skannerilaitteisto koostuu kuvassa 5 näkyvästä kaksikamerasesta strukturoitua valoa käyttävästä skannerista, kääntöpöydästä, kalibrointilaitteistosta, alustasta sekä EinScan-S-skannerin ohjausohjelmistosta.



KUVA 5. EinScan-S-skannerilaitteisto

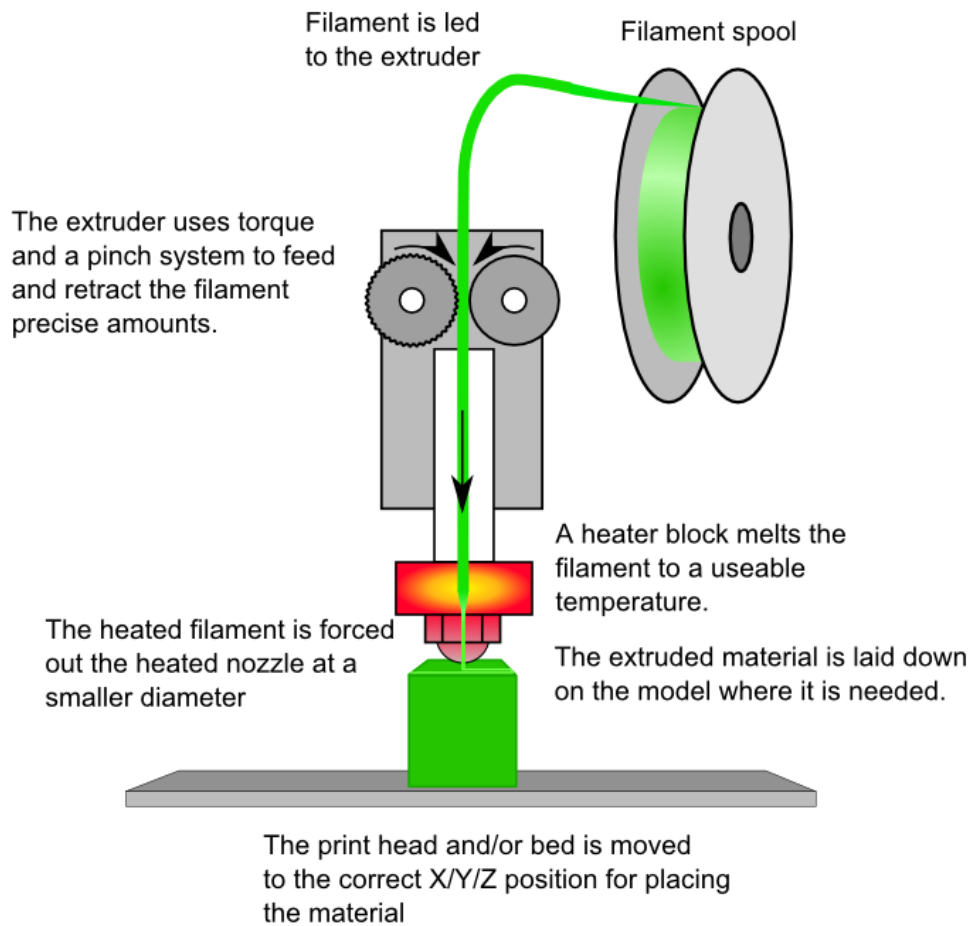
Automaattiskannaustoiminnolla voidaan skannata kääntöpöydälle asetettua kappaletta, jonka koko on maksimissaan 200 mm x 200 mm x 200 mm. Lisäksi

skanneriin on vaihdettavissa vapaaskannauksen mahdollistava kolmijalka. Vapaaskannauksen avulla voidaan skannata suuria kappaleita, jotka eivät sovellu kääntöpöydällä skannattavaksi. Vapaaskannausasetuksilla skannerilla voidaan skannata 700 mm x 700 mm x 700 mm:n suuruista kappaletta. Skanneri ylittää $\pm 0,10$ mm:n mittatarkkuuteen. (10.)

2.3 CAD-malleja hyödyntävät 3D-tulostuslaitteistot

3D-tulostus on yksi pikavalmistusmenetelmistä. Muita pikavalmistusmenetelmiä ovat esimerkiksi valikoiva lasersintraus, suurnopeusjyrsintä sekä lankasahaus. Muista pikavalmistusmenetelmistä poiketen 3D-tulostus ei hukkaa valmistusmateriaalia ja on näin ollen materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä. (11; 12.)

3D-tulostuslaitteisto muuttaa CAD-mallin fyysiseksi käsin kosketeltavaksi kappaleeksi materiaalin pursotusmenetelmän avulla kuvan 6 mukaisesti. 3D-tulostusmateriaaleina käytetään yleensä muovia, metalleja, keraamisia aineita tai lasia. Lisäksi on tutkittu elävän kudoksen tulostamisen mahdollisuuksia. Laitteisto toimii tavallista 3D-tulostuslaitteistoa vastaavalla tavalla, mutta tulostusmateriaalina käytetään solukuormattujen hydrogeelien ja biohajoavien polymeerien yhdistelmiä. (11; 12; 13; 14; 15.)

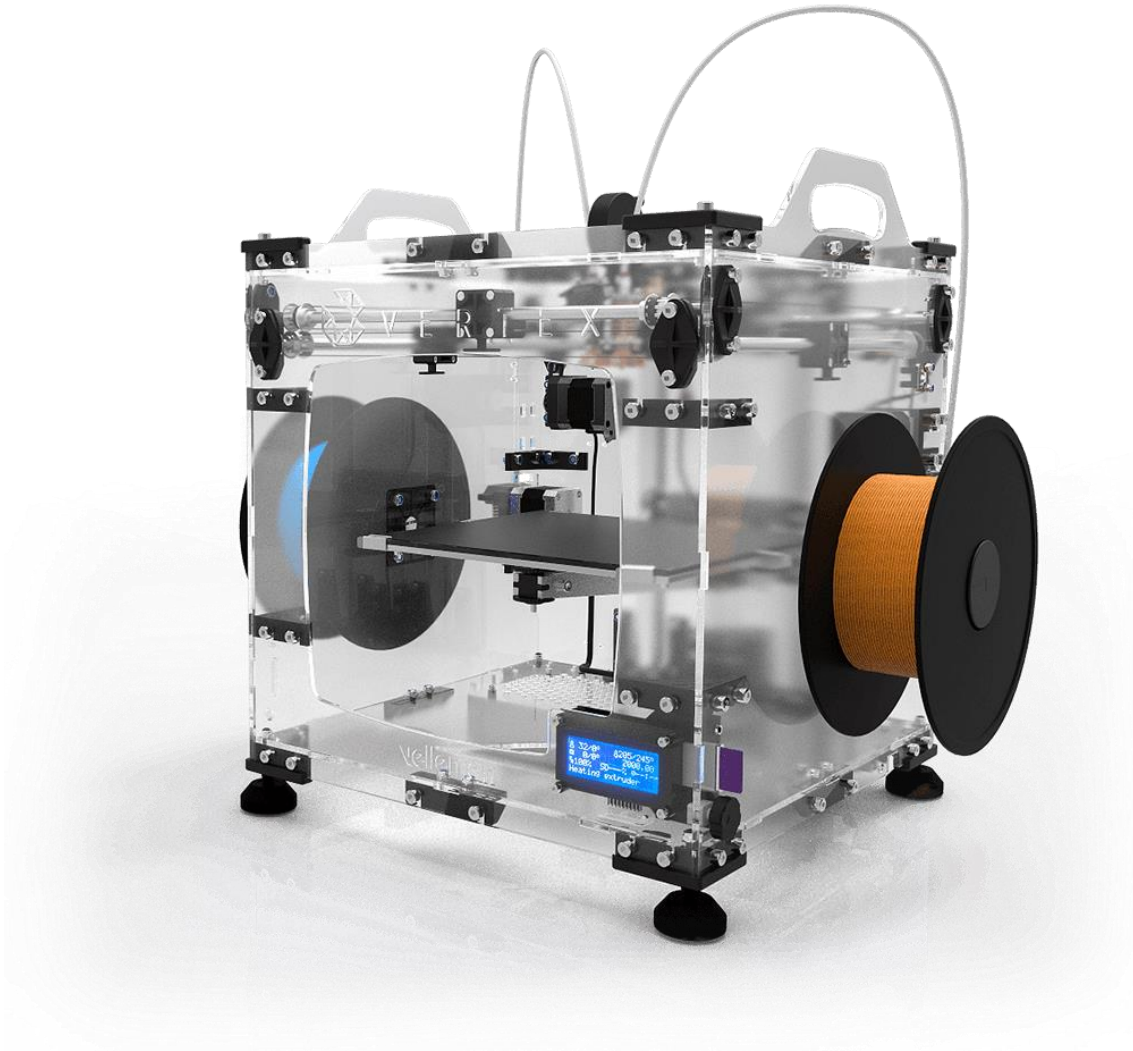


KUVA 6. 3D-tulostimen toimintaperiaate (15)

Tulostusmateriaali syötetään nauhana tai jauheena tulostuspäähän sulatettavaksi tai liuotettavaksi. Tulostuspää pursottaa juoksevan materiaalin kerroksittain haluttuun paikkaan. Lopulta materiaalin jäähmettyessä muodostuu fyysinen kappale. (11; 12; 13; 14; 15.)

2.4 Vertex K8400-3D-tulostin

Opinnäytetyön aikana tutustuttiin yrityksen Velleman Vertex K8400-3D-tulostimen toimintaan. 3D-tulostuskokeet suoritettiin opinnäytetyön tilaajan tarjoamissa tiloissa. Tulostuslaitteisto koostuu kuvan 7 Vertex K8400-3D-tulostimesta ja Vertex 3D Printer Repetier-Host -tulostimen hallintaohjelmistosta (16).



KUVA 7. Vertex K8400-3D-tulostin (17)

Valmistajan mukaan Vertex K8400-3D-tulostimella voidaan tulostaa PLA- ja ABS-muoveja. Tulostimella on hyvät muokkausmahdollisuudet, ja käytännössä tulostimella voidaan tulostaa pienien parannuksien myötä myös joustavia materiaaleja tai PA-muovia. Tulostimella päästään vakiokokoonpanolla 0,05 millimetrin kerrosvahvuuteen. Lisäksi K8400 on varustettu kahdella suulakepuristimella, mikä mahdollistaa kahden eri materiaalin yhtäaikaisen pursottamisen. (16; 17.)

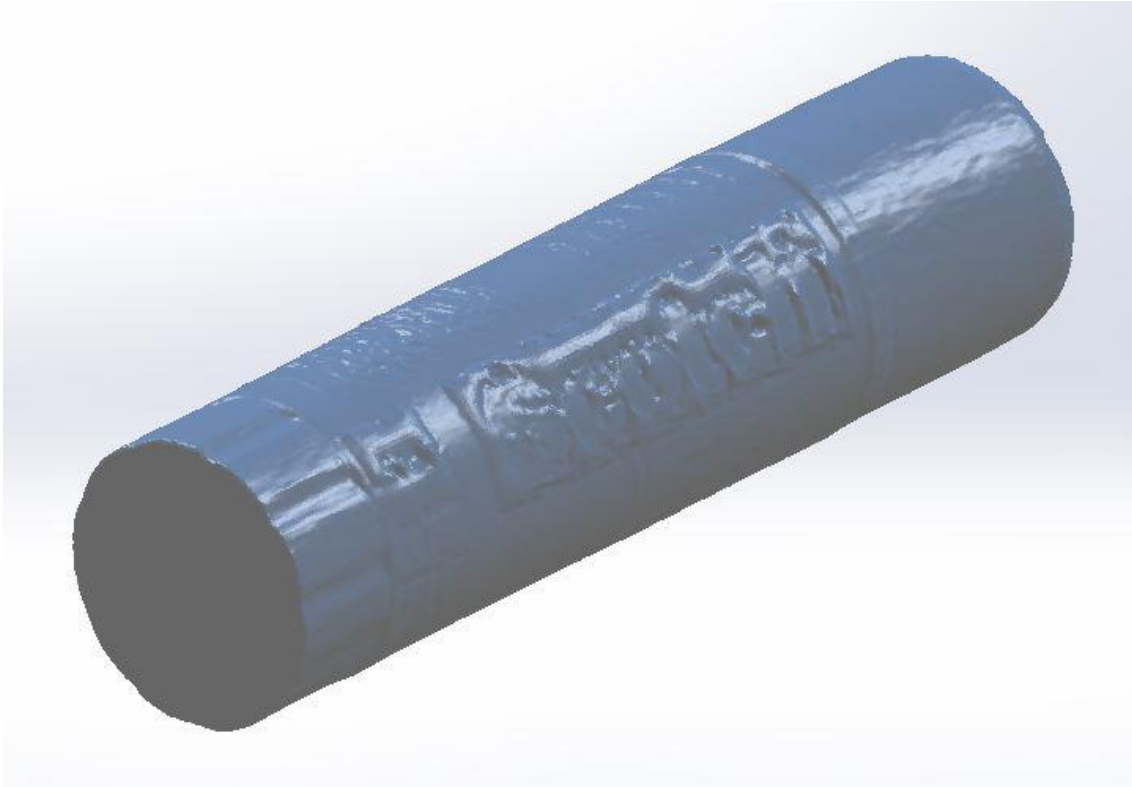
3 3D-SKANNAUSPROSESSI

Opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää 3D-skannausprosessi, jolla päästään mahdollisimman suureen skannaustarkkuuteen. Suuri 3D-skannaustarkkuus mahdollistaa kappaleiden valmistuksen laaduntarkkailun ja on näin ollen tärkeä osa yrityksen toimintamallia.

Opinnäytetyössä käytettyä EinScan-S-3D-skanneria ohjataan sen omalla EinScan-S-ohjelmistolla. EinScan-S-ohjelmisto mahdollistaa myös väritiedostollisen pisteverkoston luomisen skannattavasta kappaleesta, jota voidaan käyttää esimerkiksi esittelykuvia varten. Väritiedoston luomiseen on kuitenkin käytettävä pienintä mahdollista skannaustarkkuutta, joten kyseistä menetelmää ei ole suositeltavaa käyttää laaduntarkkailuun. (10; 18; 19.)

3.1 3D-skannattavan kappaleen esikäsittely

Strukturoitua valoa käyttävillä 3D-skannereilla on vaikeuksia lukea mustien pintojen muotoja, monivärisiä tai tekstiä sisältäviä kappaleita. Teksti, heijastavat ja eriväriset pinnat aiheuttavat vääristymiä strukturoituun valoon ja näin ollen vääristävät myös pinnankorkeuksia. Kuvassa 8 teksti korostuu muusta pinnasta erikorkuisena kappaletta tarkasteltaessa. Vääristymien vähentämiseksi kappale voidaan esikäsitellä. (19; 20; 21, s. 7; 22.)



KUVA 8. Tekstin aiheuttama vääristymä pisteverkossa

Tekstin erottumista voidaan käyttää myös hyödyksi, mikäli halutaan tallentaa kyseisen tekstin fontti CAD-malliin muokattavaksi. Liitettäessä useita pistepilvi-tiedostoja toisiinsa tekstiä voidaan käyttää myös merkkamaan pistepilvien lii-tospisteitä. (19.)

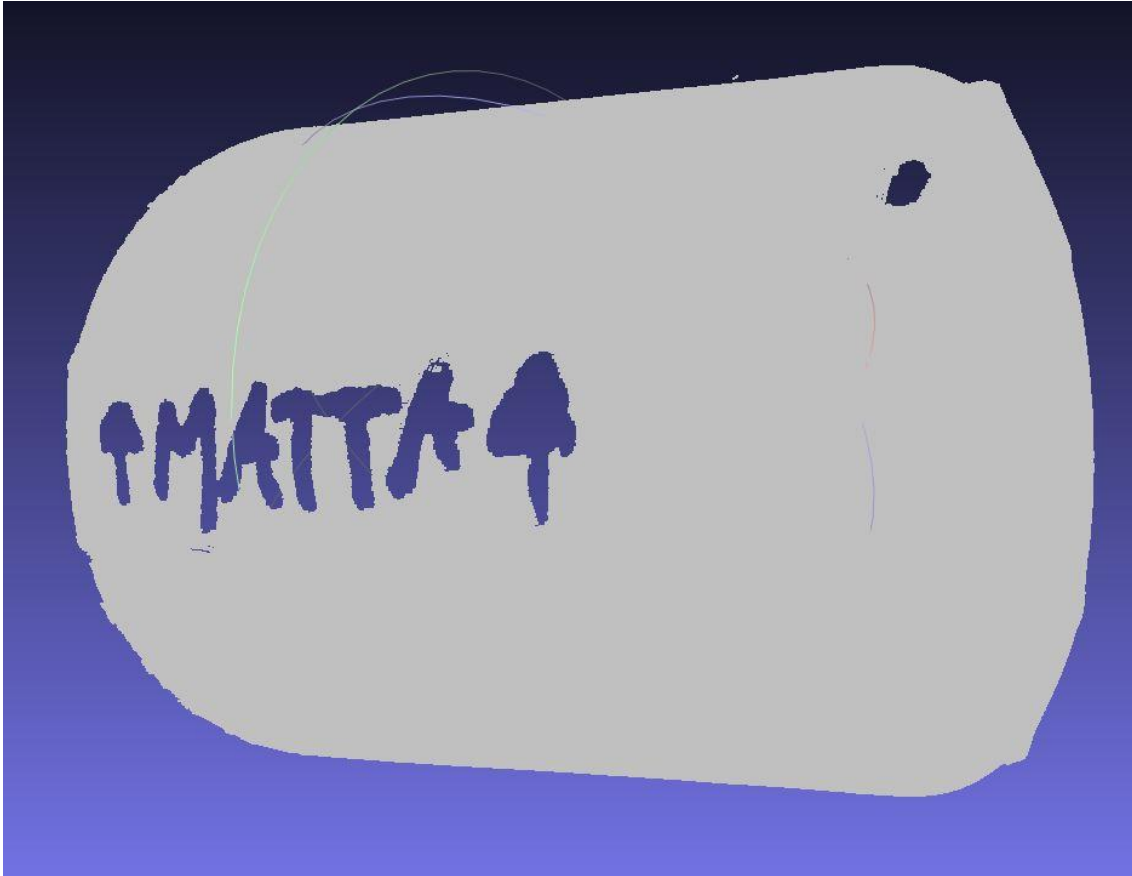
Skannauksen onnistumisen varmistamiseksi etenkin kiiltäväpintaiset skannatta-vat kappaleet on syytä esikäsitellä talkkijauheella, maalaamalla tai teippaa-malla, niin etteivät ne heijasta skannausta häiritsevää valoa. Heijastunut valo voi aiheuttaa virheitä skannerin luomaan pistepilveen. Pistepilveen syntyneitä virheitä voidaan poistaa tai vähentää pisteverkon luomisen jälkeen ilmaisella Meshmixer-ohjelmistolla. (19; 20; 21, s. 7, 9–13; 22.)

Pistepilven jälkikäsitteilyn tarve poistuu kuitenkin huolellisella esikäsitteilyllä. Par-hain tulos saavutetaan käsittelemällä kappale esimerkiksi talkilla tai liituaerosoli-maalilla valon heijastuksien minimoimiseksi. Lisäksi kappale tulee valaista niin, että pinnoille syntyvien varjojen määrä on mahdollisimman vähäinen. Valaistus ei kuitenkaan saa olla niin voimakas, että se peittää alleen skannerin luoman

strukturoidun valon. Suuria kontrasti- tai värieroja sisältävät pinnat on myös syytä käsitellä talkilla, maalaamalla tai teippaamalla. (19; 20; 21, s. 7, 9–13; 22.)

Eri esikäsitelymenetelmien testaamiseksi päätettiin suorittaa koe eri esikäsitely aineilla. Kokeen tarkoitus oli selvittää opinnäytetyön aikana käytössä olevien maalien vaikutus skannaustarkkuuteen. Jokainen maali heijastaa valoa eri tavalla, mikä vaikuttaa skannerin kykyyn havaita tarkkoja pinnankorkeuseroja. Eri maaleilla myös saavutetaan erilaiset maalikerrosten paksuudet. Maalipinnan tulisi olla mahdollisimman ohut mittatarkkuuden säilyttämiseksi, mutta kuitenkin riittävä peittämään skannausta haittaavat heijastumat. (19; 20; 21, s. 9; 22; 23.)

Opinnäytetyön aikana testikappaleeksi valittiin sileäpintainen lasivaasi, jonka esikäsitelyyn käytettiin liitumaalia sekä harmaata ja mattavalkoista aerosolimaalia. Vaasiin merkittiin alueet maalien mukaan, ja jokainen alue käsiteltiin kullekin alueelle kuuluvalla maalilla. Tekstin ja mustan värin korostumista käytettiin hyödyksi alueiden merkitsemisessä. Mustat pinnat muodostavat pisteverkoon aukkoja, jotka ovat helposti nähtävissä pisteverkkoa käsiteltäessä kuvassa 9 näkyvällä tavalla. Mustan värin ominaisuutta voidaan käyttää hyödyksi myös merkkäamalla skannattavaan kappaleeseen mustalla tussilla kohdistuspisteitä. Pisteet helpottavat pistepilvitiedostojen kohdistamista toisiinsa MeshLab-ohjelmistossa. (19; 20; 21, s. 9; 22; 24.)



KUVA 9. Mattavalkoisen maalin aluemerkinät

Esikäsitteilyn jälkeen vaasista tehtiin mahdollisimman tarkka skannaus MeshLab ja SolidWorks -ohjelmistoilla käsiteltäväksi. MeshLab-ohjelmistolla voitiin tarkastella pinnan tasaisuuksia nopeasti. Lisäksi SolidWorks-ohjelmiston mittatyökalulla vertailtiin pintojen eroavaisuuksia alkuperäiseen kappaleeseen tarkemmin.

Liitumaali ja mattavalkoinen aerosolimaali osoittautuivat kokeessa laadullisesti yhtä hyväksi. Liitumaali oli tavallisia aerosolimaaleja työläämpi saada levittämään tasaisesti skannattavan kappaleen pintaan. Epätasainen kerros näkyy pisteverkkoa luodessa ja voi estää kappaleesta tarkasteltavien virheiden tai ominaisuuksien näkymisen.

Liitumaali on helposti pois pyyhittävässä tai vedellä pestävissä, joten se soveltuu kappaleille, joihin ei saa jäädä esikäsitteilyainejäämiä. Harmaa aerosolimaali oli

kiiltävää, mikä aiheutti epätasaisen ja virheellisen pinnan pisteverkkoon. Opin näytetyössä käytetyn kappaleen esikäsittelyyn päätettiin käyttää liitupohjaista maalia, joka on helppo puhdistaa pois skannaamisen jälkeen.

3.2 Skannerin kalibrointi ja asetukset

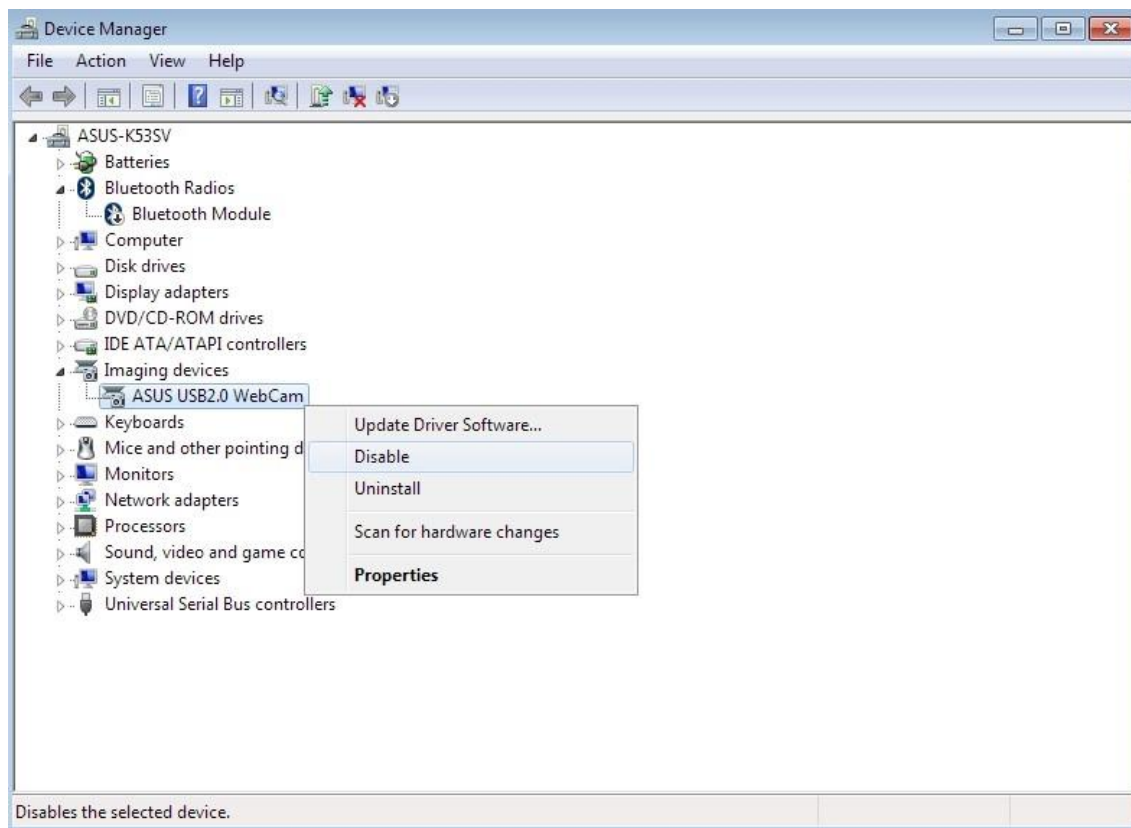
3D-skanneri tulee kalibroida aina ennen käyttöönottoa sekä tarvittaessa ohjelmistoversion päivityksen yhteydessä. Kalibrointi sekä käyttöohjeet tulevat EinScan-S-ohjelmiston mukana ja ne saadaan näkyviin ohjelmiston Help -välilehden kautta. Ennen kalibrointia tulee varmistaa, että kääntöpöytä ja skanneriyksikkö on onnistuneesti yhdistetty. Ohjelmisto myös ilmoittaa varoituksilla kuvassa 10 näkyvällä tavalla, mikäli se havaitsee yhteysongelmia. (18; 25; 26.)



KUVA 10. Skannaustyyppin valintaikkuna ja yhteysvirheet

Opinnäytetyön aikana 3D-skannerilaitteistolla ilmeni paljon yhteysongelmia. Ongelmat saatiin kuitenkin korjattua päivittämällä virtuaalisen Com-portin ajurit uusimpaan versioon sekä poistamalla käytöstä tietokoneen oma web-kamera. Uusimmat ajurit löytyivät FTDI Chipin verkkosivustolta (27.). Web-kamera poistetaan käytöstä avaamalla Device Manager -Windows-ohjelma, josta avataan

Imaging Devices -alasetoalikko. Alasetoalikkosta klikataan hiiren oikeanpuolimmaisella painikkeella web-kameraa ja valitaan Disable-valinta kuvan 11 mukaisesti. (18; 19; 25; 26.)



KUVA 11. Web-kameran käytöstä poistaminen.

Ajureiden asentamisen ja kameran käytöstä poistamisen jälkeen tulisi suorittaa tietokoneen uudelleenkäynnistäminen. Mikäli laitteet on asennettu oikein, Imaging Devices -valikossa tulisi näkyä kaksi 3D-skannerin kameraa. (18; 25; 26.)

Onnistuneen skannerilaitteiston yhdistämisen jälkeen 3D-skanneri suunnattiin niin, että se valaisee kääntöpöydästä noin kolme neljänestä kääntöpöydän takalaidasta lähtien. Suuntaamisen jälkeen suoritettiin laitteen kalibrointi Calibration-välilehdestä. Kalibrointi suoritetaan asettamalla kalibrointitaulu kääntöpöydälle tietokonenäyttöön tulevien ohjeiden mukaisesti. Kuvassa 12 näkyvää kalibrointitaulua tulee kääntää kolmeen eri asentoon kalibroinnin aikana. (18; 19; 25.)



KUVA 12. EinScan-S -3D-skannerin kalibrointijärjestely.

Kalibroinnin jälkeen voidaan avata Scan-välilehti ja valmistella skanneri kappaleen skannaamista varten valitsemalla haluttu skannaustyyppi. Vapaaskannaus soveltuu suurille kappaleille, jotka eivät sovi kääntöpöydälle. Vapaaskannausta käytettäessä skanneri tulee asettaa kolmijalalle ja skanneria tulee liikuttaa kappaleen ympärillä niin, että koko skannattavan kappaleen pinta-ala tulee kuvattua (18; 19; 25). Kääntöpöydällä skannaaminen tapahtuu automaattisesti ja on näin ollen vapaaskannausta nopeampaa ja vaivattomampaa. Opinnäytetyössä käytetty kappale oli pienikokoinen ja soveltui kääntöpöydällä skannattavaksi.

Skannaustyyppin valinnan jälkeen voidaan asettaa skannaustarkkuuteen vaikuttavat asetukset. Parhaimpaan skannaustarkkuuteen pääsemiseksi valittiin kuvassa 13 näkyvistä asetuksista Choose high detail -valinta sekä kappaleen värisävyin mukainen asetus. (18; 19; 25.)



Select the shade that most closely matches your object



Bright:

Choose for light color objects



Medium:

Choose for objects neither bright or dark



Dark/difficult to scan:

Choose for objects difficult to scan, such as dark, gloomy, shiny or fuzzy



BrightDark:

Choose for objects bright and dark

Select detail of scanning



Choose high detail



Choose middle detail



Choose low detail

Cancel

Apply

KUVA 13. EinScan-S-ohjelmiston skannauksenasetusohjeet (18)

Bright -sävyvalinnalla voidaan skannata vaaleansävyisiä kappaleita. Medium-sävyvalinta soveltuu puolestaan neutraaleille värisävyille. Dark/Difficult to scan -valinta soveltuu tummille sekä vaikeasti skannattaville kappaleille, joiden muotoja skannerilla on hankaluuksia havaita. BrightDark-valinnalla voidaan puolestaan skannata kappaleita, joissa on sekä vaaleita että tummia sävyjä. (18; 19; 25.)

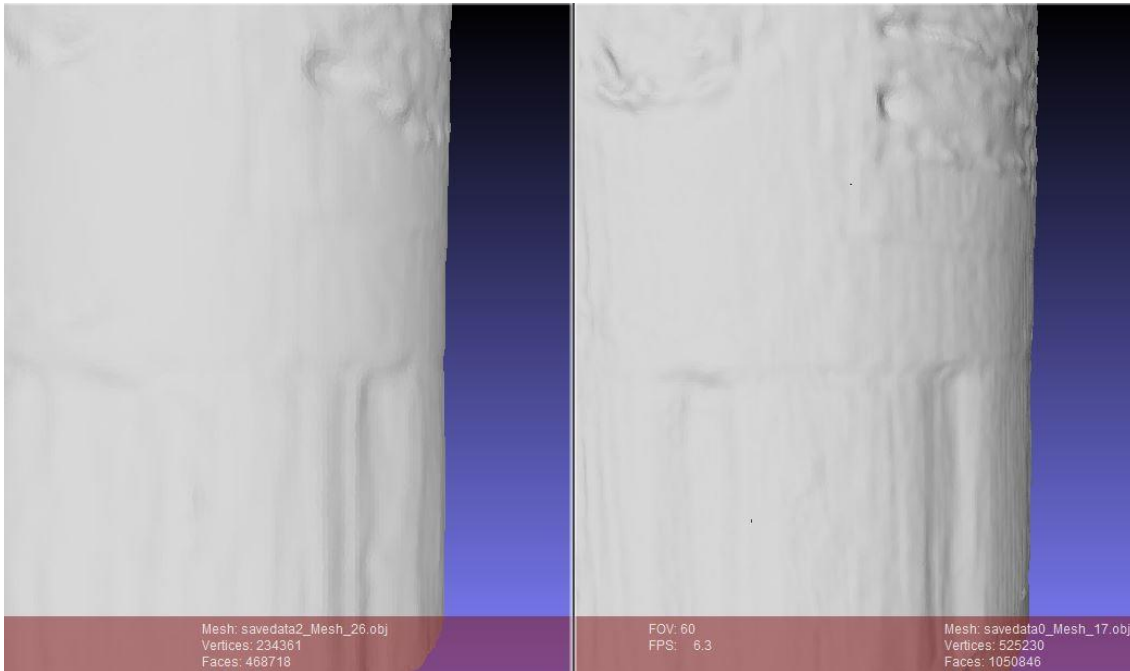
BrightDark-valinnalla skanneri suorittaa kappaleen skannauksen kahteen kertaan, joten skannausaika on myös huomattavasti pidempi. Tällaisten kappaleiden skannausaika voidaan lyhentää huomattavasti kappaleen esikäsittelyllä. Esikäsittelyn jälkeen voidaan valita esimerkiksi vaalealle esikäsittelyaineelle soveltuva Bright-skannausvalinta, jota käytettiin myös opinnäytetyössä käytetylle kappaleelle. Asetusten jälkeen käynnistyy itse skannaus, mikä on täysin automaattinen kääntöpöydällä skannattaessa. Jokaisen skannaus kerran jälkeen on mahdollisuus kääntää kappaletta niin, että saadaan kerättyä 3D-mittatietoa kaikista kappaleen muodoista. (18; 19; 25.)

3.2.1 3D-mittatiedon tallentaminen

Skannaamisen jälkeen EinScan-S-ohjelmisto ilmoittaa pistepilvi -tiedoston suuruuden. Ohjelmisto kysyy myös, kuinka paljon pistepilveä halutaan pelkistää tallennettaessa. Parhaimman tarkkuuden säilyttämiseksi tulee valita tallennussuhteeksi 100 %, jolloin pistepilveä ei pelkistetä lainkaan. Tämän jälkeen yksittäiset pistepilvet tallennetaan ASC-tiedostomuotoisina haluttuun työkansioon. Ohjelmistosta löytyy myös mahdollisuus tallentaa pistepilvitiedostot jo valmiiksi lukittuina toisiinsa nähden, mutta tämän toimivuus oli kyseenalainen. Pistepilvet saattoivat lukkiutua väärin asentoihin ja esimerkiksi pyöreistä muodoista tuli soikean muotoisia. (18; 19; 25.)

3.2.2 Asetusten vaikutus mittatarkkuuteen

Opinnäytetyön aikana verrattiin suurimman tarkkuuden asetusta pienimmän tarkkuuden asetukseen, mikä näkyy kuvassa 14. Vertailun avulla saatiin selville tarkkuusasetusten suurimmat vaikutukset skannauslaatuun.



KUVA 14. Pienimmän skannaustarkkuuden vertailu suurimpaan tarkkuuteen

Skannattavana kappaleena käytettiin esikäsittelemätöntä paperiliimapuikkoa. Kuvan 14 vasemmanpuoleinen pisteverkko on skannattu epätarkimmalla asetuksella ja oikeanpuolimmainen kaikkein suurimmalla. Vertailun ylälaudassa nähdään skannattua tekstiä. Pienimmällä tarkkuudella teksti ei juurikaan erotu muusta pinnasta kun taas suurimman tarkkuuden skannaus sai pinnan näyttämään hyvinkin epätasaiselta. Kappaleen alalaidassa olevat syvennykset eivät tahtoneet erottua lainkaan pienimmän tarkkuuden skannauksessa.

Suurimmalla tarkkuudella syvennyksien syvyydeksi saatiin 0,85 mm, kun puolestaan pienimmällä tarkkuudella syvyydeksi saatiin 0,53 mm. Fyysisen kappaleen syvennyksen syvyys oli noin 1,00 mm. Pienimmällä tarkkuudella skannattu kappale on myös ulkonäöltään suttuinen tietokoneen näytöllä, mikä vaikeuttaa pinnanlaaduntarkastelua. Fyysisen kappaleen ja skannatun 3D-mittatiedon välinen mittavirhe olisi pienennettävissä esikäsitteilyllä.

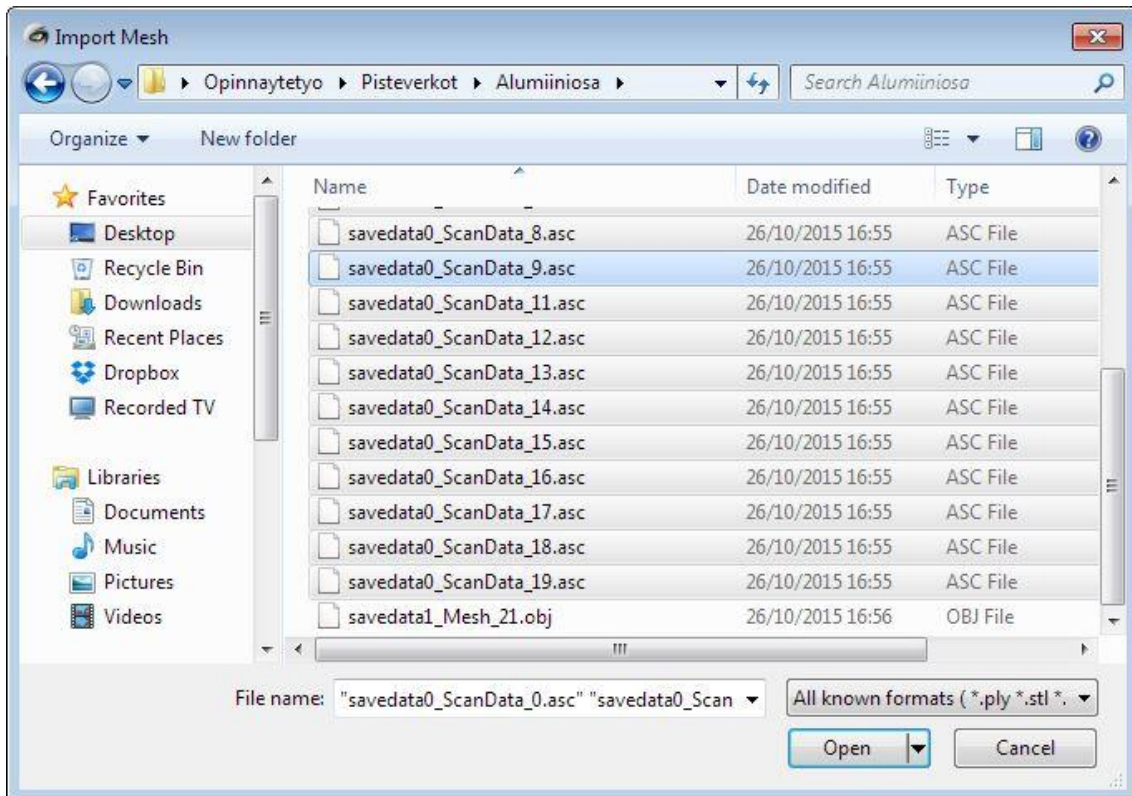
Vertailun yhteenvedona voitiin todeta, että pienimmällä tarkkuudella pystytään kompensoimaan esikäsittelemättömän kappaleen skannaamisesta aiheutuvia mittavirheitä. Suurimman tarkkuuden skannausta sekä kappaleen esikäsitteilyä tulisi käyttää silloin, kun yksityiskohdat, kuten esimerkiksi kappaleessa olevat

syvennykset, ovat skannaukselle tärkeitä. Jotkin teräväreunaiset muodot saattoivat pyöristyä alhaista tarkkuutta käytettäessä. Skannaustarkkuudella ei kuitenkaan ollut vaikutusta kuvassa 14 näkyviä syvennyksiä suurempien muotojen mittatarkkuuteen. Skannaustarkkuuksien välillä on 0,32 mm:n ero, jolla voi olla merkittäviä vaikutuksia pienien kääntöpöydällä skannattujen kappaleiden 3D-mittatietoa tarkasteltaessa.

3.3 Pistepilven käsittely

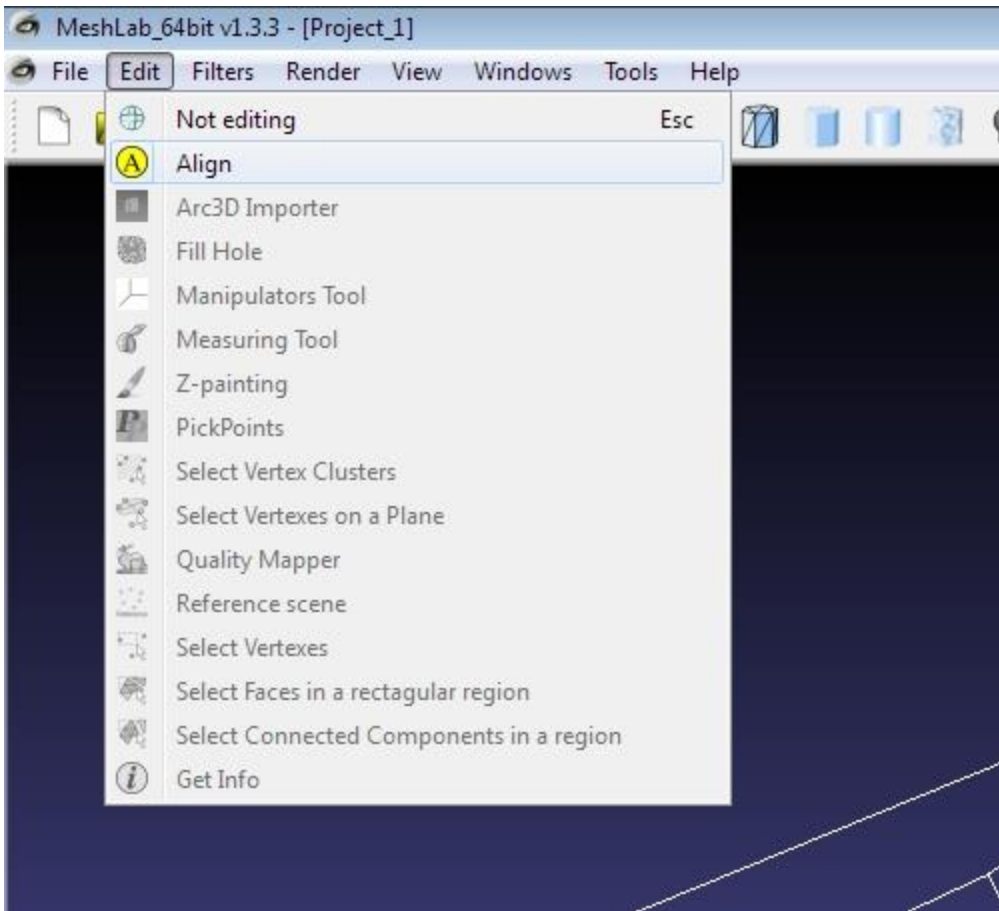
Skannerilla luodut pistepilvet tulee yhdistää toisiinsa laaduntarkkailua silmälläpitäen. Yhdistetyt pistepilvet tulee muuttaa pisteverkoksi 3D-mallin luomista varten. Pistepilven käsittelyyn ja pisteverkon luomiseen päätettiin käyttää avoimen lähdekoodin MeshLab-ohjelmistoa. Ohjelmisto tarjoaa tarvittavat työkalut 3D-skannatun pistepilven muokkaamiseen, pinnanlaadun tarkasteluun sekä pisteverkon luomiseen. (2, s 12, 40–42; 19; 24; 28; 29; 30.)

Pistepilvitiedostojen käsittely aloitettiin tuomalla ASC -pistepilvitiedostot MeshLab-ohjelmistoon Import Mesh -toiminnolla. Import Mesh -toiminto saatiin käyttöön näppäinyhdistelmällä Ctrl+I. Toiminto avaa ikkunan, mistä valittiin kaikki ASC -tiedostomuotoiset pistepilvitiedostot kuvan 15 mukaisesti. Ohjelmisto toi tiedostot yksitellen sekä kysyi vahvistuksen jokaisen tuodun tiedoston jälkeen. (2, s. 7; 29; 30.)



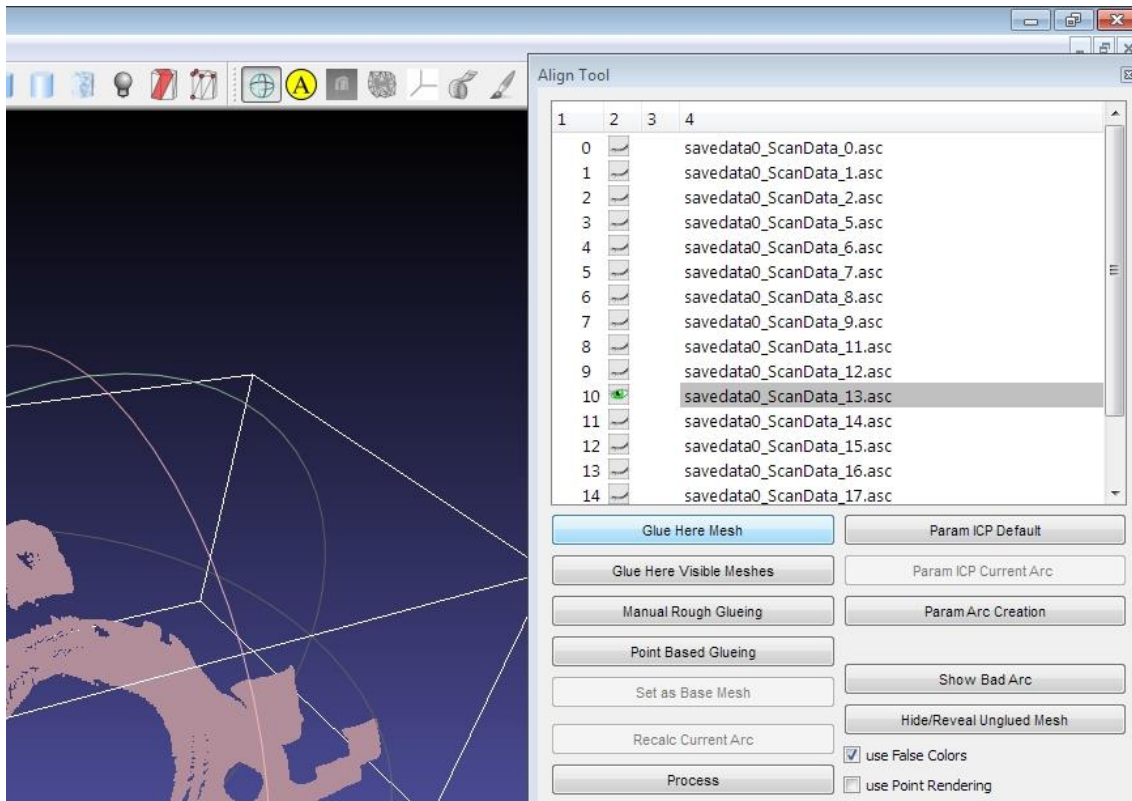
KUVA 15. Pistepilvitiedostojen tuominen MeshLab-ohjelmistoon

Tiedostojen latauduttua ohjelmistoon siirryttiin käyttämään Align-työkalua, jolla kohdistettiin pistepilvitiedostot toisiinsa. Align-työkalu löytyy kuvassa 16 näkyvästä Edit-valikosta, joka sijaitsee ohjelmiston vasemmassa yläkulmassa. (2, s. 26–37; 29; 30.)



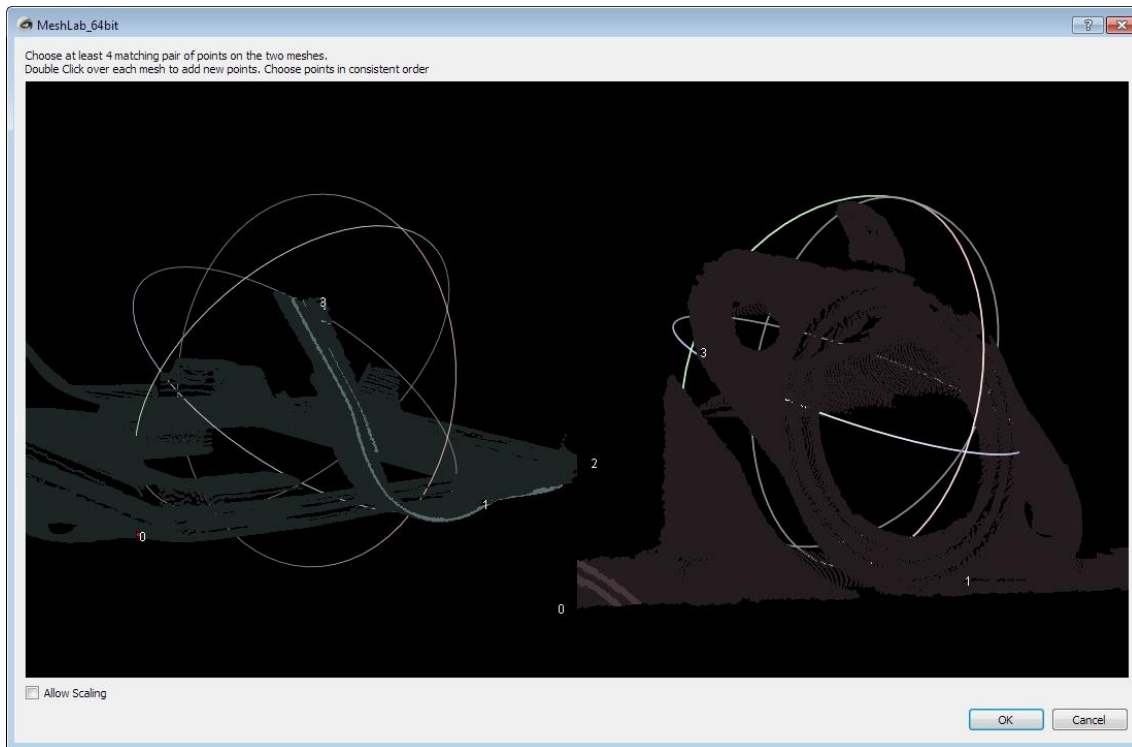
KUVA 16. Align-työkalun valitseminen

Kohdistaminen aloitetaan valitsemalla yksi pistepilvitiedosto, joka lukitaan paikalleen kuvassa 17 näkyvällä Glue Here Mesh -toiminnolla. Vaihtoehtoisesti 3D-skannerin ohjelmistolla suoritettu kohdistaminen voidaan hyväksyä Glue Here Visible Meshes -toiminnolla. (2, s.30; 29; 30.)



KUVA 17. Pistepilvitiedostojen lukitseminen

Seuraavaksi valittiin seuraava pistepilvitiedosto kiinnitettäväksi aikaisemmin lukittuun pistepilveen Point Based Glueing -toiminnolla. Pistepilvet lukitaan toisiinsa nähdessä valitsemalla vähintään neljä kohdistuspistettä sekä lukitusta että lukittavasta pistepilvestä kuvan 18 mukaisesti. Pisteet tulee valita vuorotellen kummastakin pistepilvestä. (2, s. 31–33; 29; 30.)

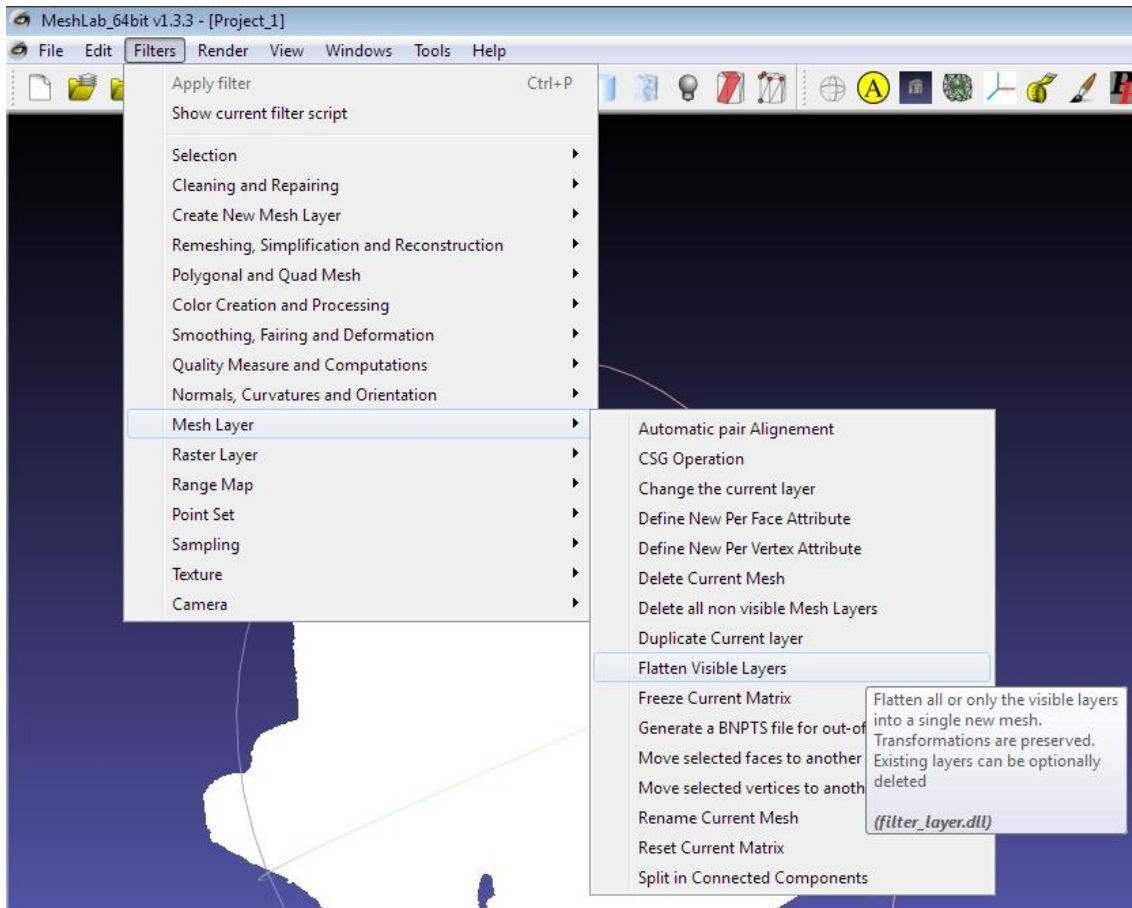


KUVA 18. Kohdistuspisteiden valinta

Kohdistaminen on syytä tehdä mahdollisimman tarkasti, sillä se vaikuttaa huomattavasti myöhemmässä vaiheessa luotavan 3D-mallin mittatarkkuuteen. Kohdistamisen apuna käytettiin skannausvaiheessa skannattavaan kappaleeseen merkittyjä pisteitä. Pisteet ilmenevät aukkoina pisteverkoissa. Saman pisteen näkyessä liitettävissä pistepilvitiedostoissa voidaan helposti valita pisteen reunat kohdistettaviksi, jolloin kohdistus osuu tarkasti kohdalleen. (2, s. 34; 29; 30.)

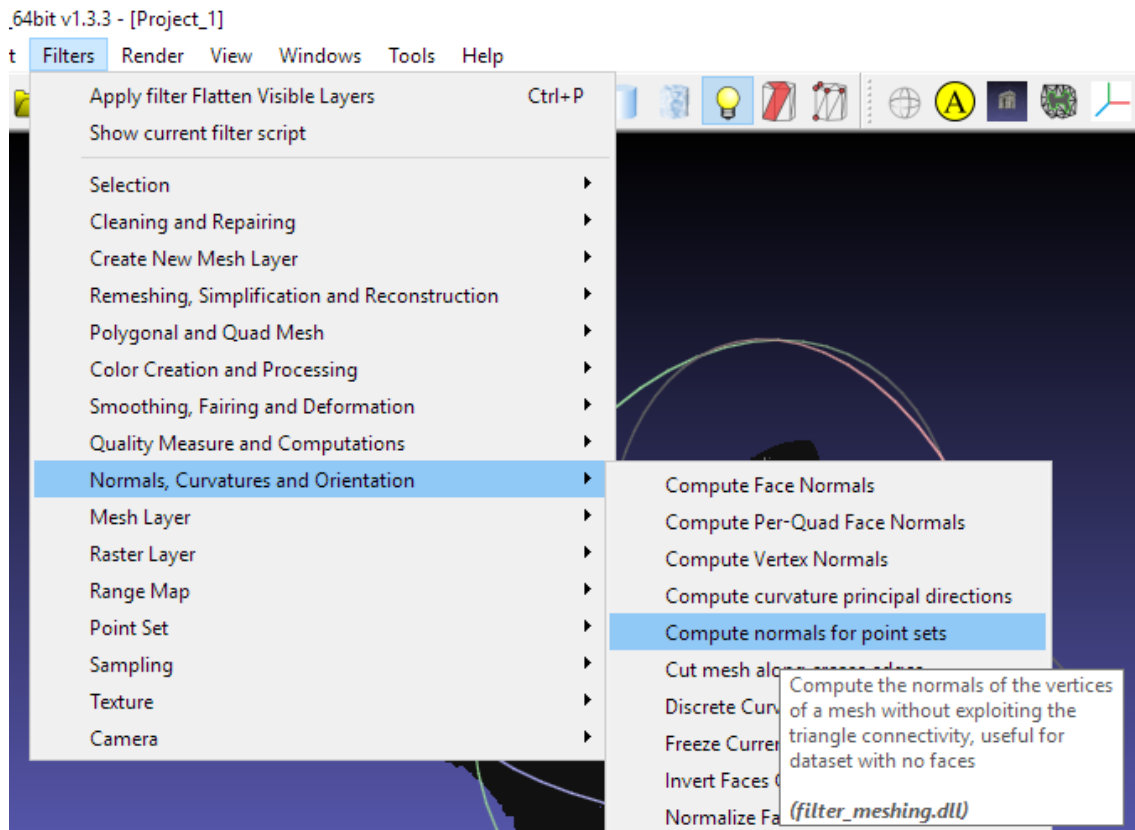
Pistepilvien kohdistamisen jälkeen voidaan klikata Process-painiketta, joka lisää kohdistamisen tarkkuutta (2, s. 34–36; 29; 30.). Toiminto saattaa kuitenkin epäonnistua käytettäessä tarkkuudeltaan suuria pistepilvitiedostoja. Process-toimintoa ei voitu suorittaa opinnäytetyössä käytetyille pistepilvitiedostoille.

Pistepilvien kohdistamisen jälkeen voidaan halutessa tarkastella kappaleen pinnanlaatua ja mittatarkkuutta silmämääräisesti. 3D-mallintamisen mahdollistavan pisteverkon luomista varten päällekkäiset pistepilvikerrokset yhdistettiin toisiinsa kuvan 19 valikosta löytyvällä Flatten Visible Layers -työkalulla. Työkalu avaa asetussivun, josta valitaan Keep unreferenced vertices -toiminto aktiiviseksi (2, s. 39; 29; 30).



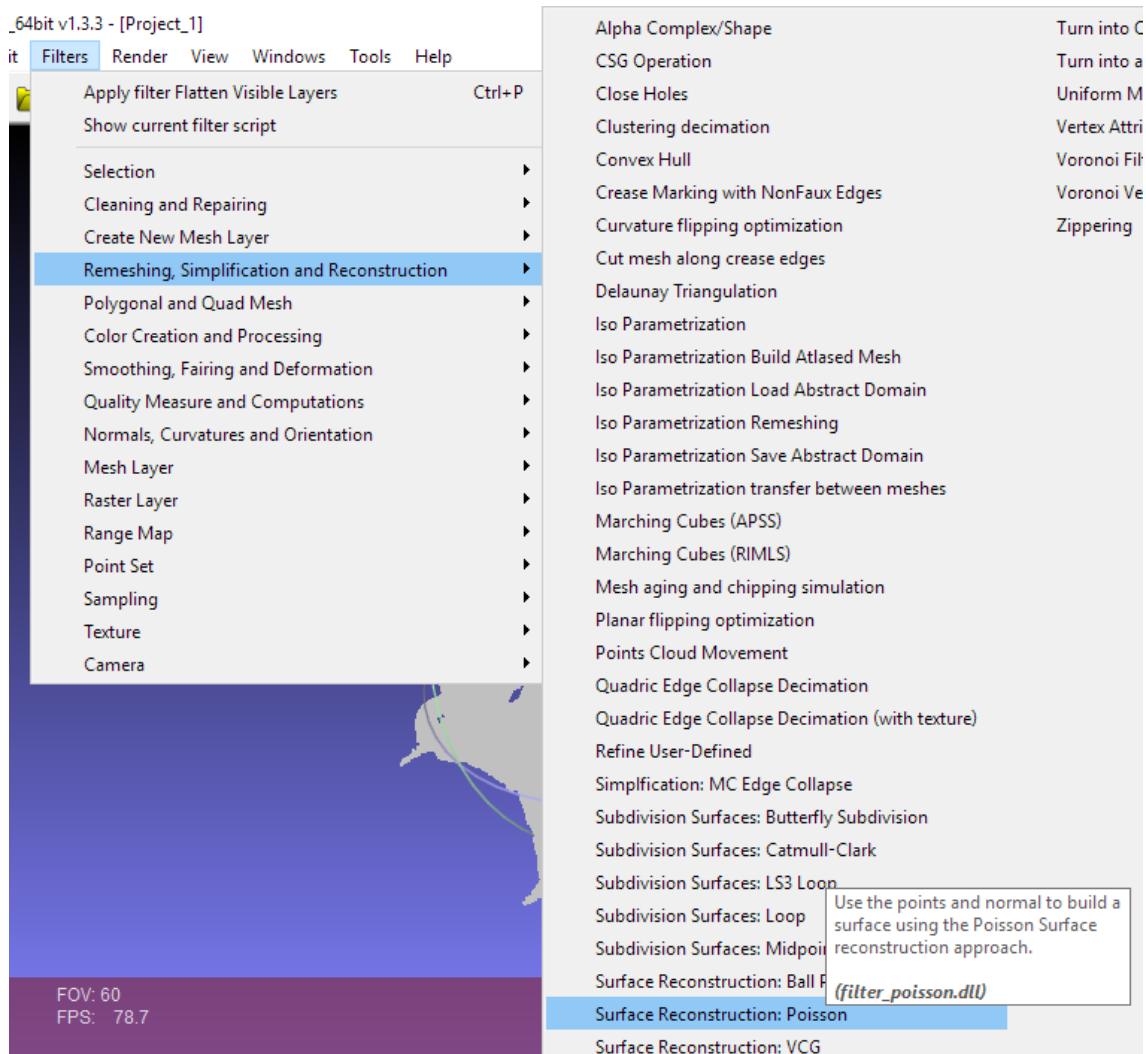
KUVA 19. Flatten Visible Layers -työkalu

Render-valikosta löytyvä Render Mode -asetus tulee vaihtaa Points-valintaan, mikäli pistepilvi katoaa näkyvistä Flatten Visible Layers -työkalun käyttämisen jälkeen. Seuraavaksi kohdistettiin pisteiden normaalivektorit pintojen mukaan Compute normals for point sets -toiminnolla kuvan 20 mukaisesti. (2, s. 13–15, 40; 28; 29; 30.)



KUVA 20. Compute normals for a point sets -toiminto

Normaalivektorien kohdistamisen jälkeen avattiin kuvan 21 valikosta löytyvä Surface Reconstruction Poisson -työkalu. Työkalu avaa valintaikkunan, johon syötetään pisteverkoston luomiseen vaikuttavat parametrit. (2, s. 40–42; 28; 29; 30.)



KUVA 21. Surface Reconstruction: Poisson -työkalu

Octree Depth ja Solver Divide -valinnoilla vaikutetaan pinnantarkkuuteen. Käytettävien parametrien arvot riippuvat skannatun kappaleen muodoista, ja oikeat asetukset löytyivät eri arvoja kokeilemalla. Octree Depth -arvoa suurennettaessa pinnantarkkuuskin paranee. Opinnäytetyössä käytetylle kappaleelle parhaiten toimivaksi asetukseksi todettiin Octree Depth -arvon asetus kymmeneen ja Solver Divide -arvon asettaminen yhdeksään. Muut asetukset pidettiin oletusarvoissaan. (2, s. 41; 19; 28; 29; 30.)

Lopuksi luotu pisteverkko tallennettiin Export mesh -toiminnolla SolidWorks-ohjelmiston tukemaan OBJ -tiedostomuotoon. Mikäli skannattu kappale halutaan tulostaa suoraan 3D-tulostimella, tulee käyttää monien 3D-tulostimien tukemaa

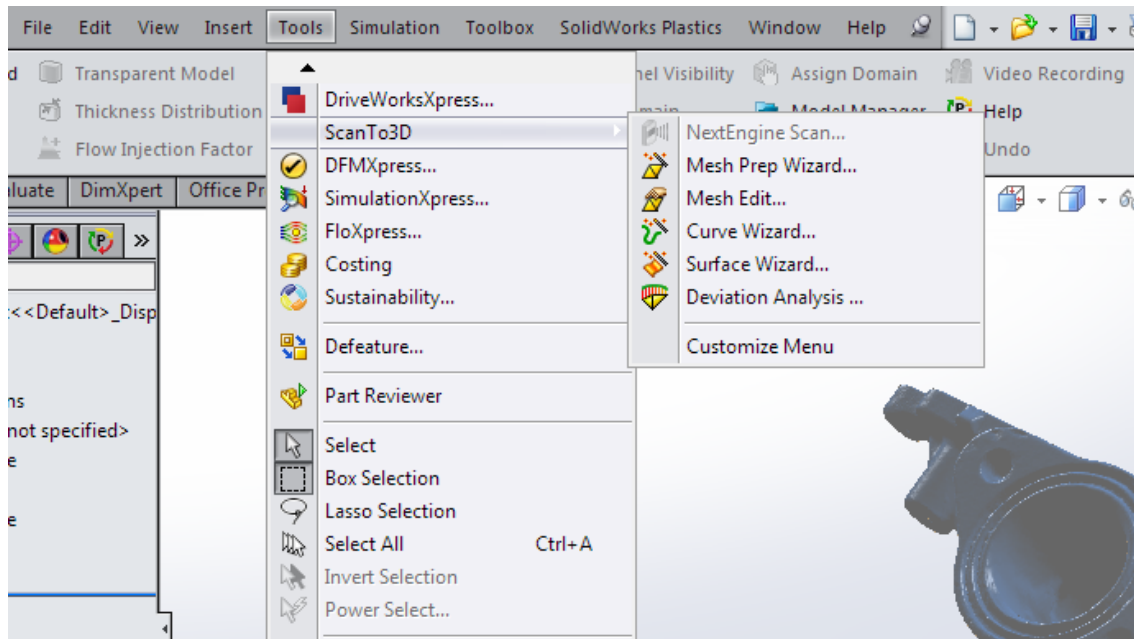
STL-tiedostomuotoa. SolidWorks-ohjelmisto tukee myös rajoitetusti STL-tiedostoja. (28; 29; 30.)

Pistepilvi- ja pisteverkkotiedostoja käsiteltäessä tulee huomioida pisteiden määrän suuri vaikutus tietokoneen suorituskykyyn. Tiedostonkäsittelyaika saattaa pidentyä huomattavasti raskaita toimintoja suoritettaessa. Lisäksi tiedostojen menetyksen mahdollisuus on suuri johtuen ohjelmistojen epävakasta tavasta käsitellä suuria tiedostoja.

3.4 3D-mallin luominen

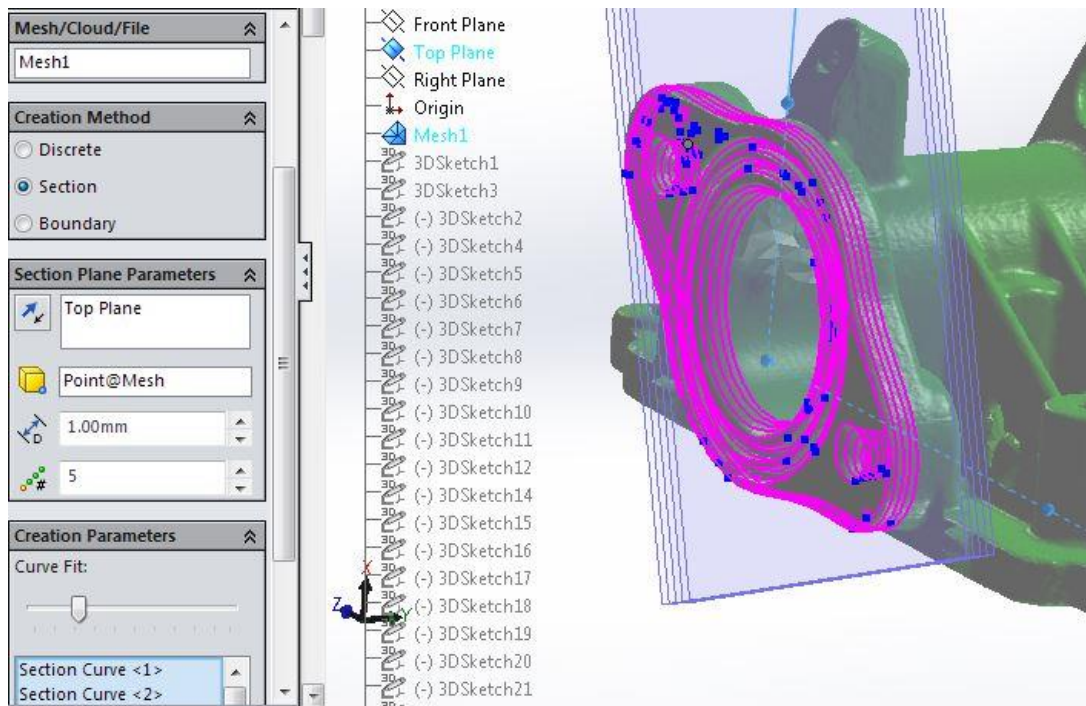
SolidWorks-ohjelmisto mahdollistaa pisteverkon muokkaamisen sekä OBJ- että STL -tiedostomuotoisina. STL -tiedostomuodon käsittely SolidWorks-ohjelmistossa on kuitenkin OBJ-tiedostomuotoa rajoittuneempi, joten opinnäytetyön aikana pisteverkon käsittely tehtiin OBJ -tiedostomuotoisena.

SolidWorks-ohjelmistoon tuotu pisteverkko käsiteltiin ensimmäiseksi Mesh Prep Wizard -työkalulla, joka on kuvassa 22 näkyvässä valikossa. Työkalun avulla pisteverkko keskitettiin SolidWorks-ohjelmiston tasojen mukaan myöhemmän käsittelyn helpottamiseksi. Lisäksi pisteverkkoa voidaan yksinkertaistaa tarvittaessa sulavamman ohjelmiston käytettävyyden saavuttamiseksi. Yksinkertaistaminen voi kuitenkin aiheuttaa epätarkkuutta 3D-malliin.(19.)



KUVA 22 SolidWorks -ohjelmiston ScanTo3D -toiminto

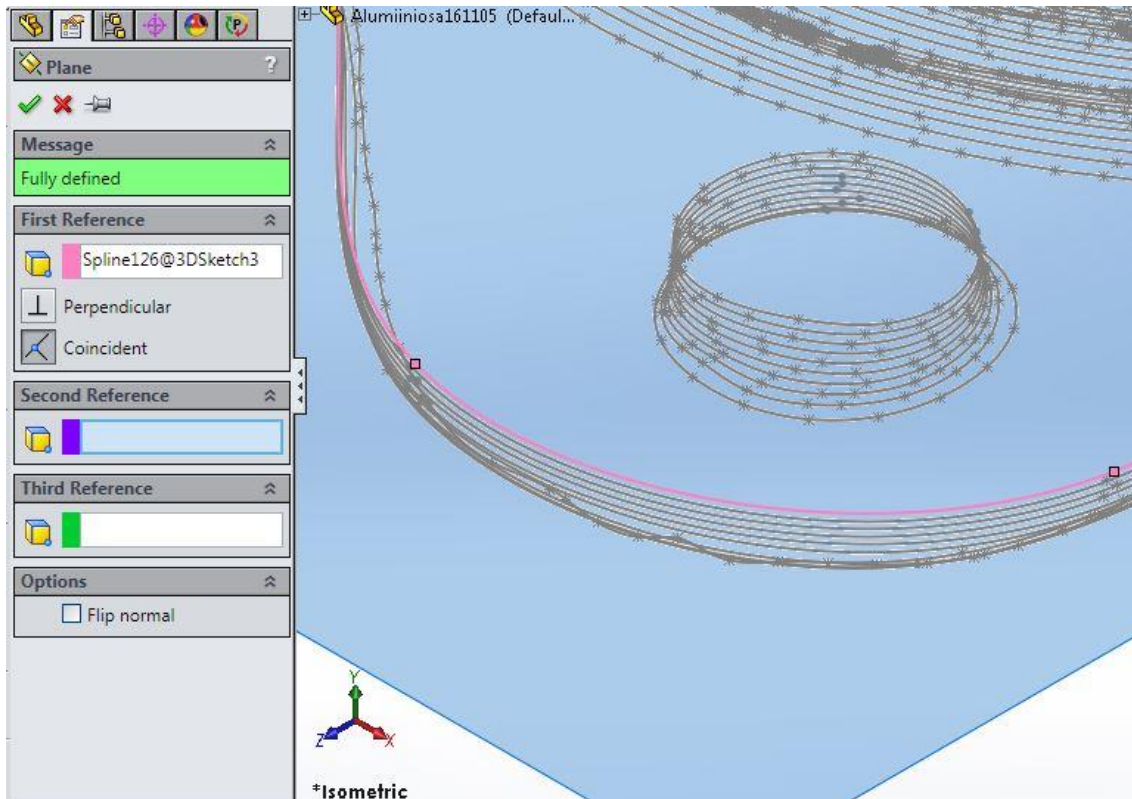
Seuraavassa vaiheessa valittiin käytettäväksi joko Surface Wizard - tai Curve Wizard -työkalu. Surface Wizard -työkalulla voidaan tuoda 3D-malliin kappaleen pintoja, joita muokkaamalla varsinainen malli luodaan. Surface Wizard -työkalu havaittiin sopivan paremmin yksinkertaisille kappaleille, joissa on vähän erilaisia muotoja. Opinnäytetyössä käytetyssä metalliosassa oli paljon erilaisia muoto-
piirteitä, joten kappale päätettiin mallintaa Curve Wizard -työkalulla luotujen muotoviivojen avulla kuvan 23 mukaisesti.



KUVA 23 Curve Wizard -työkalun valinnat

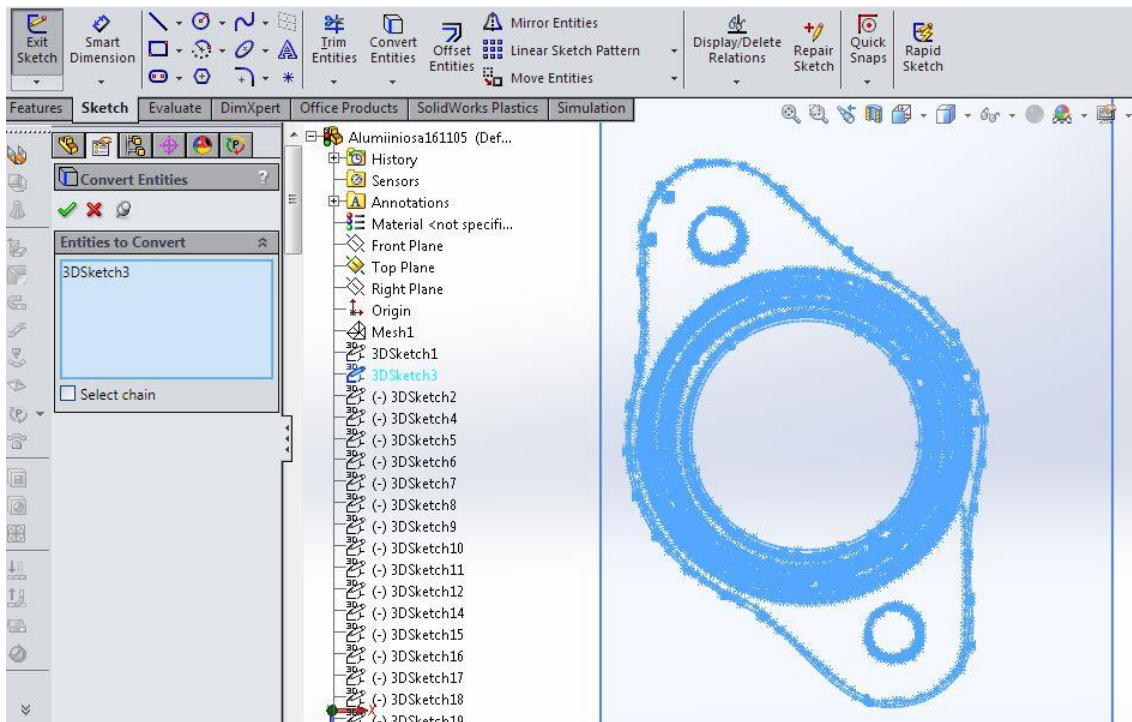
Curve Wizard -työkalua käytettäessä Creation Method -asetuksen Section-valinnalla luotiin kappaleen poikkileikkauksen mukaisia muotoviivoja. Section Plane -parametreihin valitaan taso ja aloituspiste, joiden mukaan muotoviivat projisoidaan. Seuraavaksi valitaan muotoviivojen välinen etäisyys ja haluttu muotoviivojen määrä. Curve Wizard -työkalu käyttää Spline-toimintoa muotoviivojen luomiseksi 3D-luonnokseen, mikä tarkoittaa kappaleessa olevien terävien reunojen ja nurkkien pyöristymistä. Curve Fit -parametreilla voidaan kuitenkin vaikuttaa pyöristymisen suuruuteen sekä muokata viivojen asettelua käsin.

Muotoviivojen luomisen jälkeen voitiin luoda luonnostasoa Plane-työkalulla. Tasoa luomiseen käytettiin pisteverkon pintaa lähinnä olevaa muotoviivaa mittavirheiden minimoimiseksi kuvan 24 mukaisesti.



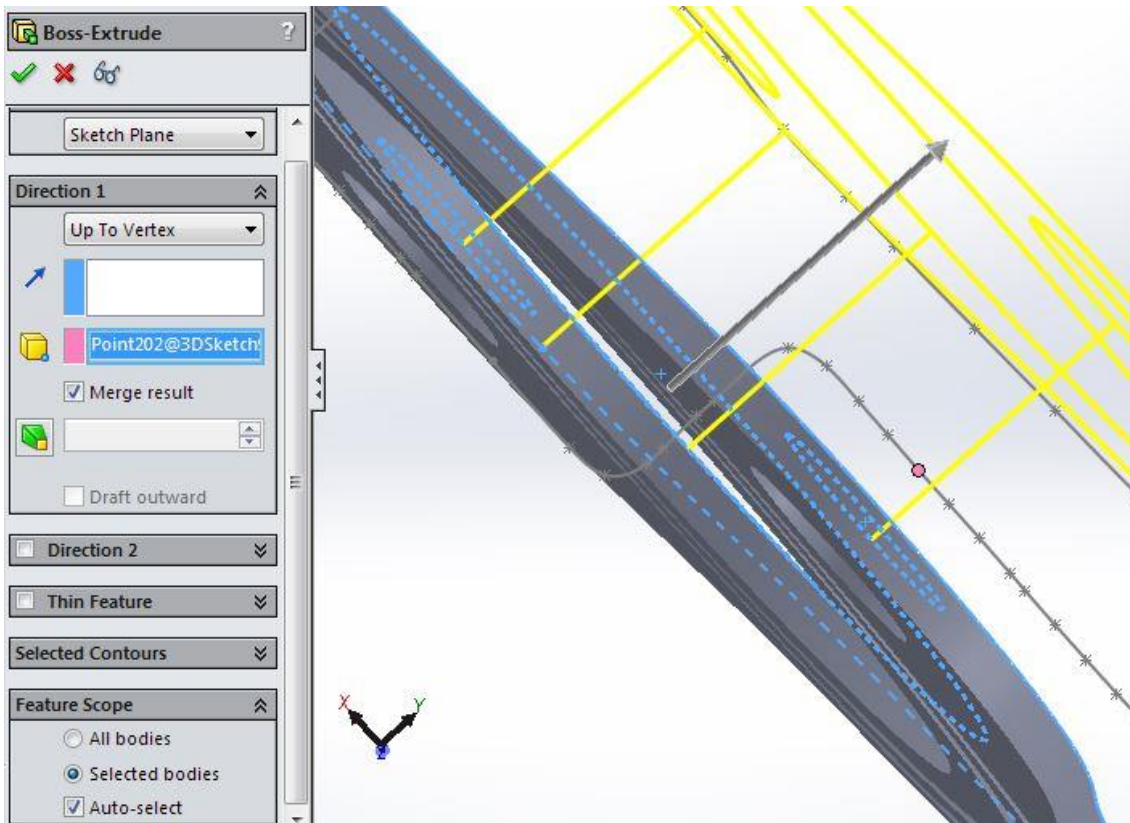
KUVA 24. Luonnostason luominen muotoviivojen avulla

Seuraavaksi tasolle tehtiin luonnos ja muotoviivat siirrettiin luonnokseen Curve Wizard -työkalulla luodusta 3D-luonnoksesta. Siirto tehtiin Convert Entities -toiminnon avulla kuvan 25 mukaisesti. Lisäksi ylimääräisiä viivoja poistettiin Trim Entities -toiminnon avulla.



KUVA 25. Muotoviivojen siirtäminen luonnokseen

Muoto viimeisteltiin käyttämällä Extruded Boss/Base -toimintoa kuvan 26 mukaisesti. Toiminnon asetuksiin valittiin Up to Vertex -vaihtoehto, mikä mahdollistaa muodon pursottamisen valittuun pisteeseen asti. Muodonpursotuksen lopetuspisteeksi valittiin piste aiemmin luodusta pursotettavaa muotoa kohtisuorasti olevasta muotoviivasta. Kohtisuoraan pursotettavaan pintaan nähden luotu muotoviiva muodostuu halutun muodon pintaan ja toimii pursotusta rajaavana tekijänä. Näin ollen pursotuksen tarkka päättymispiste saadaan muotoviivasta ja mittatarkkuus säilytetään.



KUVA 26. Extrude Boss/Base -toiminto

Kun kaikki muodot on pursotettu, voidaan kappale viimeistellä luomalla mahdolliset kiinnitysreiät ja viisteet. Kiinnitysreiät voidaan tehdä muotoviivoja apuna käyttäen Extrude Cut -toiminnolla tai vaihtoehtoisesti Hole Wizard -työkalulla, mikäli pistepilvestä ei saada eroteltua reikien muotoja. Viimeistely 3D-malli nähdään kuvassa 27.



KUVA 27. Skannatun kappaleen 3D-malli

Tarvittaessa SolidWorks-ohjelmistolla on myös mahdollisuus luoda pintamalli suoraan muotoviivojen välille Loft -toiminnolla. Toinen vaihtoehto pintamallin luomiseen on kaupallinen Geomagic Design X -ohjelmisto. Kyseisellä ohjelmistolla voidaan luoda SolidWorks-ohjelmiston kanssa yhteensopiva pintamalli suoraan pistepilvitiedoista.

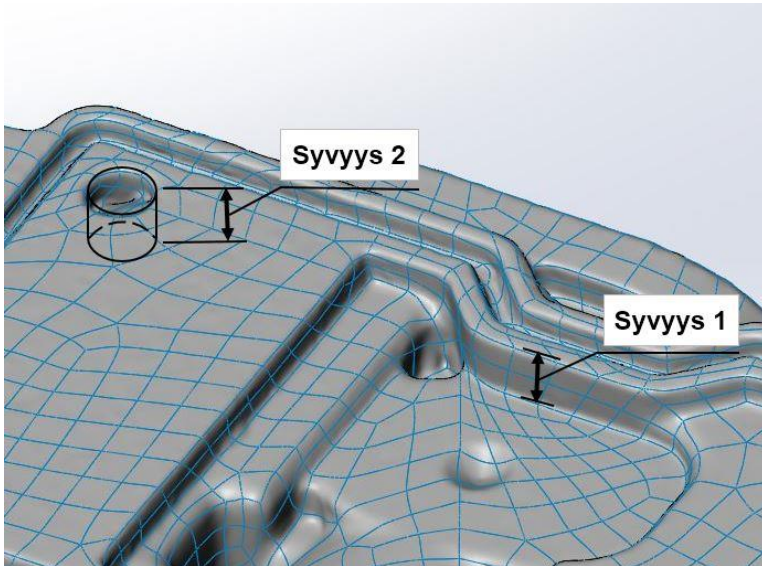
Geomagic Design X -ohjelmisto kohdisti kappaleen pilvitiedostot automaattisesti toisiinsa. Pilvitiedostojen kohdistus oli huomattavasti tarkempaa kuin mihin MeshLab-ohjelmisto kykenee. Ohjelmisto myös korjasi pistepilvitiedoissa olevat aukot sekä loi yhtenäisen pisteverkon muutamalla käskyllä. Lisäksi ohjelmistossa on myös mittatyökaluja kappaleen mittaamiseen. (19; 31.)

Taulukosta 1 näkyy käytettyjen ohjelmistojen vaikutus kappaleen mittatarkkuuteen. Vertailtavina olivat Geomagic Design X -ohjelmistolla luotu 3D-pintamalli ja MesLab-ohjelmistolla luodusta pisteverkosta luotu SolidWorks-3D-malli.

TAULUKKO 1. Eri ohjelmistoilla luotujen 3D-mallien mittatarkkuuden vertailu

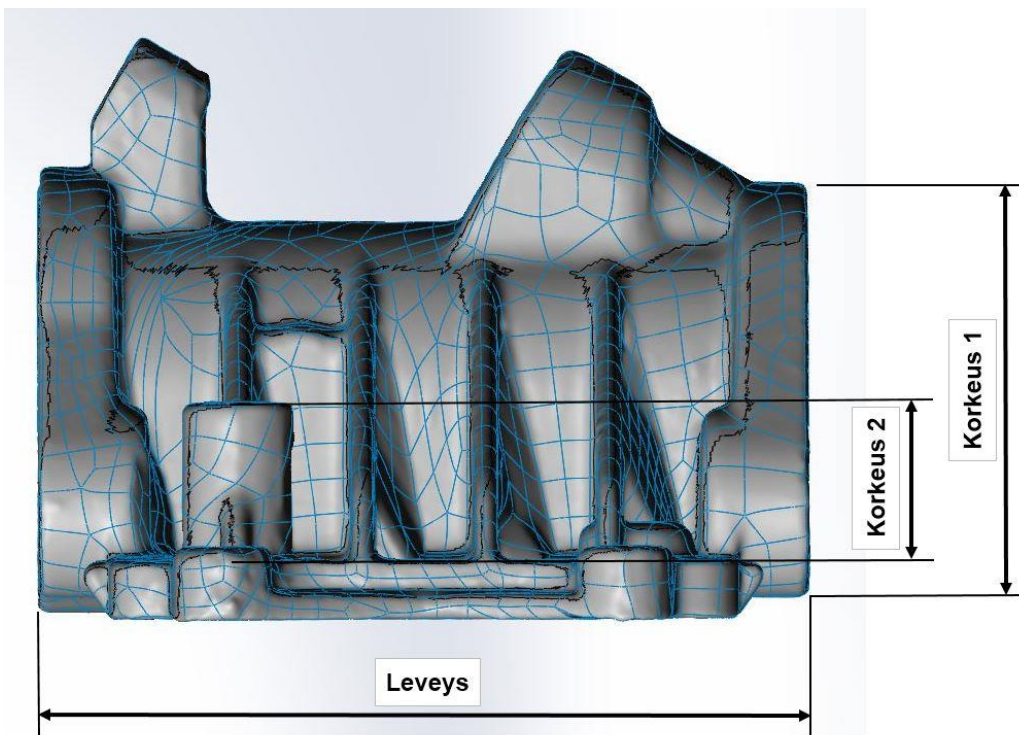
MITTAUKSEN KOHDE	GEOMAGIC DESIGN X - MALLI (mittaustulos mm)	MESHLAB, SOLIDWORKS - MALLI (mittaustulos mm)	FYYSINEN KAPPALE (mittaustulos mm)
Leveys	81.36	80.88	82.00
Korkeus 1	43.23	43.23	43.50
Korkeus 2	16.69	16.3	16.50
Syvyys 1	5.96	5.87	6.20
Syvyys 2	4.52	7.64	8.00

Taulukon mitat vastaavat kuvaan 28 sekä kuvaan 29 merkittyjä mittoja. Ohjelmistojen väliset mittaerot johtuvat suurimmaksi osaksi niiden käytettävyydestä. Taulukon 1 Syvyys 2 mittaus on suoritettu paikasta, johon skannerilla oli erittäin huono näkyvyys. Geomagic Design X -ohjelmisto loi automaattisesti huonosta pisteverkosta virheellisen muodon. MeshLab-ohjelmistoon syötettävillä parametreilla pystyttiin kompensoimaan huonolaatuisen pistepilven aiheuttamaa virhettä. (19; 29.)



KUVA 28. Taulukon 1 mittauskohteita

Vertailtaviksi kohteiksi valittiin kappaleesta löytyviä toisistaan erilaisia, mutta kuitenkin yksinkertaisia muotoja. Einscan-S-3D-skannerilla oli vaikeuksia lukea ahtaita syvyysmittoja kappaleesta, joten eri ohjelmistojen tarjoamat ominaisuudet korostuvat pisteverkkoa luotaessa kyseisistä muodoista.



KUVA 29. Taulukon 1 mittauskohteita

4 3D-TULOSTUSPROSESSI

Vertex K8400-3D-tulostuslaitteistossa on havaittu ongelmia tulostuslaadun suhteen. Laitteen tulostustaso ei vastaa valmistajan määrittämää tarkkuutta (16; 32, linkit Using the printer -> 8. Repetier explained). Opinnäytetyön aikana perehdyttiin tulostimen ongelmakohtiin, ja pyrittiin löytämään ratkaisuja, joilla saadaan tulostuksen laatua parannettua.

4.1 Tulostusparametrien määrittäminen

Tulostuspään osia muokattaessa sekä materiaalikelan vaihdon yhteydessä tulisi suorittaa koetulostus, jolla määritetään oikeat tulostusparametrit kompensoimaan muutoksia. Eri tulostusmateriaalierillä voi olla suuriakin eroavaisuuksia parametrien asetuksiin. 3D-tulostuksen kannalta tärkeimmät määritettävät parametrit ovat tulostusmateriaalivirtauksen suuruus ja suulakepuristimen lämpötila. Myös tulostusnopeus ja tulostetun materiaalin kerrosvahvuus ovat 3D-tulostamisen kannalta oleellisia parametreja. (32, linkit Using the printer -> 9. First print; 33.)

Materiaalivirtaus tulee säätää laitekohtaisesti. Suulakepuristimen lämpötila tulee asettaa käytettävän tulostusmateriaalin mukaan. Materiaalivalmistajat ilmoittavat yleensä kullekin materiaalille suunta-antavan lämpötila-alueen. Tulostusnopeus ja haluttu tulostetun kerroksen vahvuus riippuvat täysin halutusta tulostustarkkuudesta. Parhain laatu ja tarkkuus saavutetaan, kun käytetään pienimpiä mahdollisia arvoja. Tällöin kuitenkin kappaleen tulostamiseen tarvittava aika pitenee huomattavasti. (32, linkit Using the printer -> 9. First print; 33.)

Tulostettavana testikappaleena käytettiin 20 mm:n neliöputkea sekä suorakulmion muotoista levyä. Kappaleen seinämävahvuuden määrittelyssä käytettiin 0,2 mm tulostuslaadun kerrannaista. Tällöin esimerkiksi yhden millimetrin paksuinen seinämä saadaan tulostettua tasan viidellä ylivedolla. Mikäli tulostusparametrit on määritetty oikein, tulisi seinämävahvuuden vastata yhtä millimetriä.

Levyäistä kappaletta tulostettaessa havaitaan mahdolliset virheet korkeus-akselin kalibroinnissa. Tulostetun levyn pinnalla ilmenee epätasaisuuksia, mikäli

kalibrointi ei ole onnistunut. Virheellinen kalibrointi saattaa aiheuttaa tulostuspään törmäämisen tulostettavan kappaleen pintaan tai suuttimen etäisyys jää liian suureksi, jolloin kerrokset eivät tartu toisiinsa parhaimmalla mahdollisella tavalla. Huono tartunta voi aiheuttaa kappaleen irtoamisen tulostusalustasta kesken tulostuksen. (32, linkit Using the printer -> 4. Calibrating Z axis; 33.)

Kokeilun aikana etsittiin myös suurin mahdollinen kerrosvahvuus muokatulle 0,45 mm:n suuttimelle. Tulostimen suuttimia on jouduttu avartamaan joustavan materiaalin tulostamisen helpottamiseksi, mikä voi vaikuttaa tulostus tarkkuuteen heikentävästi etenkin pienimmällä kerrosvahvuudella tulostettaessa. Suuttimien avartaminen mahdollistaa suuremman kerrosvahvuuden käyttämisen, mikä lyhentää tulostusaikaa huomattavasti. (33.)

Suuttimen avartamista joudutaan kompensoimaan tulostusparametreja muuttamalla. Valmistajan mukaan alkuperäisellä 0,35 mm:n suuttimella pystytään tulostamaan korkeintaan 0,2 mm:n kerrosvahvuutta. Suurempaa kerrosvahvuutta käytettäessä tulee myös kasvattaa suuttimen etäisyyttä tulostusalustasta. Valmistajan määrittämä etäisyys on 0,35 mm, mikä vastaa suuttimen halkaisijaa. Tästä voidaan päätellä muokatun suuttimen etäisyydeksi 0,45 mm ja suurimmaksi kerrosvahvuudeksi 0,3 mm. Suurempi korkeusetäisyys estää kuitenkin pienimmällä kerrosvahvuudella tulostettujen kerrosten tarttumisen toisiinsa. Lisäksi tulostimen epätarkkuus kasvaa suhteessa suuttimen etäisyyteen. (16; 32 linkit Using the printer -> 4. Calibrating Z axis; 33.)

Ennen testikappaleiden tulostamista tulostin kalibroitiin valmistajan ohjeiden mukaan. Suuttimen ja tulostusalustan välinen etäisyys määritettiin ohjeista poiketen 0,45 mm:iin suuremman kerrosvahvuuden testaamiseksi. Tulostuspään korkeuden todentamisen apuna käytettiin 0,35 mm:n vahvuista käyntikorttia ja noin 0,1 mm:n vahvuista paperipalaa. (32, linkit Using the printer -> 4. Calibrating Z axis; 33.)

Kalibroitaessa tulostuspää ajettiin kolmeen tiedettyyn pisteeseen manuaalisesti. Kussakin pisteessä suuttimen etäisyys säädettiin koskettamaan suuttimen ja alustan väliin päällekkäin asetettua käyntikorttia ja paperia kuitenkin niin, että tulostuspään sivuttaissuuntaiset liikkeet eivät rajoittuneet. Suurempaa etäisyyttä

käytettäessä havaittiin kuitenkin merkittävää tulostuslaadun heikkenemistä pienimmillä kerrosvahvuuden arvoilla tulostettaessa. Tästä johtuen tulostin kalibroitiin lopulta valmistajan ilmoittamien parametrien mukaan. (32, linkit Using the printer -> 4. Calibrating Z axis; 33.)

Ensimmäisessä testikappaleessa havaittiin täyttörakeenteen muodostavan epämuodostuneita ja liian paksuja seinämiä, mikä johtuu yleensä liiallisesta materiaalin syötöstä (33). Materiaalivirtausta muutettiin pienemmäksi 5–10% askeleissa kunnes seinämänvahvuus vastasi CAD-mallin mittoja. Materiaalivirtausta vähennettäessä tulee huomioida erityisesti, että kappaleen korkeusmitta vastaa mallia. Materiaalinsyöttö on asetettu liian pieneksi, mikäli kappaleen korkeusmitta on pienempi kuin CAD-mallissa.

Mittauksissa tulee myös huomioida käytetyn suuttimen lämpötilan vaikutus tulostuslaatuun. Toisen testikappaleen tulostuksen yhteydessä säädettiin suuttimen lämpötilaa tulostuksen aikana materiaalivalmistajan määrittämän 190–220 °C rajoissa (32, linkit Using the printer -> 9. First print; 33; 34; 35; 36.). Kokeilu toteutettiin tulostamalla ensimmäisessä testissä käytettyä neliöputkea 10 millimetriä kerrallaan, minkä jälkeen tulostus keskeytettiin ja lämpötilaa nostettiin viidellä Celsius asteella. Aloitustempötilaksi valittiin alin materiaalivalmistajan ilmoittama lämpötila.

Mustalla PLA-muovilla tulostettaessa havaittiin 190–210 °C lämpötilan aiheuttavan riittämättömän tarttuvuuden kerrosten välillä. Kerrokset puolestaan sulivat liikaa 215–220 °C lämpötilaa käytettäessä. Mustalle PLA-materiaalille valittiin suulakepuristimen lämpötilaksi 215 °C ja puhaltimen tehoa kasvatettiin materiaalin liiallisen sulamisen estämiseksi. Valkoisella PLA-muovilla tulostettaessa havaittiin optimaalisin lämpötilan olevan noin 215 °C. Materiaalien optimaalisin lämpötila voi vaihdella suuresti myös saman valmistuserän tai materiaalikelan sisällä, mikä johtuu PLA-muovilaadun herkkyydestä kosteudelle sekä UV-säteilyn aiheuttamalle haurastumiselle. (32, linkit Using the printer -> 9. First print; 33; 34; 37; 38, s. 153–156, 159-160; 39, s. 529–531.)

Optimaalisilla tulostusparametreilla tulostettaessa havaittiin, että tulostettujen kappaleiden toinen sivumitta ei vastannut 3D-mallin mittoja. Tulostettavana mallina käytettiin neliömäistä ja sivumitoiltaan 16 mm:ä suuntaansa olevaa kappaletta. Tulostettua kappaletta mitattaessa havaittiin sivumittojen olevan 15,88 mm ja 15,99 mm, joista jälkimmäinen vastaa tulostimen valmistajan ilmoittamaa 0,1 mm:n tulostustarkkuutta.

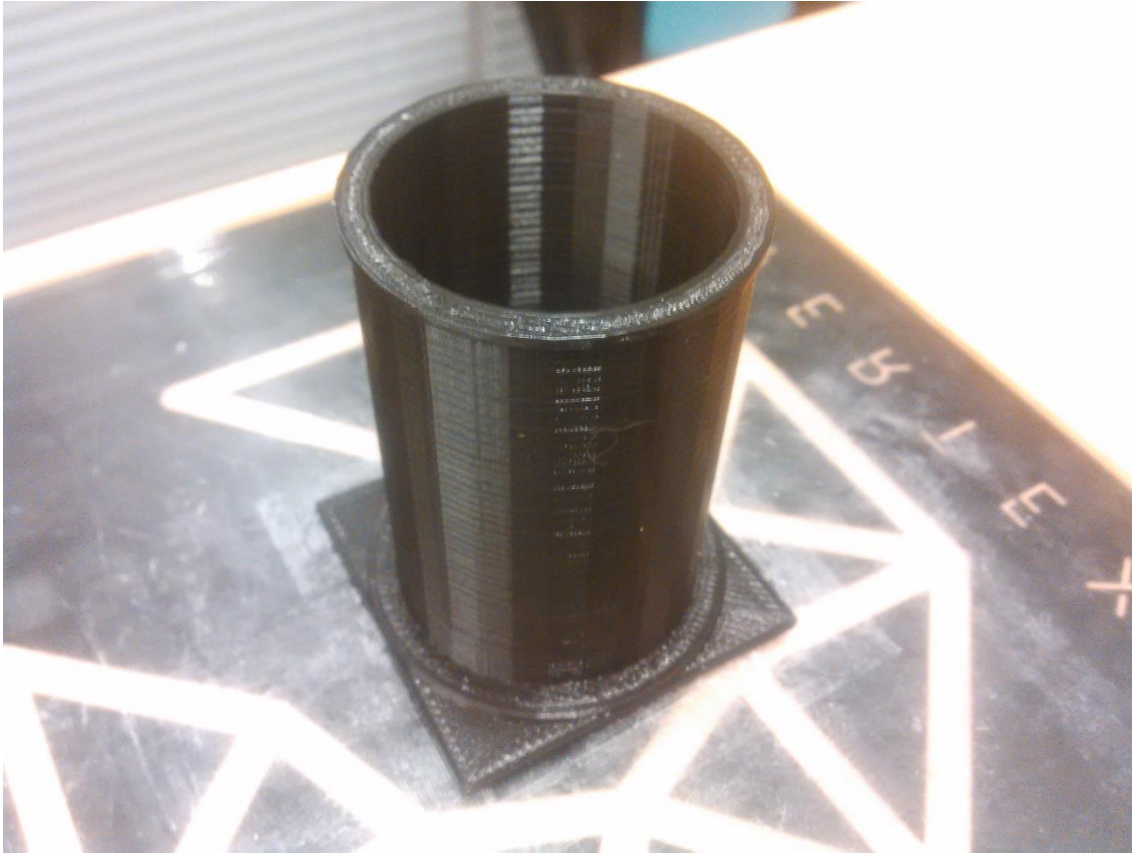
Sivumittojen mittaero toistui kaikilla tulostetuilla kappaleilla. Lisäksi tulostustarkkuusongelma havaittiin olevan aina samalla liikeakselilla. Vaikka tulostustarkkuus on lähellä valmistajan ilmoittaman tarkkuuden ulkopuolella, voi sivujen mittaero aiheuttaa yhteensopivuus ongelmia toisiinsa liitettävillä tulostetuilla kappaleilla. Ongelma voi johtua ohjelmallisesta virheestä tai toisen liikeakselin liikkeet ovat rajoittuneet. (33; 40; 41.)

4.2 Materiaalisuorituksen kehittäminen

PLA-muovin tulostaminen on ongelmallista, johtuen PLA-muovilaadun kosteuden herkkyydestä. Muovi imee ilmankosteutta itseensä, mikä aiheuttaa tulostettaessa kuplia ja tästä johtuen suulakepuristin ei toimi optimaalisella tavalla. Kosteus myös haurastuttaa PLA-muovia yhdessä UV-säteilyn kanssa, mikä voi ilmetä materiaalilangan katkeiluna ja syöttöhäiriöinä. (33; 34; 37; 38, s. 153–156, 159–160; 39, s. 529–531; 41.)

Opinnäytetyössä kosteuden imeytymistä pyrittiin vähentämään sulkemalla materiaalikela ilmatiiviiseen tilaan. Käytännössä tämä toteutettiin käyttämällä ilmatiivistä rasiaa, johon kiinnitettiin rulla materiaalikelalle ja ilmatiivis läpivienti materiaalisuoritukselle. Rasian kiinnittämiseen suunniteltiin kiinnityskannatin, joka sopii asennettavaksi tulostimen alkuperäisen kelarullan paikalle.

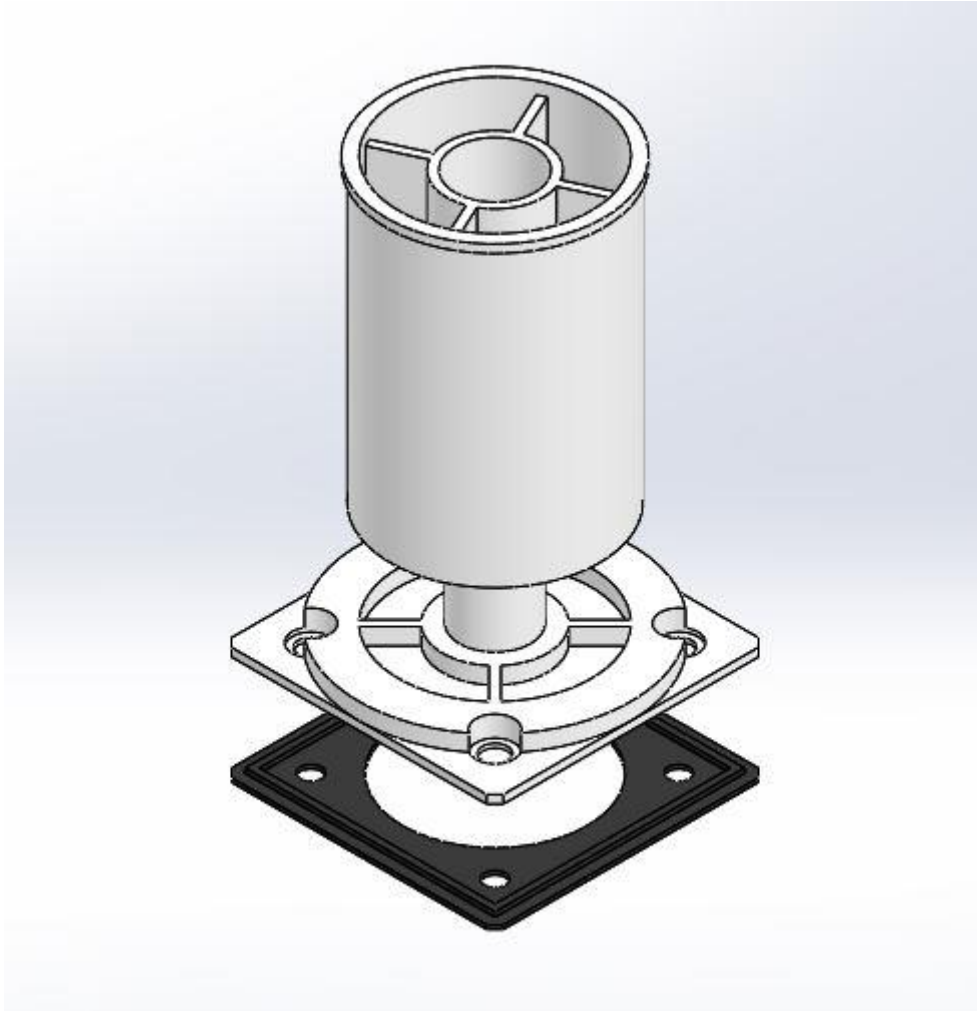
Kuvassa 30 oleva kelarulla päätettiin valmistaa 3D-tulostamalla. Rullan suunnittelun apuna käytettiin Vertex K8400-3D-tulostimen omaa materiaalikelarulla, jota yksinkertaistettiin tulostamisen helpottamiseksi.



KUVA 30. Materiaalikelarullan ensimmäinen versio

Ensimmäisessä versiossa kelan kannatin sekä kotelon kiinnityskannatin kiinnitettiin asennusteipillä rasiaan ilmatiiveyden säilyttämiseksi. Läpiviennille porattiin aukko 25 mm:n kartioporanterällä. Läpiviennin paikka määritettiin niin, että materiaali tulee kelalta tangentiaalisesti ja mahdollisimman vapaasti tulostimen materiaalinsyötölle. Materiaalin liikkumista voidaan tarvittaessa helpottaa asentamalla kahden mm:n sisähalkaisijalla oleva putki syöttämään materiaalia läpiviennin lävitse.

Rasian pohjalle pyrittiin jättämään riittävästi tilaa silikageelipusseja varten. Silikageeli imee rasiaan sisään päässeen kosteuden itseensä ja estää PLA-materiaalin vahingoittumisen (41). Asennusteipin tarttuvuuden havaittiin olevan huono rasiaan muovilaadusta johtuen, joten viimeisessä versiossa teippikiinnitys korvattiin ruuveilla kestävyuden varmistamiseksi. Lisäksi rullaa muokattiin niin, että siihen voidaan asettaa myös pienempiä materiaalikeloja. Kuvassa 31 näkyy lopullinen versio materiaalikelan kannattimesta.



KUVA 31. Materiaalikelankannattimen kokoonpano

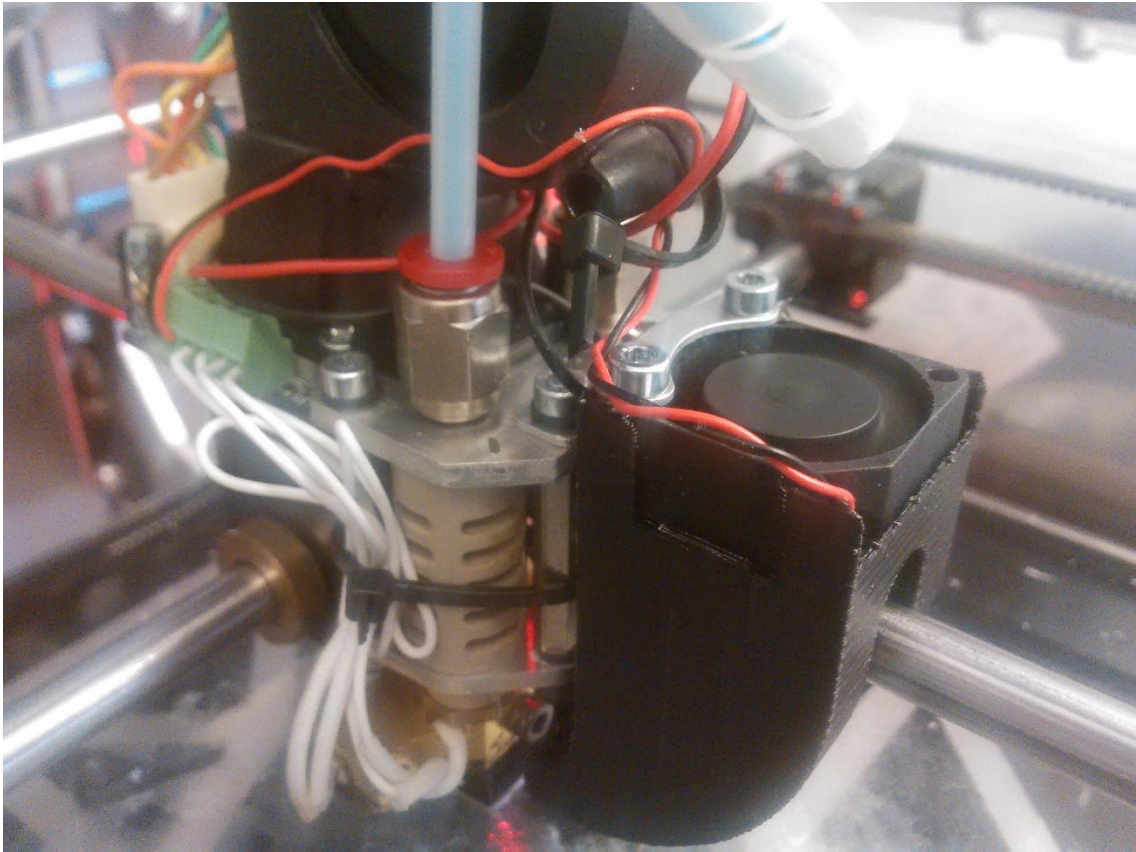
Kannattimesta voidaan tarvittaessa poistaa suuremmalla halkaisijalla oleva rulla, jotta voidaan käyttää myös pienempiä materiaalikeloja. Kiinnitysruuvien läpiviennit voidaan tiivistää kumisella tiivisteellä. Kannatin sopii asennettavaksi suoraan Vertex K8400-3D-tulostimen oman materiaalikelankannattimen paikalle.

4.3 Tulostuspään kehittäminen

Testikappaleita tulostettaessa havaittiin suuria ongelmia tulostuslaadussa. Ongelmat ilmenivät tulostuspään tehdessä lyhyitä liikkeitä pienen alueen yläpuolella, mikä viittaisi tulostuspään riittämättömään jäähdytystehoon sekä liian kor-

keaan suuttimen lämpötilaan (33; 40; 41; 42). Ongelmat ilmenivät erityisesti puhelimen TOH-takakantta tulostettaessa sekä tornimaisissa muodoissa, jotka sulivat lähestulkoon muodottomiksi.

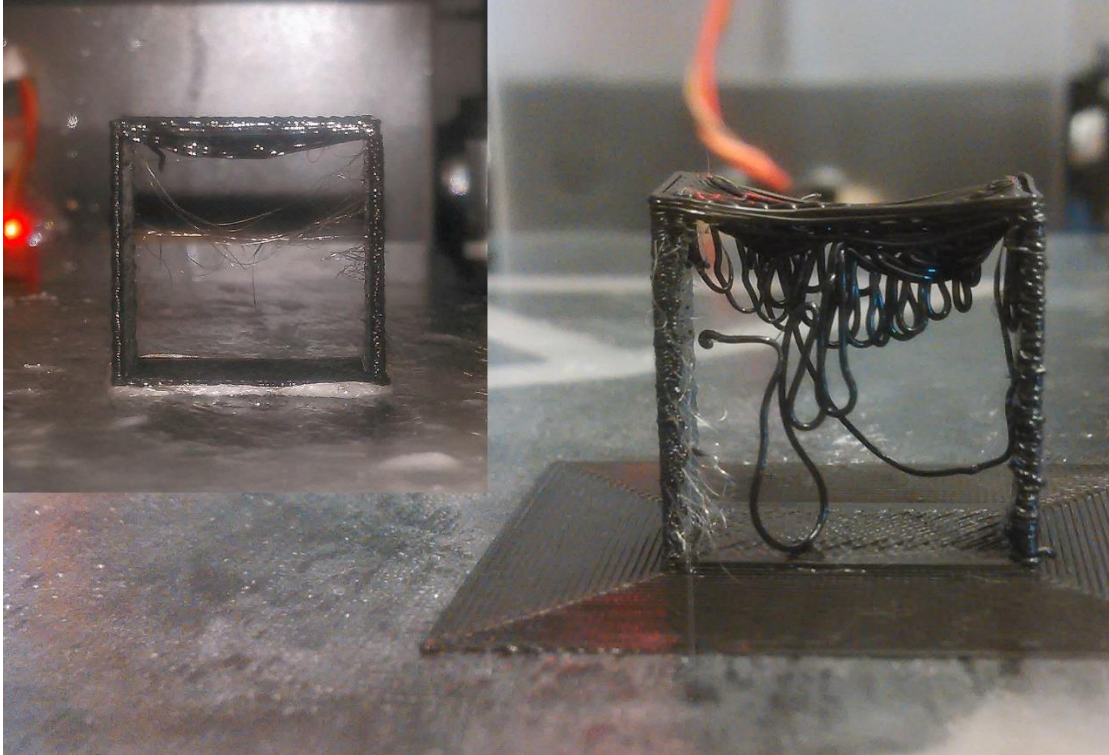
Tulostettujen kerroksien sulamisongelma pyrittiin ratkaisemalla lisäämällä tulosuspään jäähdytystehoa. Käytännössä jäähdytystehoa lisättiin kuvassa 32 näkyvällä ilmanohjaimella, joka valmistettiin 3D-tulostimella. Ilmanohjain suuntaa tulosuspään puhaltimelta tulevan ilman paremmin tulostettavan kappaleen pintaan. Ilmanohjain jäähdyttää tulostetut kerrokset nopeammin, jolloin myös ulokkeiden tulostuslaatu paranee. Yleensä tulostetut ulokkeet ja siltamaiset kappaleet valuvat sekä roikkuvat huomattavasti, sillä kerrokset eivät ehdi jäähtyä riittävän nopeasti. (33; 40; 41; 42)



KUVA 32. Opinnäytetyön aikana suunniteltu jäähdytystä parantava ilmanohjain

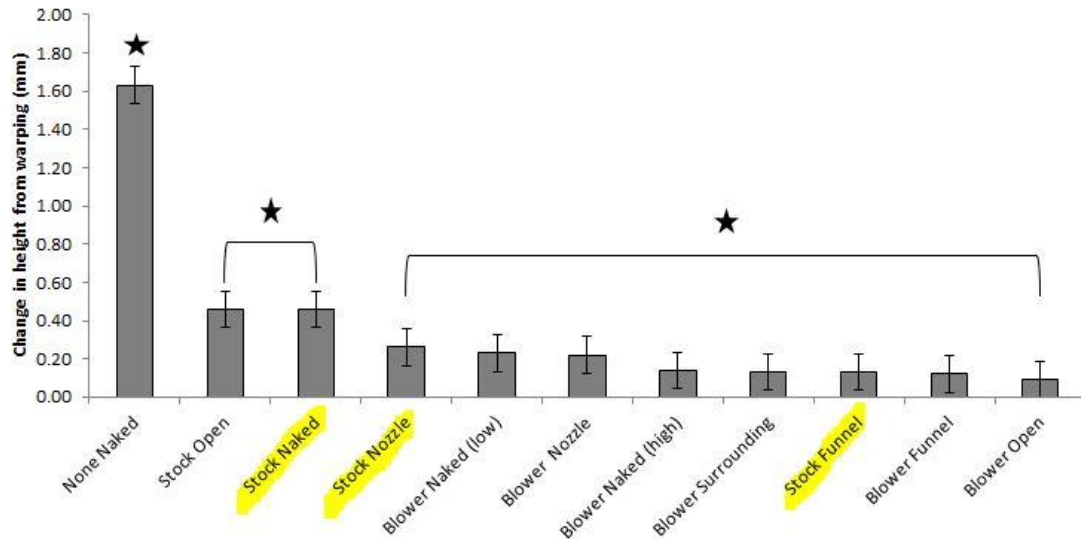
Kuvassa 33 nähdään ilmanohjaimen avulla 3D-tulostetun yhden mm:n vahvuisen neliöputken poikkileikkaus vasemmalla tulostettuna ilmanohjaimella ja oike-

alla alkuperäisellä tuuletin kokoonpanolla. Ilmanohjainta käytettäessä kappaleen yläpuoli tulostui täysin tasaiseksi huolimatta pitkästä 18 mm:n tukivälistä. Tuloste jäi roikkumaan noin kolme mm kappaleen yläpinnasta. Ilman ilmanohjainta vastaavan kappaleen tuloste jäi roikkumaan viidestä kuuteen mm:ä kappaleen yläpinnasta ja tasaisen yläpinnan tulostaminen epäonnistui täysin.



KUVA 33. Siltamaistenkappaleiden 3D-tulostustesti

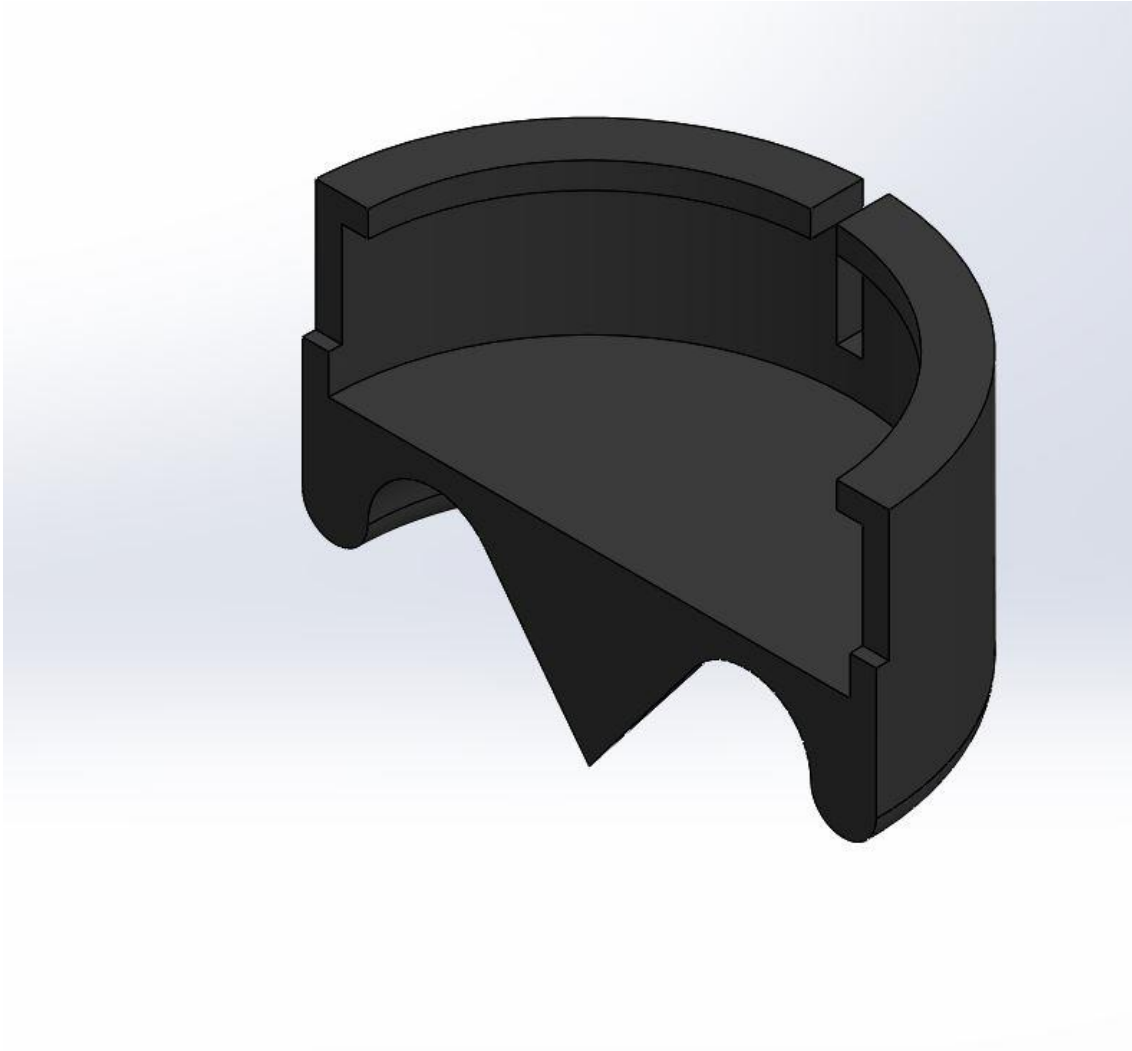
Kuvassa 34 näkyy Vertex K8400-3D-tulostimen kaltaisen tulostimen ilmanohjaimien sekä tuulettimien vaikutus 45° kulmaan tulostettuun ulokkeeseen. Vertex K8400-3D-tulostimeen suunniteltu ilmanohjain vastaa kuvaan 34 merkittyjä Stock Nozzle- sekä Stock Funnel-mallisia ilmanohjaimia. Ilmanohjainta käytettäessä tulostemateriaalin roikkuminen puolittuu alkuperäiseen jäähdytystapaan verrattuna. Alkuperäinen jäähdytys on toteutettu kummassakin tulostimessa yhdellä tuulettimella, joka on suunnattu jäähdyttämään tulostettavan kappaleen pintaan. Alkuperäinen jäähdytys vastaa kuvaan 34 merkittyä Stock Naked-koh-
taa. (42.)



KUVA 34. Puhaltimien sekä ilmanohjaimien vertailu (40)

Ilmajäähdytystä lisättäessä tulee kuitenkin ottaa huomioon puhallustehon vaikutus tulostettavaan materiaaliin. Esimerkiksi liian tehokas puhallin voi työntää tulostettavaa kerrosta sivuun ja näin ollen aiheuttaa muotovirheitä. Liian nopea jäähdytys voi myös haitata kerrosten kiinnittymistä toisiinsa. (41; 42.)

Kappaleiden tulostuksen yhteydessä havaittiin seinämien olevan pinnanlaadultaan epätasaisia. Lisäksi tulostuspää saattoi vaihtelevasti pursottaa ylimääräistä materiaalia pikaliikkeen aikana. Epätasaisuus voi johtua tulostimen omasta värähtelystä, mikä saa tulostuspään tärähtämään sivuun liikeradaltaan. Ylimääräinen materiaalin pursotus saattaisi johtua tärinän ja suurennettujen suuttimien yhteisvaikutuksesta. Ongelmaa pyrittiin vähentämään joustavilla tärähdyksiä vaimentavilla tassuilla. Kuvassa 35 näkyvä tassu suunniteltiin valmistettavaksi 3D-tulostamalla joustavaa materiaalia. Joustavat tassut tai vaihtoehtoisesti joustava matto tulee asentaa tulostimen omien tukijalkojen alle. (41; 43.)



KUVA 35. Tärinän vaimennustassun poikkileikkauskuva

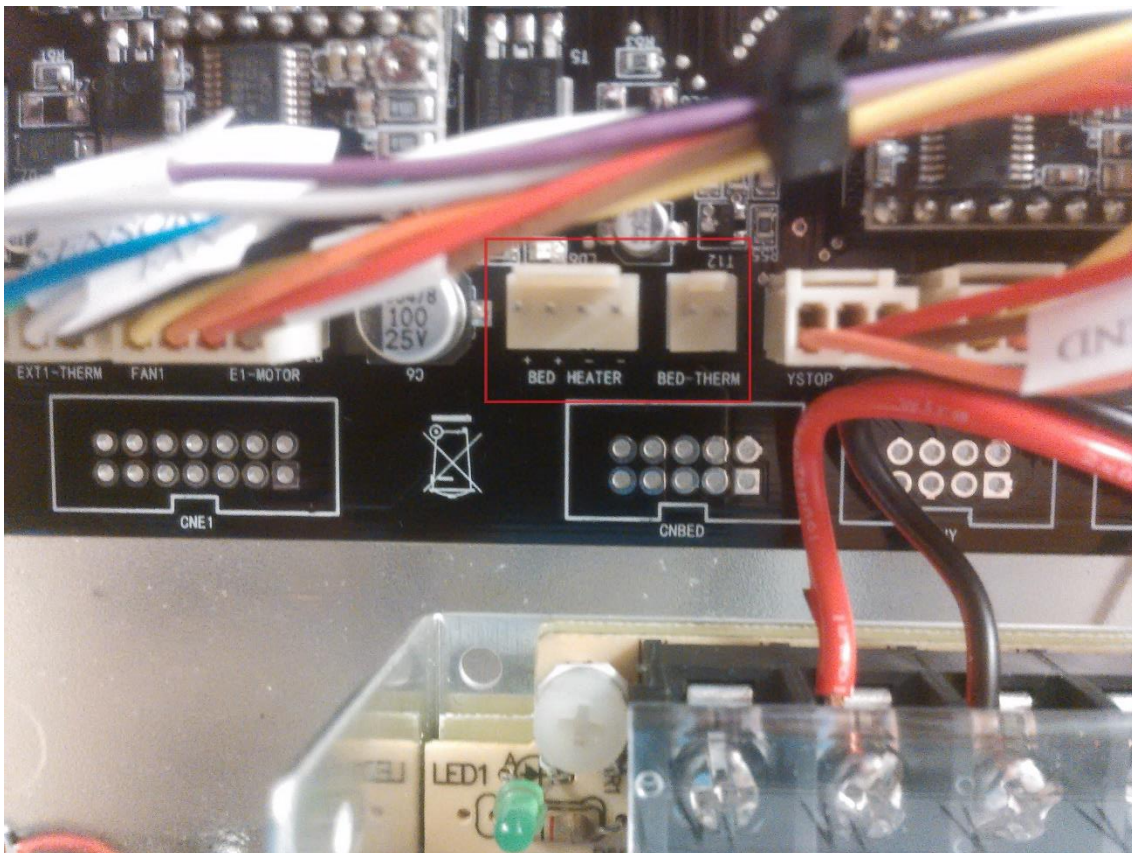
Epätasaiset pinnat voivat myös johtua askelmoottorien virheliikkeistä (43.). Virheliikkeitä voi aiheuttaa esimerkiksi virheellisesti asetettu moottorien ohjausjännite. (43.). Virheellisesti asetetut jännitteet pystyttiin kuitenkin pois sulkemaan ongelman aiheuttajista mittaamalla jännitteet moottorien ohjauspiiristä. Lisäksi tulostuspään liukuakselien kiinnitysmekaniikan havaittiin olevan heikkolaatuista, mikä saattaa myös vaikuttaa tulostuspään virheliikkeitä lisäävästi. (41.)

4.4 ABS-muovin tulostus

ABS-muoveilla on hyvä mekaaninen ja kemikaalien kesto. ABS muovit pitävät hyvin muotonsa ja niillä saavutetaan hyvä pinnanlaatu 3D-tulostuksessa. ABS-

muovia tulostettaessa on käytettävä lämmitettyä tulostusalustaa muovin tarttumisen edistämiseksi. Alustan lämpötila tulisi olla noin 90–110 °C. Kun käytössä on lasinen tulostusalusta, tulee alusta teipata lämpöä kestävällä Kapton- tai PET-teipillä ensimmäisen tulostuskerroksen tarttumisen edistämiseksi. Suositeltava suuttimen lämpötila ABS-muoville on 200–250 °C riippuen käytettävästä ABS-muovilaadusta. ABS-muovia tulostettaessa on huomioitava, että se on myös PLA-muovia alttiimpi liian nopean jäähtymisen aiheuttamalle halkeilulle. (41; 44; 45; 46; 47; 48.)

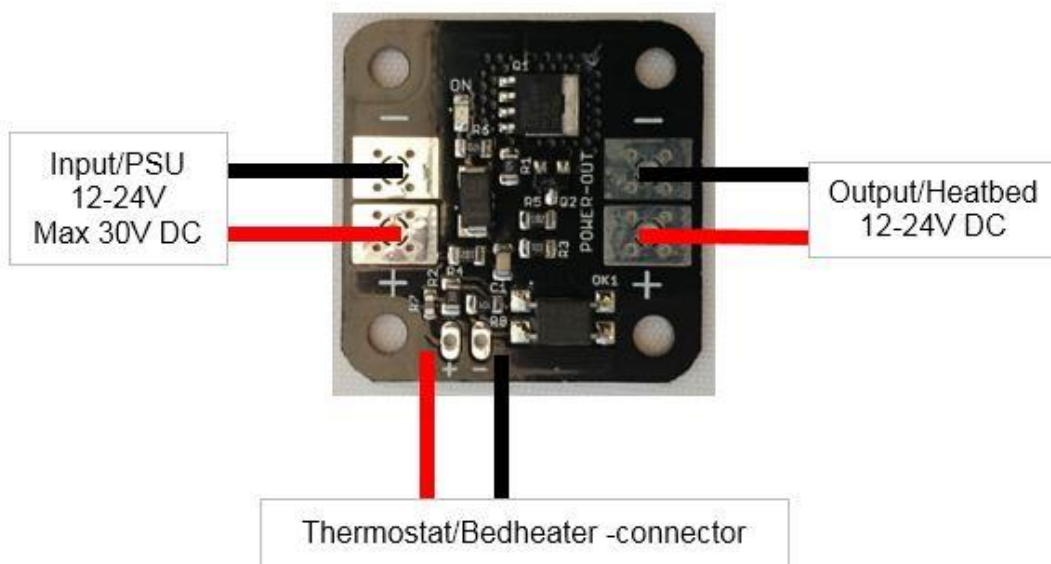
Vertex K8400-3D-tulostin tukee vain osittain ABS-muovin tulostamista. Tulostimen ohjauspiirillä on kuvassa 36 näkyvät liitäntämahdollisuudet lämmitetylle alustalle, mutta tulostimen oma virtalähde on kuitenkin riittämätön ylläpitämään vaadittua lämpötilaa. (41; 49, s. 1–2, 5–7.)



KUVA 36. Lämpöalustan liitännät

Vertex K8400-3D-tulostin vaatii vähintään 150 Wattia teholtaan ja 15 voltia jän-

nitteeltään olevan virtalähteen, ja yleisimmät markkinoilla olevat 3D-tuloslämpöalustat vaativat noin 150 Watin tehon virtalähteeltä. Näin ollen Vertex K8400-3D-tulostimen virtalähde tulisi korvata 300 Wattia teholtaan ja 15 voltilla syöttävällä virtalähteellä tai vaihtoehtoisesti voidaan asentaa tulostusalustalle erillinen teholtaan noin 150 Wattia oleva virtalähde. Lämpöalustan liitännöiden kautta voitaisiin esimerkiksi releohjata erillistä lämpöalustalle tarkoitettua virtalähdettä kuvan 37 mukaisesti. Tällöin tulostimen oman virtalähteen kuormitus jäisi huomattavasti vähäisemmäksi. (41; 49, s. 1–2; 50.)



KUVA 37 RepRap Power expander -releohjaimen kytkentä (50)

RepRap Power expander-releohjaimen sisääntulo kytketään erilliseen 12–24 Voltin jännitteellä olevaan virtalähteeseen ja ulostulo 12–24 voltin jännitteellä toimivaan lämpöalustaan. Termostaattiliitännät kytketään kuvassa 36 näkyvään tulostimen ohjauspiiriin lämpöalustalle tarkoitettuun liittimeen. Lisäksi lämpöanturi tulee asentaa tulostusalustan pohjaan sekä kytkeä tulostimen ohjauspiiriin termostaattiliitännätään. Lämmitetyn tulostusalustan asentamisesta muodostuu noin 120 euron kustannukset taulukon 2 mukaisesti. (49, s. 5–6; 50)

TAULUKKO 2. Lämpöalustan asentamiseen vaadittavien tarvikkeet (50)

TARVIKE	HINTA (hinta euroina)
RepRap ALU Heatbed MK3-lämpöalusta	21,00
Lämpöanturi 100K SMD	4,38
Heatbed Thermal Insulator 200x200-lämpöeriste	7,00
Prusa Heatbed Mount Kit-asennusosasarja	17,50
Power Expander-releohjain	17,50
150W:n tai >300W:n virtalähde	noin 50

5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli kehittää toimiva 3D-skannausprosessi ja parantaa 3D-tulostuslaitteiston toimintaa. 3D-tulostuslaitteisto oli valmistettu 3D-tulostuslaitteistolle sopimattomista materiaaleista, minkä vuoksi laitteisto oli altis värähtelyille. Tulostimen materiaalivalinta näkyy osittain huonossa tulostuslaadussa. Etenkin askelmootoreihin kiinnityvien hihnapyörien lukitusmekaniikka oli heikko ja osa liukuakseleista vastusti tulostuspään liikkeitä. Lisäksi tulostimen oma värähtely aiheuttaa pieniä pintavirheitä kappaleisiin. Laitteiston värähtelyä pyrittiin vaimentamaan joustavilla tassuilla.

Tulostimen muovisten seinäelementtien korvaaminen alumiinisilla vastaavilla lisäisi tulostimen jyrkyyttä ja sitä myötä värinästä aiheutuvat virheet vähenisivät. Alumiinisiin elementteihin kiinnitetyt tulostuspään liikeakselit saataisiin myös kohdistettua tarkemmin, sillä alumiinista valmistettujen kappaleiden mittatarkkuus on huomattavasti parempi kuin muovisten.

Osa tulostusmateriaaleista on erityisen herkkiä ilmankosteudelle ja UV-säteilyn aiheuttamalle haurastumiselle, mikä heikentää tulostuslaatua entisestään. Tulostuksen laatua pyrittiin parantamaan laitteistoa muokkaamalla ja optimoimalla eri asetusparametreja kokeiden avulla. PLA-materiaalikelan ilmatiivis kotelointi vähentää materiaalilangan katkeilua ja näin ollen vähentää myös tulostusongelmia.

Monimuotoisen skannattavan kappaleen käsittely oli hidasta ja työlästä eri ohjelmistoissa. Lisäksi skannerilla oli vaikeuksia lukea eräitä kappaleen pinnanmuotoja, mikä aiheutti ongelmia 3D-mallin luomiseen. Mahdollisimman mittatarkka 3D-malli saadaan pitämällä pisteverkon pisteiden lukumäärä korkeana. Liian korkea pisteiden lukumäärä saattaa kuitenkin hidastaa ohjelmistojen toimintaa ja näin ollen lisätä käsittelyyn tarvittavaa työaikaa huomattavasti.

Skannauksen yhteydessä luotua pisteverkkoa voidaan käyttää suoraan hyödyksi laaduntarkastelussa. Avoimen lähdekoodin ohjelmistot tarjoavat kuitenkin vain rajoitettuja työkaluja pisteverkon mittaamiseen. Tarkemmat mittaustulokset

saavutetaan mittaamalla pisteverkosta luotua 3D-mallia kaupallisten CAD-ohjelmistojen mittatyökaluilla. Kaupalliset ohjelmistot ovat avoimen lähdekoodin ohjelmistoja vakaampia, mikä helpottaa työskentelyä huomattavasti. Pistetiheydeltään suuren pisteverkon käsittely avoimen lähdekoodin ohjelmistoilla aiheuttaa ohjelmiston hidastelua sekä toimintojen keskeytymistä paljon enemmän kuin kaupallisissa vastaavissa ohjelmistoissa.

Isoja kappaleita skannattaessa tulee erityisesti ottaa huomioon 3D-mallilta vaaditun tarkkuuden ja mallintamiseen käytetyn työajan suhde. Työaikaa kului noin 12 tuntia alumiinikappaleen skannaamiseen ja 3D-mallin luomiseen MeshLab- ja SolidWorks-ohjelmistoja apuna käyttäen. Vastaavasti SolidWorks-ohjelmiston kanssa yhteensopivan pintamallin luomiseen pelkällä Geomagic X-ohjelmistolla kului aikaa vain noin kaksi tuntia, josta noin tunti kului automaattiseen kappaleen luomiseen. Geomagic X-ohjelmistolla luotu pintamalli vastasi pistepilvitiedostoja huomattavasti SolidWorks-ohjelmistolla luotua mallia tarkemmin. Lisäksi ohjelmiston käyttö oli yllättävän helppoa, ja mallin luominen onnistui helposti ilman ohjeita. Tarvittaessa on kuitenkin saatavilla virallinen ohjestus. MeshLab-ohjelmisto antaa käyttäjälle huomattavasti vähemmän palautetta mallin luomiseen tarvittavista toimista. Lisäksi MeshLab-ohjelmiston dokumentointi oli hyvin vähäistä ja suurin osa dokumentaatiosta perustui muiden käyttäjien tekemiin havaintoihin.

3D-skannausprosessin ohjeistus tehtiin omia havaintoja hyväksikäyttäen. Ohjeistus on tarkoitettu Shining 3D EinScan-S-skannerille, EinScan-S-skannerin ohjausohjelmistolle, SolidWorks-suunnitteluohjelmistolle ja MeshLab-pisteverkonsäätely ohjelmistolle. Skannauslaitteistojen perustoimintaperiaatteet ovat samat, joten ohjeistusta voidaan käyttää yleishyödyllisesti kaikissa 3D-skannausprojekteissa.

LÄHTEET

1. 3D Scanning - Hard Work That Looks Like "Magic". 2015. Laser Design. Laser Design. Saatavissa: <http://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning>. Hakupäivä 11.12.2015.
2. MeshLab tutorial. MeshLab -ohjelmiston käyttöohjeistus. Saatavissa: <http://www.cse.iitd.ac.in/~mcs112609/Meshlab%20Tutorial.pdf>. Hakupäivä 15.10.2015.
3. 3D Scanning Technical Information. 2015. Laser Design. Saatavissa: <http://www.3dscanco.com/about/3d-scanning/benefits.cfm>. Hakupäivä 31.5.2016.
4. 3D Scanning Information. 2015. 3DScanCo. Saatavissa: <http://www.3dscanco.com/about/3d-scanning/>. Hakupäivä 11.10.2015.
5. 3D Scanning 101. 2015. Desktop Engineering. Saatavissa: <http://www.desktopeng.com/de/3d-scanning-101/>. Hakupäivä 15.10.2015.
6. 3D scanning technologies and the 3D scanning process. 2015. Aniwaa Pte. Ltd. Saatavissa: <http://www.aniwaa.com/3d-scanning-technologies-and-the-3d-scanning-process/>. Hakupäivä 08.10.2015.
7. 3D Scanners, A guide to 3D scanner technology. 3D Systems Inc. Saatavissa: <http://www.rapidform.com/3d-scanners/>. Hakupäivä 15.10.2015.
8. Wu, Changchang 2015. VisualSFM : A Visual Structure from Motion System. Saatavissa: <http://ccwu.me/vsfm/>. Hakupäivä 15.12.2015.
9. Bosch Gives Update On Its Autonomous Car Development: 2016. MotorAuthority. Video. Saatavissa: http://www.motorauthority.com/news/1081957_bosch-gives-update-on-its-autonomous-car-development-video. Hakupäivä 25.1.2016
10. Tech Specification. 2015. SHINING3D. Saatavissa: <http://www.ein-scan.com/#!einscan-s/c1zao>. Hakupäivä 15.12.2015.

11. Mitä 3D-tulostus on? 3D Formtech. Saatavissa: <http://www.3dformtech.fi/wordpress/3d-tulostus/mita-3d-tulostus-on/>. Hakupäivä 16.12.2015.
12. Metallin 3D-tulostus. 2015. Tamspark. Saatavissa: <http://tamspark.fi/tuotteet/laser/>. Hakupäivä 16.12.2015.
13. Ceramics. 2015. Materialise. Saatavissa: <https://i.materialise.com/3d-printing-materials/ceramics>. Hakupäivä 16.12.2015.
14. 3D bioprinting of tissues and organs. 2016. Nature Biotechnology. Saatavissa: <http://www.nature.com/nbt/journal/v32/n8/full/nbt.2958.html>. Hakupäivä 10.1.2016.
15. A Comprehensive Introduction to 3D Printing Technology. 2016. 3D Printing for Beginners. Saatavissa: <http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-technology/>. Hakupäivä 10.1.2016.
16. Specification. 2016. Velleman. Saatavissa: <http://www.vertex3dprinter.eu/#specs>. Hakupäivä 10.1.2016.
17. Vertex. 2016. Velleman. Saatavissa: <http://www.vertex3dprinter.eu/#home>. Hakupäivä 25.1.2016.
18. Einscan-S help. 2015. 3D-skannausohjelmiston ohessa toimitettu käyttöohje.
19. Einscan-S initial review. 2015. 3DPrintBoard. Einscan-S 3D-skannerin käyttöön liittyvä keskustelusivusto. Saatavissa: <http://3dprintboard.com/showthread.php?14516-Einscan-S-initial-review&p=66417#post66417>. Hakupäivä 14.11.2015.
20. How to prepare an object for scanning. 2016. 3D-skannattavan kappaleen esikäsittelyyn liittyvä keskustelu sivusto. Saatavissa: <http://forum.david-3d.com/viewtopic.php?p=11999>. Hakupäivä 10.11.2015.

21. 3D Scanning 101. The Fundamentals of the Structured Light 3D Scanning Process. 2013. LMI Technologies. Saatavissa: http://lmi3d.com/sites/default/files/3D_scanning_101.pdf. Hakupäivä 31.5.2016.
22. Digitizer Education | Part 3: Materials for 3D Scanning. 2015. MakerBot® Industries, LLC. Saatavissa: <https://www.makerbot.com/blog/2013/11/08/digitizer-education-part-3-materials-for-3d-scanning>. Hakupäivä 15.11.2015.
23. Colormark Merkintämaali Eco Valkoinen. 2015. Koivunen Oy. Saatavissa: http://www.fixusnet.fi/fin/merkintamaali_eco_valkoinen-p-95342-51578/. Hakupäivä 5.11.2015.
24. MeshLab. 2015. Saatavissa: <http://meshlab.sourceforge.net/>. Hakupäivä 15.10.2015.
25. Set up scanner. 2015. SHINNING3D. Saatavissa: <http://www.ein-scan.com/#!prepare/csm6>. Hakupäivä 15.10.2015.
26. Einscan-S Frequently asked questions. 2015. 3D-skannausohjelmistossa toimitettu vianhaku ohjeistus.
27. Virtual Com Port Drivers. 2015. Future Technology Devices International. Saatavissa: <http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm>. Hakupäivä 20.10.2015.
28. MakerBot/Cleaning Up Point Cloud Meshes in Meshlab For 3D Printing. 2015. Wikiversity. Saatavissa: https://en.wikiversity.org/wiki/MakerBot/Cleaning_Up_Point_Cloud_Meshes_in_Meshlab_For_3D_Printing. Hakupäivä 20.11.2015.
29. Mister P 2011. MeshLab Tutorials. 3D Scanning: merging with Poisson filter. Video. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=dTkiPsNZg_o. Hakupäivä 1.11.2015.
30. nicolas90 2014. Pointcloud to 3D-Mesh in Meshlab Tutorial auf Deutsch. Video. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=gDFRUPK-elc>. Hakupäivä 1.11.2015.

31. Scan Data Processing. 2013. 3D Systems, Inc. Saatavissa: <http://support1.geomagic.com/link/portal/5605/5668/ArticleFolder/402/Knowledge-Base>. Hakupäivä 10.12.2015.
32. Using the printer. 2014. Velleman Projects. Vertex 3D-tulostimen käyttöohjeet. Saatavissa: <http://manuals.velleman.eu/category.php?id=6>. Hakupäivä 5.1.2016.
33. How To Succeed When Printing In PLA. 2015. MatterHackers Inc. Saatavissa: <http://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-printing-in-pla>. Hakupäivä 27.10.2015
34. Bio-based plastics. 2015. PlasticsEurope. Saatavissa: <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/bio-based-plastics.aspx>. Hakupäivä 23.11.2015.
35. What is PLA. 2015. MakerBot Industries, LLC. Saatavissa: <https://www.makerbot.com/what-is-pla>. Hakupäivä 23.11.2015.
36. PLA. 2015. RepRapWiki. Saatavissa: <http://reprap.org/wiki/PLA>. Hakupäivä 23.11.2015.
37. Polylactic acid. 2016. Wikipedia. Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid. Hakupäivä 20.1.2016.
38. Menemşe, Gümüşderelioğlu – Günday, Deniz 1998. Synthesis, Characterization and in Vitro Degradation of Poly(DL-Lactide)/Poly(DL-Lactide-co-Glycolide) Films. S. 153-154. Saatavissa: <http://journals.tubitak.gov.tr/chem/issues/kim-99-23-2/kim-23-2-6-98033.pdf>. Hakupäivä 23.11.2015.
39. Henton, David E – Gruber, Patrick – Lunt, Jim – Randall, Jed 2005. Polylactic Acid Technology. Saatavissa: http://www.jimluntllc.com/pdfs/polylactic_acid_technology.pdf. Hakupäivä 27.11.2015.
40. Frequently asked questions. 2014. Velleman Projects. Saatavissa: <http://manuals.velleman.eu/article.php?id=39>. Hakupäivä 15.1.2016.

41. Ideas for improvement - rant. 2016. Velleman Projects. 3D-tulostamiseen liittyvä keskustelusivusto. Saatavissa: <http://forum.velleman.eu/viewtopic.php?f=64&t=17535&hilit=printing+K8400>. Hakupäivä 25.1.2016.
42. The effects of fan types and fan shrouds on overhangs and warping in 3D printing. 2016. Desi Quintans. Saatavissa: <http://www.desiquintans.com/coolingtests>. Hakupäivä 15.1.2016.
43. Shifting layers. 2015. Velleman 3D Printers Kits WIKI. Saatavissa: http://www.k8xxx-3dprinters.crimed.be/w/index.php?title=Layer_Shift. Hakupäivä 15.1.2016.
44. Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS). PlasticsEurope. Saatavilla: <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/engineering-plastics/abs.aspx>. Hakupäivä 20.1.2016
45. ABS. 2016. RepRapWiki. Saatavilla: <http://reprap.org/wiki/ABS>. Hakupäivä 21.1.2016.
46. The Difference Between ABS and PLA for 3D Printing. 2013. ProtoParadigm LLC. Saatavissa: <http://www.protoparadigm.com/news-updates/the-difference-between-abs-and-pla-for-3d-printing/>. Hakupäivä 10.1.2016.
47. How To Succeed When Printing With ABS. 2014. MatterHackers Inc. Saatavissa: <https://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-printing-with-abs>. Hakupäivä 27.12.2015.
48. Any advice on how to get ABS to stick to the glass. 2016. Ultimaker B.V. ABS-muovin 3D-tulostamiseen liittyvä keskustelu sivusto. Saatavissa: <https://ultimaker.com/en/community/view/4955-any-advice-on-how-to-get-abs-to-stick-to-the-glass>. 27.12.2015 Hakupäivä.
49. Marlark - van der Vooren, Sjaak 2015. Vertex custom heatbed for dummies. Saatavissa: <https://dl.dropboxusercontent.com/s/r0i9tqmcyult8z6/heatbed-for-dummies-v1.pdf>. Hakupäivä 20.1.2016.

50. Heatbed. RepRap ApS. Saatavilla: <http://reprap.me/alu-heatbed-mk3-789.html>. Hakupäivä 25.2.2016.