

Jussi Hautaniemi

Digitaalinen muovaustyökalu ja 3D-tulostaminen taiteen tuottamisessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Mediatekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

4.5.2015

Tekijä Otsikko	Jussi Hautaniemi Digitaalinen muovaustyökalu ja 3D-tulostaminen taiteen tuottamisessa
Sivumäärä Aika	45 sivua 4.5.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Mediatekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Graafinen tekniikka
Ohjaaja	Lehtori Antti Laiho
<p>Insinööriyön tarkoitus oli selvittää digitaalisen muovaustyökalun ja 3D-tulostuksen mahdollisuuksia ja käytännöllisyyttä taiteen tuottamisessa. Käyttötestauksessa oli mukana kuvanveistäjä, joka on erikoistunut metallivalutöihin ja jolla ei ollut aikaisempaa kokemusta 3D-mallinnuksesta.</p> <p>Teknologinen edistyminen tietokone- ja 3D-tulostusteknologiassa, niiden yleistymisen ja halpeneminen, on mahdollistanut harrastustason tulostamisen kotioloissa ja ammattitason tulostamisen esimerkiksi auto-, lentoteollisuudelle sekä terveydenhuollolle. Tämä avaa uusia luovia käyttötarkoituksia 3D-tulostukselle.</p> <p>Projektissa luotiin digitaalinen veistos Sculptris-muotoiluohjelmalla, ja työ tulostettiin muovista oppilaitoksen omalla 3D-tulostimella. Työnkulku, ongelmat, mahdollisuudet, ja mietteet dokumentoitiin, ja ne sisällyttiin lopulliseen arviointiin. Tulostetussa patsaassa ilmeni jonkin verran virheitä tulostusprosessin teknisten ongelmien vuoksi, mutta patsas oli muilta osin onnistunut.</p> <p>Digitaalinen muotoilu- ja 3D-tulostustekniikka luovat uusia mahdollisuuksia taiteen tuottamiseen ja voivat olla apuna taiteilijoille varsinkin töiden suunnittelussa ja metallivalutöissä. Ammattikäyttöön tarkoitetut nopeat ja tarkat tulostimet ovat vielä liian kalliita, mutta niiden käyttö taiteen tuottamisessa varmasti lisääntyy lähitulevaisuudessa.</p>	
Avainsanat	3D, tulostus, muotoilu, taide

Author Title	Jussi Hautaniemi Digital sculpting and 3d-printing in art creation
Number of Pages Date	45 pages 4 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Media Technology
Specialisation option	Graphic Technology
Instructor	Antti Laiho, Senior Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to research the possibilities and practicality of using 3D sculpting and printing in art creation. A sculptor specialized in metal casting took part in the usability testing that was carried out.</p> <p>Technological advancement in computer and 3D printing technologies, their availability and declining price has made recreational printing at home a possibility as well as professional printing for car, aviation, and medical industries. This opens up new creative uses for 3D printing.</p> <p>A digital sculpture was created using the Sculptris software, and it was then printed in plastic with a 3D printer. The workflow, problems, possibilities and thoughts were documented and included in the final evaluation. Technical problems in the printing process caused some errors in the sculpture, but otherwise it was a success.</p> <p>Digital sculpting and the 3D printing technology create new possibilities for creating art, and can be helpful for artists in their designing process and casting in particular. At this moment, the machines that produce professional quality prints are too expensive; however, their use in art creation will undoubtedly increase in the near future.</p>	
Keywords	3D, print, sculpt, art

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Veistäminen	2
2.1	Kasvojen muotoilu savesta	3
2.2	Perinteisen ja digitaalisen työstämisen eroja	7
2.3	Digitaalinen veistos	9
2.4	Digitaalinen muovaustyökalu ja 3D-ohjelma	10
2.5	Esimerkkejä sculpting-taiteesta	12
3	Projektin harjoitusveistos	15
3.1	Muotoilutyökalu	16
3.2	Spock-hahmon luonti	19
3.3	Shapeways-palvelun testaus	24
4	3D-tulostus ja -tulostimet	27
4.1	Projektin 3D-tulostin	29
4.2	Harjoitustyön tulostus	30
4.3	Tulokset	34
4.4	Tekniikan hyödyllisyys kuvanveistäjälle	39
4.5	Projektissa mukana olleen taiteilijan ajatuksia	40
5	Yhteenveto	41
	Lähteet	43

1 Johdanto

Yleistyvien tulostimien ja digitaalisten veisto- ja 3D-mallinnusohjelmien avulla itsetehdyt käytännön esineet ja taideteokset ovat saaneet uusia toteutusmuotoja. Insinööriyön tarkoitus on tutkia, miten digitaalinen muovaustyökalu ja 3D-tulostaminen soveltuvat taiteen tuottamiseen.

Vaikka stereolitografia, eli SLA-tekniikka, keksittiin vuonna 1983 ja ensimmäinen SLA-3D-tulostin valmistettiin vuonna 1986, alkavat 3D-tulostimet yleistyä toden teolla vasta nyt. Ehkä suurin askel on, että ne alkavat yleistyä kodeissa, jolloin ihmiset saavat työkalut omien luovien ideoidensa toteuttamiseen [1].

Vuoden 2014 helmikuussa monet 3D-tulostustekniikoiden patentit vanhenivat, kuten lasersintraus, ja markkinat avautuivat kilpailulle [2]. Suurin este on kuitenkin vielä laitteiden hinta, mutta kuten kaikessa teknologiassa, jolle on kysyntää, kilpailu kasvaa, tekniikka paranee ja hinnat laskevat. Lisäksi luovia ratkaisuja keksitään jatkuvasti ongelmiin, jotka ovat edistyksen tiellä. Tulostimet kehittyvät nopeasti, ja on rakennettu jo prototyyppisiä kotitulostimia, jotka tulostavat sähköä johtavaa materiaalia piirilevyjen rakentamiseen, sekä metallitulostimia, jotka muovifilamentin sijasta hitsaavat metallilankaa. [3; 4; 5.]

On jo nähtävissä paljon yritystä tuottaa kotikäyttöinen metallisinfraustulostin. Ongelmina ovat laitteen monimutkainen mekaniikka ja vaaralliset lämpötilat. Esimerkiksi alumiinin sulamislämpötila on 660 celsiusastetta [6].

3D-skannausteknologia kehittyi myös nopeasti, ja edistyneimmät laitteet kopioivat jo esineiden muodot, pinnankoostumukset ja värit melkein identtisesti. Tämä teknologia elää yhdessä 3D-tulostuksen kanssa, ja varmasti samanlainen laadunkasvu ja hintojen halpeneminen nähdään laitteiden yleistyessä kotikäytössä.

Insinööriyöprojektissa valitaan sopiva digitaalinen muotoiluohjelma, sen käyttöä harjoitellaan, ja sillä luodaan teos, joka lopulta tulostetaan Metropolia Ammattikorkeakoulun Form 1+ -3D-tulostimella. Myös kuvanveistäjä Raimo Jaatinen testaa muotoiluohjelmaa ja arvioi lopullista työtä.

2 Veistäminen

Englanninkielinen termi muovaamiselle on "sculpt", joka tarkoittaa veistämistä, mallintamista, muotoilua ja manipulaatiota. Veistäminen on osuva käänös perinteisessä mielessä, mutta se ei kuvaa digitaalista muotoilua hyvin siitä syystä, ettei sculpting-työkaluilla veistetä materiaalia pois, vaan sitä muovataan.

Veistäminen on kolmiulotteisen kuvan rakentamista mistä tahansa materiaalista, jota voi muovata, veistää, muotittaa tai koota. Veistos voi olla myös kohokuvio tai kaiverrettu kuva, mikä on ehkä vanhin veistämistyyli [7, s. 6].

Veistoksia voi luoda joko lisäämällä (additiivinen) tai poistamalla (subtraktiivinen) materiaalia. Additiivisella tyylillä tarkoitetaan yleisesti työskentelyä saven, kipsin tai vahan kanssa. Subtraktiivinen veistäminen tarkoittaa veistoksen työstämistä esimerkiksi kivistä, puusta tai marmorista. Tämä on pitkälti yksisuuntainen tekniikka ja teknisesti vaikein. Virhettä ei yleensä voi korjata, ja siitä syystä taiteilijalta vaaditaan suurempaa kokemusta ja taitoa kuin additiivisessa tekniikassa. Lisäksi subtraktiivisen taiteen tekijältä vaaditaan tietoa materiaalien käyttäytymisestä, esimerkiksi puun kovuudesta, syiden suunnasta sekä kiven ja marmorin ominaisuuksista.

Metallivalussa muovataan malli vahasta tai vastaavasta Castable-materiaalista, jonka päälle kaadetaan erikoiskipsiä, joka on enimmäkseen kuumuudenkestävää kiviainesta, kuten tiilimurskaa. Noin neljännes aineesta on kipsiä. Kipsiä kuumennetaan siten, että se kovettuu, ja samalla sisällä oleva vaha-aines palaa pois. Tämän jälkeen muotti täytetään sulalla metallilla, kuten pronssilla, josta muodostuu itse veistos.

Maquette on hahmotelma taideteoksesta, ja se on usein tehty samasta tai samantyyppisestä materiaalista kuin lopullinen veistos. Sen idea on testata eri vaihtoehtoja alkuvaiheessa, jossa muutokset teokseen ovat vielä helppoja. Jos taideteos rakennetaan esimerkiksi hitsaamalla osia toisiinsa, tulisi maquette rakentaa samalla tekniikalla, jolloin mahdolliset ongelmat tulevat esille aikaisessa vaiheessa. [7, s. 43.]

Working model, eli lopullisen työn malli, on mittasuhteiltaan ja materiaaleiltaan identtinen taideteos pienemmässä, usein 1/4-koossa lopullisesta teoksesta. Se voi olla

hyvin käytännöllinen lopullisen työn havainnollistamisessa asiakkaille ja apuna rakentajille.

2.1 Kasvojen muotoilu savesta

Savea käytetään eniten ihmishahmon muotoilun opetteluun sen helppojen käsittelyominaisuuksien ja halvan hinnan takia. Kuvissa 1–3 näkyvät savimuotoilun eri vaiheet alusta loppuun.

Perinteisessä additiivisessa muotoilussa, tässä tapauksessa saviveistoksen teossa, tarvitaan usein teoksen muotojen säilymiseksi tukirankaa, joka voi olla mitä tahansa kestävästä materiaalista, usein metallia tai PVC-putkea, kunhan tukiranka on tarpeeksi jyrävä tarkoitusta varten. Taidekouluttaja saattaa esimerkiksi roikkua rangassa omalla painollaan testatakseen sen tukevuutta [7, s. 54]. Kuvassa 1 näkyy PVC-putkista ja styroksista valmistettu tukiranka, jonka päälle rakennetaan savesta pään perusmuodot. Koko rakennelma on pyörivän alustan päällä työskentelyn helpottamiseksi.



Kuva 1. Tukirangan rakentaminen ja pään muodon muovaaminen.

Arvioilta 90 % veistosten muotoilusta tapahtuu käsin. Kädet ovatkin taiteilijan tärkein työkalu. Työvälineitä käytetään enemmän sellaisten muotojen luomiseen, mihin kädet eivät sovellu hyvin, kuten pyöreät kuopat, terävät reunat, sisennykset, tasaiset pinnat, leikkaukset ja yksityiskohdat. [8.]

Kuvassa 2 taiteilija arvioi, että teoksen leuka ulottuu liian kauas, ja leikkaa lohkon pois leuan alapuolelta tuodakseen leukaa ja suuta taaksepäin. Tällä menetelmällä leukaa ja

huulia ei tarvitse muotoilla uudelleen. Kuvassa teos on jo miltei valmis, ja työvälineet vaihtuvat aina vain tarkempiin ja muistuttavat jo hammaslääkärin tai kirurgin työvälineitä. Hammaslääkärin työvälineet ovatkin suosiossa varsinkin pienten veistosten muotoilussa.



Kuva 2. Kasvojen suhteiden muokkausta ja yksityiskohtien luomista.

Kuvassa 3 taiteilija kastelee kätensä saadakseen saveen tasaisen pinnan. Heijastava pinta auttaa myös näkemaan epätasaisuudet. Lopuksi saveen pintaa kuumennetaan pehmeäksi, jotta siihen saadaan painettua ihoa muistuttava rakenne [9].



Kuva 3. Pintojen siloitus ja ihon jäljentäminen.

Veistämisen perustyökaluihin kuuluvat veitsi ja vaijeri saveen leikkaamiseen, metallinen ja kuminen lasta raapimiseen ja tasoittamiseen, kaulin, muovaustyökalut, suihkepullo,

materiaalia teoksen peittämiseen, kuten sanomalehtiä tai muoviovia, ja puhdistusvälineet työpisteen siivoamiseen. [13, s. 17.]

Kuvissa 4 ja 5 on puisia saven ja metallisia vahan työstämiseen tarkoitettuja työvälineitä. Ne on tarkoitettu muotoiluun ja yksityiskohtien luomiseen [11; 12].



Kuva 4. Puisia saven muovaustyökaluja [11].



Kuva 5. Metallisia vahatyökaluja [12].

Muotoilutyökaluja on saatavilla moniin eri tarkoituksiin ja materiaaleihin: kuumennettavat työkalut vahalle, hiontatyökalut kipsille ja vahalle, silikonikärkiset piirtokynät, hammaslääkärin välineet, palettiveitset, leikkaustyökalut, haravatyökalut, porat, kaivertimet, tekstuurityökalut, pursuttimet, mittatyökalut, hiomakivet, viilat ja harjat. Osa työkaluista on hyvin erikoistuneita, esimerkiksi nuken valmistukseen tarkoitettut välineet [9].

2.2 Perinteisen ja digitaalisen työstämisen eroja

Perinteissä muotoilussa on se etu, että työssä voi käyttää näkö- ja tuntoaistia. Työstettävän pinnan aistiminen koskemalla on yllättävän tarkka apu veistämässä. Koneella muotoiltaessa näkö on ainoa keino tutkia kappaletta, mutta apuna ovat kuitenkin ohjelman omat työkalut helpottamassa yhden aistin työskentelyä. Työkaluilla saa tehtyä esimerkiksi täysin tasaisen pinnan tai pyöristykseen sekä erilaiset valo-olosuhteet luomaan varjoja ja kontrastia.

Digitaalisessa muotoilussa ja tulostuksessa koon skaalattavuus on etu, sekä se, että teoksen materiaalivahvuuksia ei yleensä tarvitse huomioida, sillä ne pitävät muotonsa ilman tukirankoja. Useimmat tulostettavat materiaalit ovat kestäviä pienemmissäkin vahvuuksissa. Poikkeuksena on CNC-jyrsitty puu, jossa vahvuudet ja puun syitten suunta on otettava huomioon, sekä muovifilamenttitulostus, joka jäähtyy hitaammin ja saattaa taipua tulostettaessa.

Savea pitää usein alustaa ilmataskujen poistamiseksi, saveen sekoittamiseksi ja kosteuden tasaamiseksi. Tämä tehdään vaivaamalla sitä kuin taikinaa, mikä ajaa saman asian eli materiaalien sekoituksen. Uudelleenkäytetyn materiaalin kanssa tulee tarkistaa, ettei siinä ole seassa vierasta ainesta, joka voisi vaikuttaa lopputulokseen. Tällainen virhe lopullisessa työssä voi olla hyvin häiritsevä, vaikka se olisi kuinka pieni. Virheet savessa voivat aiheuttaa myös halkeilua työtä poltettaessa. [13, s. 14.] Digitaalisessa tulostuksessa vastaavat toimenpiteet ovat työn eheyden tarkistaminen muotoilu- tai 3D-ohjelmassa sekä tulostusmateriaalin puhtaus, varsinkin nesteissä.

Työstettävä savi on koostumukseltaan erilaista riipuen lämpötilasta ja kosteudesta. Saveen yhdelle koostumukselle on annettu nimi "leather-hard" eli nahankova, jossa sen on annettu kovettua juustomaiseksi. Tämä koostumus sopii hyvin kulmikkaiden ja geometrinen muotojen luomiseen. [13, s. 28.] Veistoksen muokattavuuteen vaikuttavat myös sen eri savikerroksien ominaisuudet. Nämä ovat kaikki tekijöitä, jotka on hyvä ottaa huomioon, ja näitä ominaisuuksia varten on luotu omat työstämistekniikat, joista osa ilmeni kuvien 1–3 esimerkistä. Tässä suhteessa digitaalinen muotoilu on hyvin yksiolotteista, sillä objektin käyttäytyminen riippuu täysin työkalun asetuksista.

Tarkasti jäljennetty ihmishahmo, tai tämän opinnäytetyön tapauksessa muotokuva fiktiivisestä hahmosta, on hyvä harjoitustyö. Tosin sellainen kyseenalaistetaan

veistoksena, sillä siitä puuttuu taiteilijan oma näkemys. Taideteos vaatii tulkintaa, jotta siihen muodostuu vaikuttavia piirteitä. Taiteilijan herkkyys, näppäryys ja taidot työstää materiaalia luovat ainutlaatuisen kannanoton. Jopa taiteilijan etnisyys usein vaikuttaa teokseen. Helposti muovattavissa materiaaleissa, kuten savessa, taiteilijan tärkein työkalu on hänen kätensä, ja monet taiteilijat painattavatkin sormenjälkensä lopulliseen työhön. Taiteilijoilla on myös tapana mukauttaa työvälineensä siten, että ne jättävät persoonallisen jäljen tai kuvion veistokseen. [7, s. 35.]

Digitaalisissa muovaustyökaluissa on myös mahdollista luoda henkilökohtainen tekstuurikuvio, joka muistuttaa mukautettua työkalua mutta jonka käyttömahdollisuudet eivät ole yhtä laajat kuin fyysisellä työkalulla.

Onko tietokoneella tehty veistos sitten taidetta? Onko ruudulla näkyvä kolmiulotteinen esine veistos? Veistos ymmärretään kuitenkin fyysisenä tuotoksena, johon voi iskeä varpaansa pimeässä. Ei kuitenkaan ole väliä millä tekniikalla teos on tehty, kunhan se pysäyttää katsojan ja herättää tunteita. Onnistunut taide herättää vahvoja tunteita suuntaan tai toiseen. Epäonnistunut taide ei herätä katsojan kiinnostusta. Kuvassa 6 näkyvä taideteos on myyty 45 000 dollarilla sveitsiläiselle keräilijälle. Onnistunutta taidetta [14].



Kuva 6. Ulosteeesta muovattu Venus de Milo [14].

2.3 Digitaalinen veistos

Tietokoneella muovattuja veistoksia voi tulostaa eri materiaaleihin, kuten muoviin, kiveen, lasiin ja metalliin, mutta niiden tekeminen vaatii tekijältä hyvin vähän tietoa materiaalien ominaisuuksista, kun taas klassisessa veistämässä on tärkeää tuntea materiaalien käyttäytyminen ja soveltuvuus työhön. Tässä voisi verrata elektronista musiikkia klassiseen, David Guettaa Bachiin. Molemmat ovat tuottaneet musiikkia, ja molemmilla on oma yleisönsä.

3D-tulostettu muotokuva tai taideteos voi olla upea. Se voi olla esimerkiksi muovia tai karkeaa kiveä, ja kuten on sanottu, tekniikka ei tee taidetta, vaan työn arvostus. Se, missä perinteinen taide eroaa digitaalisesta, on taustatyö ja taiteilijan käden jälki työstetyssä materiaalissa. Perinteinen taideteos on käsintehty, sitä saa materiaaleissa, joihin kone ei pysty, ja se on usein uniikki.

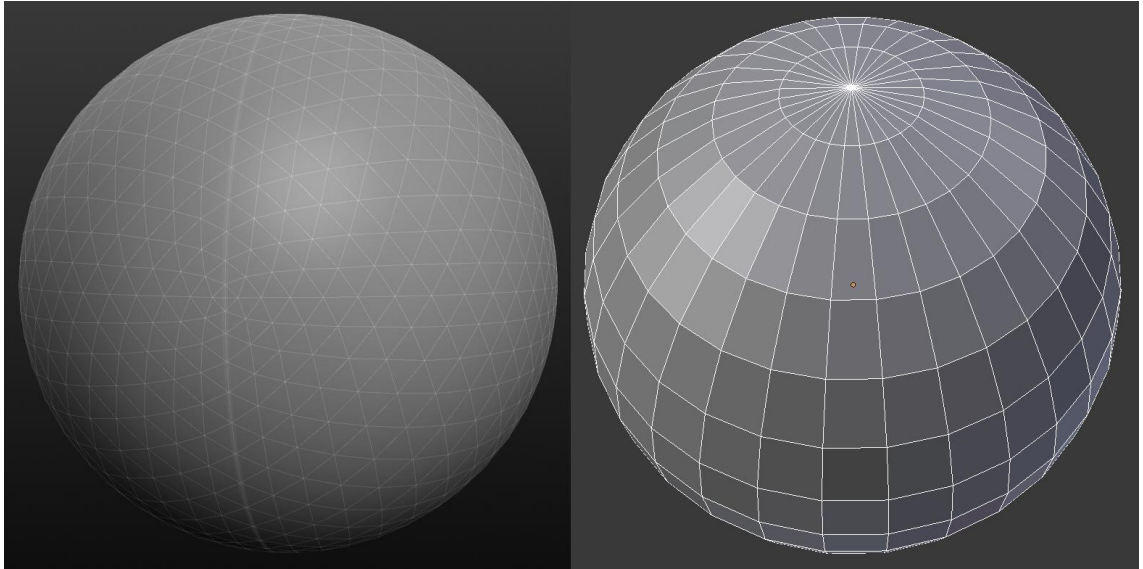
2.4 Digitaalinen muovaustyökalu ja 3D-ohjelma

Digitaalisen muovaustyökalun oleellisuus tässä työssä johtuu sen toimintatavasta, joka muistuttaa läheisesti tekniikkaa, jolla oikeat saviveistokset luodaan, eli muovaamalla materiaalia. 3D-ohjelmassa luodaan objektit verteksejä, särmiä tai pintoja muokkaamalla, ja siinä asetetaan objektien vaikutus toisiinsa sekä toiminnallisuus. Muovaustyökalulla saadaan esimerkiksi luotua helposti ihmishahmolle kasvojen yksityiskohdat ja vaatetuksen poimutukset. 3D-ohjelma mahdollistaa ihmishahmon liikuttamisen ja animoinnin.

Muovaustyökaluissa ja 3D:ssä on päällekkäisyyksiä, mutta niiden vahvuudet erottavat ne selvästi toisistaan. 3D-ohjelmiin on olemassa liitännäisiä, jotka mahdollistavat muotoilemisen, mutta ne eivät usein ole yhtä hyviä. Ohjelmat onkin rakennettu pääosin yhteensopiviksi toistensa kanssa, ja muutamat valmistajat ovat yhdistäneet kummatkin puolet yhteen ohjelmistoon, kuten Cinema 4D, mutta niiden suosio ei ole saavuttanut erikoistuneiden työkalujen tasoa.

Muotoilutyökalu soveltuu parhaiten orgaanisten muotojen luomiseen, mikä on 3D-ohjelmilla huomattavasti työläämpää. 3D-ohjelmat taas toimivat parhaiten kulmikkaiden, suoraviivaisten asioiden ja esineiden luomiseen box-modeling-tekniikalla. Syy miksi 3D-ohjelmat eivät sovellu hyvin muotoilutyökalun tapaiseen manipulatioon, on alla oleva tekniikka, jolle geometria muodostuu. Muovaustyökaluissa, kuten Zbrushissa ja Sculptriksessa, muokattava objekti muodostuu kolmion muotoisista polygoneista, joita ohjelma muuntaa uudelleen pienempiin kolmioihin dynaamisesti aina, kun tarkkuutta tarvitaan lisää, esimerkiksi yksityiskohtia tehtäessä. Kolmiot vaikuttavat toisiinsa ja muovautuvat verkkomaisesti. 3D-ohjelmissa vastaava pallo-objekti muodostuu neliön muotoisista polygoneista, jolloin pallon vastakkaisille navoille muodostuvat kiintopisteet, joihin neliöiden reunat yhdistyvät. Tämä polygonimalli on vaikeampi muotoilla, sillä neliöiden koko ja muoto vaihtelevat riippuen siitä, miten kaukana muokattava kohta on navoista. 3D-ohjelma ei

myöskään generoi lisää polygoneja tarvittaessa, vaan ne pitää luoda manuaalisesti. 3D-ohjelmissa polygonit eivät varsinaisesti muokkaudu pehmeästi, vaan muokattavat verteksit, särmät ja pinnat valitaan ja niitä manipuloitaessa ympäröivät verteksit eivät muutu. Kuvassa 7 näkyy vertailu muotoilu- ja 3D-ohjelman polygoneista pallonmuotoisilla objekteilla.



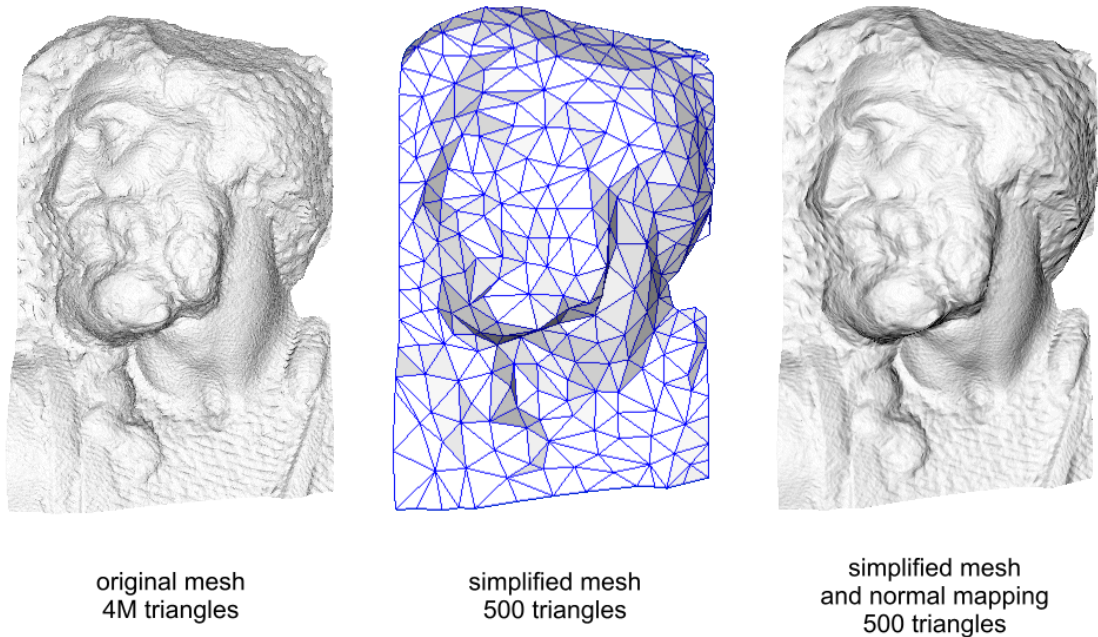
Kuva 7. Vasemmalla Sculptriksen kolmioista ja oikealla Blenderin nelikulmioista muodostuva "mesh" eli verkko. Huomaa erot kiintopisteissä.

Koska tässä työssä testataan tekniikan käytettävyyttä muotokuvatyyppisen orgaanisen taiteen luomisessa, soveltuu muotoiluun erikoistunut ohjelma tähän parhaiten.

Tavallisesti esimerkiksi pelitarkoitukseen käytettävän hahmon perusmuoto luodaan karkeasti 3D-ohjelmassa, minkä jälkeen se tuodaan muotoiluohjelmaan orgaanisten muotojen ja yksityiskohtien lisäämiseksi. Tämän jälkeen yksityiskohtaisesta hahmosta, jossa on nyt liikaa polygoneja, leivotaan normal map, kaksikulotteinen tekstuuri, joka antaa illusion pinnan monimutkaisesta geometriasta, mutta joka on koneelle vaivaton renderöidä. Yksityiskohtaisesta mallista muodostetaan tämän jälkeen 3D-ohjelmassa kevyempi versio, jossa polygonien määrä on pienempi. Lopuksi normal map liitetään kevyeen malliin, jolloin siihen saadaan yksityiskohdat esille ilman suurta tietokoneen prosessointikuormaa.

Kuvan 8 vasemmalla puolella on alkuperäinen digitaalinen veistos, keskellä matalapolygoninen ja oikealla puolella matalapolygoninen normal mapin kanssa. Viimeisessä versiossa on 8 000 kertaa vähemmän polygoneja, mutta siinä ei ole silmin

havaittavia eroja alkuperäiseen verrattuna. Tämä pienentää koneen prosessointikuormaa huomattavasti. [15.]



Kuva 8. Alkuperäinen veistos verrattuna yksinkertaistettuun malliin, johon on lisätty normal map [15].

Tässä projektissa tuotosta ei tulla käyttämään video- tai pelitarkoitukseen, eikä normal map tule esille tulostettaessa, joten kaikkien yksityiskohtien tulisi jäädä geometriaan.

2.5 Esimerkkejä sculpting-taiteesta

Digitaalisen 3D-mallintamisen asiantuntija Dan Hughes McGrail on tehnyt Masters-näyttötyönsä samantyyppisestä aiheesta, jossa hän tutki, miten klassisen veistämisen taitoja voi soveltaa digitaalisessa taiteen tuottamisessa mallintamalla näyttelijä Patrick Stewartin muotokuvan ZBrush-muotoiluohjelmalla. [16.] Kuvassa 9 valmis muotokuva on tulostettu valkoiseen muoviin.



Kuva 9. Patrick Stewart tutkimassa omaa muotokuvaansa [16].

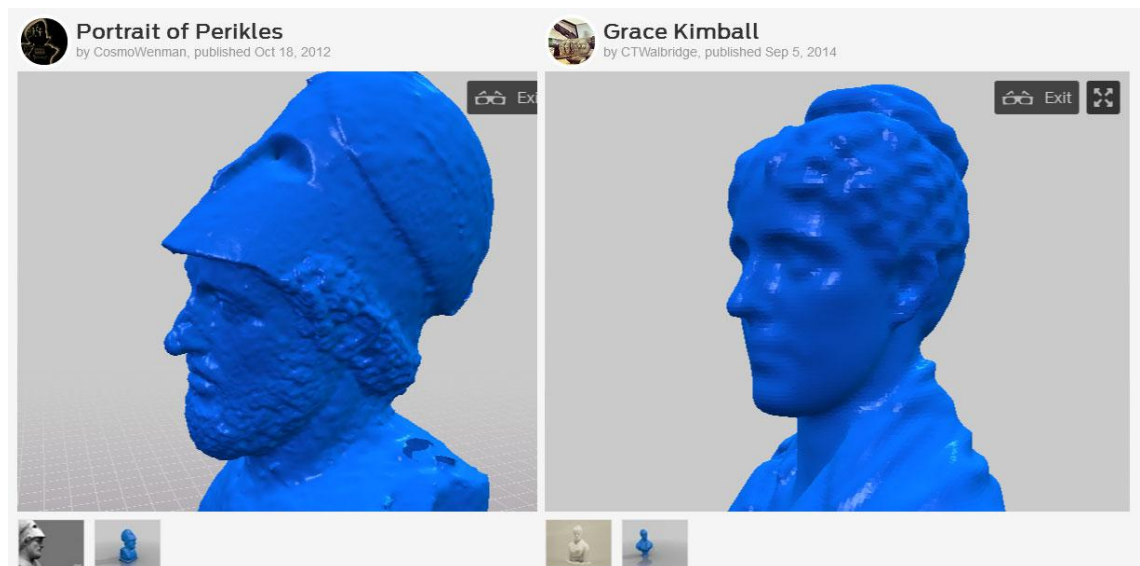
McGrail [16] huomasi, että monet veistoksenluonnin periaatteet toimivat myös digitaalisessa ympäristössä, ja hän on antanut perusohjeita digitaalisen muotokuvan tekemiseen blogissaan. Tässä muutamia otteita:

- Työ pitäisi aloittaa veistämällä pääpiirteiset muodot ensin, ja ZBrushissa tämä tarkoittaa meshin pitämistä mahdollisimman matalaresoluutioisena, ennen kuin lähtee jakamaan sitä pienempiin (yksityiskohtaisempiin) osiin.
- Työn valo-olosuhteita tulisi muuttaa, ja veistosta tulisi tutkia eri suunnista, jotta varjot tuovat esille asioita, joita muuten ei välttämättä huomaisi.
- Pintoja tulisi tasoitella jatkuvasti muotoja työstäessä.
- Muovaamiseen tulisi käyttää aluksi isoja työkaluja, jolloin ei takerru tekemään yksityiskohtia, ennen kuin pääpiirteet ovat valmiita.
- Tulisi välttää tekemästä yhtä osaa valmiiksi ennen muita, jotta osat sulautuvat lopuksi toisiinsa ja työ näyttää yhtenäiseltä.

- Referenssimateriaalia, kuten muotokuvia mallinettavasta kohteesta, on hyvä pitää koko ajan esillä. [17.]

Thingiverse.com on 3D-taideyhteisö, johon ihmiset voivat tuoda tekemiään 3D-tuotoksia muille näytettäväksi ja jaettavaksi ilmaiseksi. Sivustolla on osio myös patsaille. Suuri osa veistoksista on tosin museoista skannattuja teoksia.

Kuvan 10 vasemmalla puolella on Lontoon British Museumista Autodesk 123D -laitteella skannattu veistos. Oikealla puolella on Minneapolis Institute of Arts -museosta Sense 3D-skannerilla tallennettu teos. [18.] Halvemmillä laitteilla tehdyt skannaukset tunnistaa epätasaisista tai rikkiäisistä pinnoista ja yksityiskohtien puuttumisesta.



Kuva 10. Skannattuja taideteoksia [18].

Shapeways.com on johtava 3D-tulostuksen markkinapaikka ja yhteisö, jossa ihmiset voivat muuttaa taiteensa ja ideansa tuotteiksi. Ihmiset voivat myydä ja ostaa, jakaa ideoita ja saada palautetta töistensä. Kuvassa 11 näkyy esimerkki 3D-taiteesta, jota saa ostettua kopioina erilaisin materiaali- ja väri vaihtoehdoin.



Kuva 11. Tulostettu muovinen naishahmo [18].

Kuvan 11 hahmon saa myös mustana, muovin ja metallin sekoituksena sekä läpikuultavasta muovista tehtynä. Hinta vaihtelee materiaalista riippuen 90:n ja 185 dollarin välillä [19].

Ihmiset voivat myydä sivustolla suunnittelemaansa koruja, hyötyesineitä, taideteoksia, memejä jäljennöksiä ynnä muuta. Ostettuaan tuotteen asiakas saa tulostetun tai valetun kopion kotiin lähetettynä. Shapeways tarjoaa myös tulostuspalvelua käyttäjilleen, ja tätä mahdollisuutta tutkitaan tässä opinnäytetyössä.

3 Projektin harjoitusveistos

Insinöörityöprojektin harjoitusveistokseksi oli tarkoitus jäljentää jokin tunnettu teos tai suunnitella oma veistos. Veistokseksi valittiin patsas Leonard Nimoy'n Spock-hahmosta, joka oli yksi päähenkilöistä alkuperäisessä Star Trek -televisiosarjassa. Kuvassa 12 ovat tärkeimpinä referensseinä käytetyt neljä kuvaa, joista näkee hahmon profiilin edestä ja sivusta. Mitä enemmän kuvia on, sitä paremmin hahmottuvat jäljennettävät kasvonmuodot.



Kuva 12. Referenssikuvat Star Trekin Spock-hahmosta.

Pään muoto perustuu sen kovaan anatomiaan, varsinkin luustoon, ja rakenne on tie yhdennäköisyyteen. Näköispatsaan luomisessa on hyvä keskittyä pään rakenteen luisiin kohtiin, kuten otsaan, takaraivoon, poskipäihin, korvien taustoihin, nenänkaareen ja ylähampaisiin. Nämä ovat kaikki kiinteitä kohtia, jotka eivät liiku henkilön puhuessa. Tästä syystä onkin hyödyllistä nähdä mallinnettava kohde liikkeessä, esimerkiksi videolta. [7, s. 68.]

3.1 Muotoilutyökalu

Muotoilutyökaluksi valittiin Pixologic Sculptris, joka on kevyempi lisenssivapaa ilmaisversio saman valmistajan ZBrushista. Vaikka Sculptris ei sisällä kaikkia ZBrushin työkaluja, sen perustoiminnot riittävät täysin veistoksen luomiseen. ZBrush on yksi suosituimmista muotoilutyökaluista, ja sitä käytetään peli- ja elokuvateollisuudessa. ZBrushia voisi kutsua teollisuusstandardiksi. Muissa vaihtoehdoissa, kuten Mudbox tai Curvy 3D, on tarjolla vain demo- tai 30 päivän versioita. Maksullisten muotoiluohjelmien hinnat vaihtelevat 3D coatin 380 dollarista ZBrushin 800 dollariin asti. [20.]

Kuvan 13 taulukossa näkyvät plus- ja miinussarakkeet. Plus tarkoittaa työkalun perustoimintoa ja miinus sen negatiivista toimintoa, jonka saa pitämällä Alt-näppäintä

pohjassa. Pinch- ja Flatten-työkaluilla on myös omat negatiiviset toimintonsa, mutta niille ei löytynyt mitään toimivaa tarkoitusta.



Kuva 13. Sculptrisin näkymä ja selitykset eri työkaluille.

Sculptris-ohjelman ensimmäinen työkaluryhmä sisältää muovaustyökalut, kääntämisen, skaalaamisen ja siirtämisen. Kääntäminen tehdään myös hiiren oikealla tai keskimmaisella napilla, sekä vasemmalla, jos painettaessa hiiri ei ole minkään objektin päällä. Siirtäminen tehdään pitämällä shiftiä ja hiiren keskimmäistä nappia samanaikaisesti pohjassa. On helpompaa ja nopeampaa työskennellä suoraan pikanäppäimillä sen jälkeen, kun ne ovat jääneet muistiin. F1 tuo pikanäppäinvalikon esille.

Crease- eli uurretyökalu tekee uurteita tai terävää saumaa. Sen negatiivista toimintoa käytettiin työssä paljon Pinchin sijasta, sillä se toimii myös tasaisilla pinnoilla.

Draw- eli piirtötyökalu tekee kohoumaa tai kuoppaa, mutta jättää lakensa tasaiseksi.

Inflate- eli täyttötyökalu muistuttaa piirtoa, mutta se pyöristää muodot.

Pinch- eli nipistystyökalu tekee terävää reunaa. Se vaatii toimiakseen jo jonkinlaisen kohouman, jota se nipistää. Se ei toimi tasaisella pinnalla. Tätä työkalua tuli käytettyä vähiten.

Flatten- eli tasaustyökalu tasoittaa pintaa siltä kaltevuudelta, jonka päällä sitä käytetään. Lock plane -toiminto lukitsee tason siten, että työkalu rakentaa tasaista pintaa samalle tasolle, jossa hiiren nappi painettiin pohjaan. Tällä työkalulla saa tehtyä kaikki tasaiset pinnat, kuten kuution seinämät.

Mallikappaleesta puuttuu vielä kaksi työkalua, Smooth, joka pyöristää kohoumia ja reunoja kuten hiekkapaperi, sekä Grab, jolla saa venytettyä ja kasvatettua muotoja. Se toimii hyvin perusmuotojen tekemiseen, eikä se riko alla olevia yksityiskohtia, toisin kuin savikorjaukset. Tämän vuoksi esimerkiksi valmiin muotokuvan muotoja voi vielä muuttaa Grab-työkalulla muotokuvaa kuitenkin vahingoittamatta. Mallikappaleen (kuva 13) reunat on käsitelty Smooth-työkalulla. Sitä käytettiin tässä työssä kaikkiin viimeistelyihin ja muotojen hienosäätöihin.

Kuvan 13 keskimmaisessä työkalusarjassa ovat valinnat polygonien vähentämiseksi ja lisäämiseksi, maskivalinta, wireframe-näkymä ja symmetria.

Reduce brush on työkalu, jolla saa vähennettyä polygonien määrää tietyltä alueelta ja tietyllä vahvuudella. Se on tärkeä työkalu, sillä polygonien määrä kasvaa työkalujen vaikutuksesta aina, kun pintaa muokataan.

Reduce selected vähentää polygonien määrää koko valitussa kappaleessa. Tätä työkalua ei käytetty harjoitustyössä ollenkaan.

Subdivide all muuntaa jokaisen polygonin, joka muodostuu kolmiosta, neljäksi kolmioksi, eli se nelinkertaistaa polygonien määrän jokaisella painalluksella.

Symmetry laittaa symmetrian päälle ja pois. Jos symmetria on pois päältä ja sen kytkee päälle, Sculptris peilaa objektin oikean puoliskon myös vasemmalle poistaen sieltä kaikki muutokset. Symmetria kannattaakin ottaa tarvittaessa pois päältä vasta, kun on varma, ettei tarvitse sitä enää. On myös huomioitava, että jos tuo teoksen 3D-ohjelmasta Sculptrisiin, siitä on automaattisesti kytketty symmetria pois päältä. Se tosin toimii hyvin tilanteissa, joissa jo symmetrinen teos on viety 3D-ohjelmaan korjattavaksi ja tuodaan sieltä takaisin. Silloin symmetrian voi kytkeä takaisin huoletta.

Maskin maalaus tehdään painamalla Ctrl-nappi pohjaan ja maalaamalla millä tahansa muovaustyökalulla aluetta. Maskilla voi valita alueen, jota ei aiota muokata, tai kun maski on valittuna, painaa ctrl-napin pohjaan ja painaa kerran hiiren vasenta nappia objektin ulkopuolella, jolloin maski vaihtuu negatiiviseksi värjäten kaiken muun paitsi maalatun alueen, jolloin tuota aluetta voi muokata. Maskin voi hävittää pitämällä ctrl-nappia pohjassa, painamalla hiiren vasemman napin pohjaan ja vetämällä hiirtä alaspäin objektin ulkopuolella.

3.2 Spock-hahmon luonti

Malli ei vaatinut minkäänlaisia valmisteluja, muuta kuin oman hakemiston näyttötyömateriaalien alle tiedostojen selkeyttämiseksi. Silmien, suun ja korvien mallinnustekniikoita opeteltiin ZBrush- ja Sculptris-Youtube-videoiden avulla [21].

Kuvassa 14 alettiin hahmottaa pään muotoja Grab-työkalulla. Sen avulla muotoiltiin pääpiirteet, kuten kallon muoto, silmäkuopat, otsa, poskipäät, leuka ja nenä. Suun tekeminen oli tässä vaiheessa haastavinta, ja sen tekeminen vaati monen työkalun käyttöä. Lopuksi kallon pohjasta vedettiin grab-työkalulla kaula ja siitä taas olkapäiden

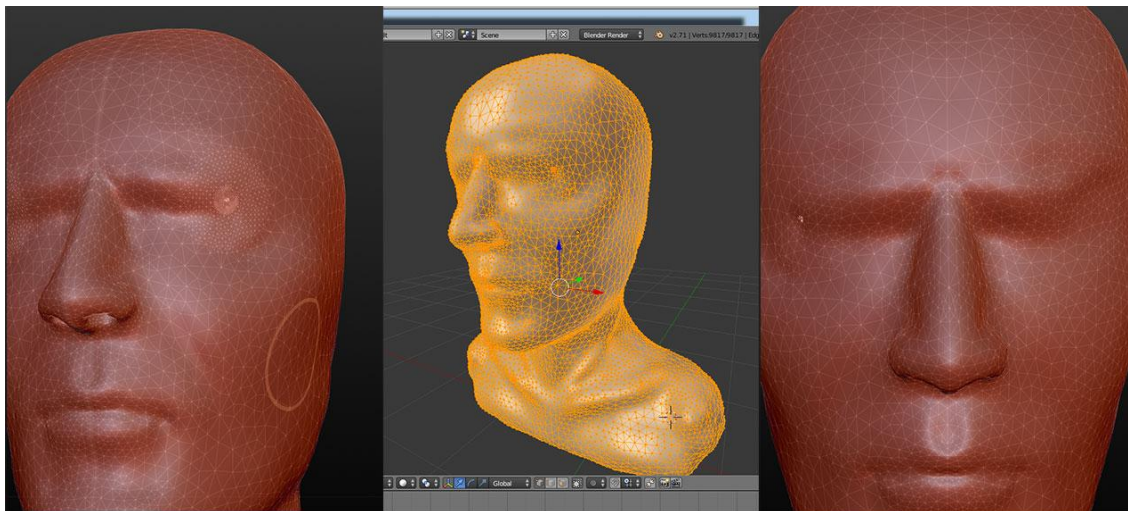
muodot. Polygonit pidettiin suurikokoisina reduce selected -työkalulla, ettei turhia yksityiskohtia luotaisi vielä. Sculptrisin vakiona oleva materiaaliväri on kuvassa näkyvä harmaa. Mitä lähempänä näkymä oli työstettävää kohtaa, sitä pienempiä polygoneja muotoilussa muodostui. Alussa on tästä syystä hyvä pitää näkymä sopivalla etäisyydellä tai vaihtoehtoisesti käyttää reduce selected -työkalua ajoittain.



Kuva 14. Pään perusmuotojen muovaamista.

Kuvan 15 vasemmanpuoleisen hahmon silmäkulmassa on geometrinen virhe, missä polygoneja oli päässyt asettumaan päällekkäin. Yleensä näissä tilanteissa virhe korjaantuu pienentämällä geometriaa siihen tarkoitetulla työkalulla, kunnes geometria oikenee. Tässä tapauksessa se ei ollut enää korjattavissa Sculptrisissa, ja hahmo vietiin Blenderiin korjattavaksi (kuvan 15 keskellä). Ohjelmat ovat keskenään yhteensopivia import/export-valinnalla. Molemmat käyttävät .obj-tiedostomuotoa.

Sculptrisissa hahmot on hyvä pitää muokausvaiheessa symmetrisinä, minkä vuoksi virhe on kopioitunut kummallekin puoliskolle. Blenderissä virhe tarvitsee korjata vain toiselta puolelta, sillä kun hahmo tuodaan takaisin Sculptrisiin, korjaus kopioituu toisellekin puolelle, kun symmetrian asettaa taas aktiiviseksi. Virhe piti tässä tapauksessa tosin korjata hahmoa edestä katsottaessa oikealta puolelta, jotta ehjä puoli kopioitui virheelliselle puolelle. Kuvan 15 oikeassa reunassa näkyy korjattu hahmo Sculptrisissa ennen symmetrian asettamista päälle. Virhe näkyy vielä hahmon toisessa silmäkulmassa. Materiaaliväri vaihdettiin punaiseen vahaan työskentelyn helpottamiseksi.



Kuva 15. Virheen korjaaminen Blenderissä.

Kuvassa 16 alettiin muodostaa silmiä ja tarkentaa nenää ja suuta. Huulien muodostaminen luontui jo niin hyvin, että ne voi pyyhkiä pois ja luoda paremmat tilalle. Harjoittelu alkoi myös kasvon uurteiden luomisessa. Keskimmäinen ja viimeinen kuva näyttivät hyviltä siinä suhteessa, mutta ne eivät jääneet tässä muodossa lopulliseen Spock-muotokuvaan.



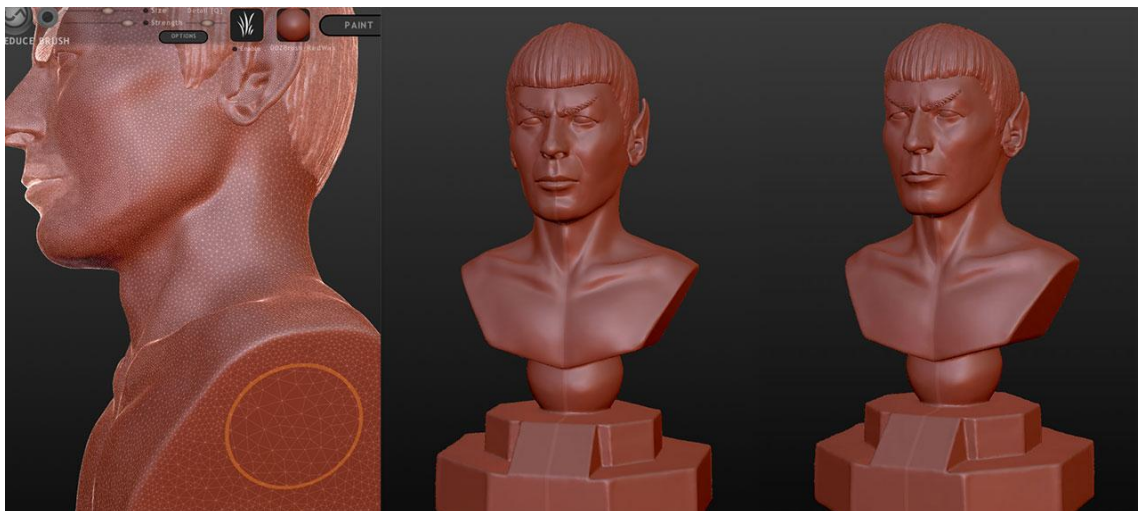
Kuva 16. Kasvonpiirteiden hienosäätöä.

Hahmon kasvonpiirteet alkoivat olla kunnossa, mistä siirryttiin luomaan hiukset, kulmakarvat ja korvat. Ne luotiin erillisinä objekteina, jotta osioita voisi muokata erikseen. Tämä helpotti työskentelyä huomattavasti. Lopuksi luotiin patsaan jalusta. Siitä tehtiin hieman futuristinen Star Trek -tyyliin sopivasti (kuva 17).



Kuva 17. Korvat, silmät ynnä muut lisättiin uusina objekteina.

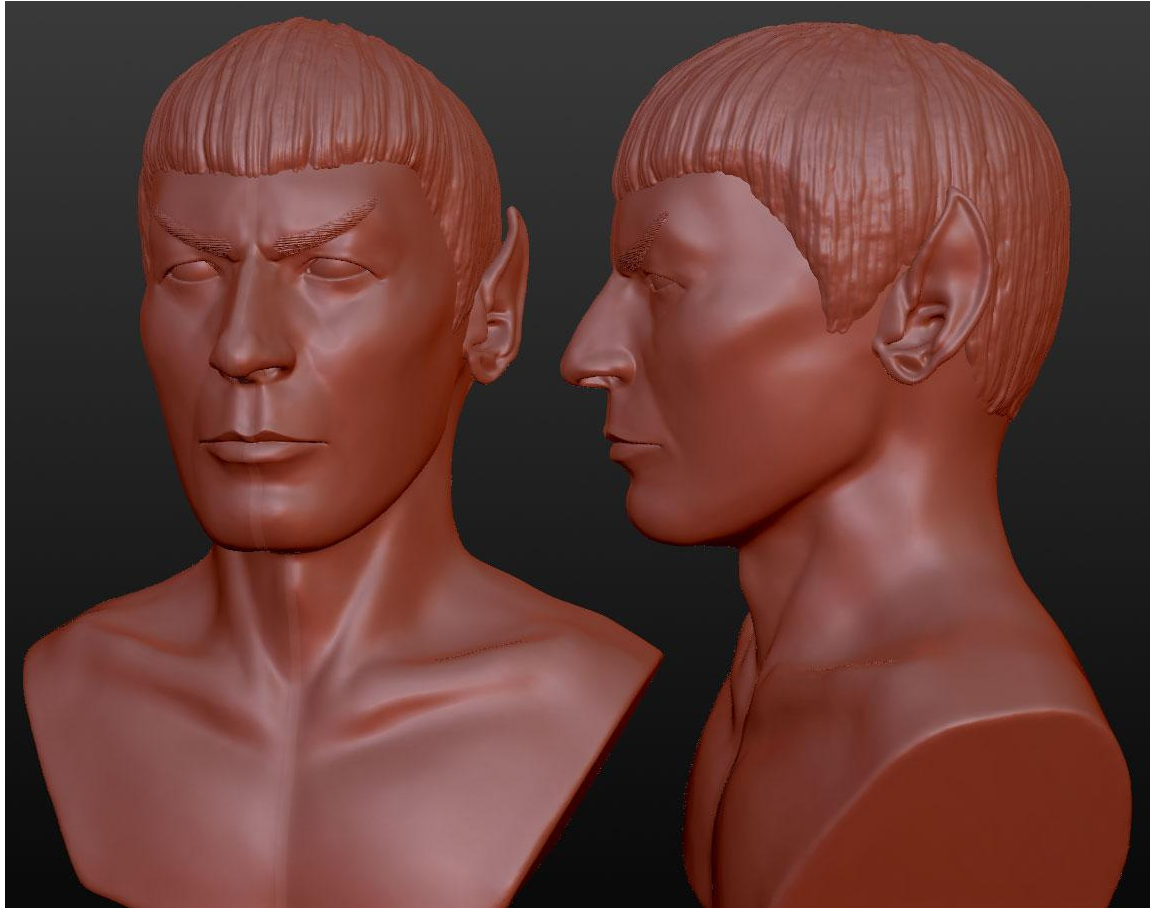
Kuvan 18 vasemmassa laidassa näkyvä keltainen regas on työkalu, jolla pienennetään geometrian tarkkuutta sellaisissa kohdissa, joissa tarkkuutta ei tarvita, kuten suorat pinnat. Polygonimäärä pyrittiin pitämään niin alhaalla kuin mahdollista, kuitenkin niin, ettei silmin havaittavia muutoksia geometriassa esiinny. Huulet, silmäluomet, korvat ja nenä olivat kaikki alueita, joissa polygonimäärä oli pidettävä suurena tarkkuuden ylläpitämiseksi. Malliin tehtiin vielä muutoksia huuliin ja otsaan. Erot ovat jo niin pieniä, että niitä on vaikea huomata. Kuvan 18 oikeanpuoleisen hahmon päälakea on laskettu alaspäin.



Kuva 18. Reduce brush -työkalun käyttöä ja mallin viimeisiä muokkauksia.

Kuvan 19 veistoksessa on polygoneja 848 648. Malli ei ole viimeisin, mutta tuntui muistuttavan eniten Nimoy'n Spock-hahmoa. Ajallisesti hahmon luomiseen meni aikaa

noin kolme viikkoa, koska työkalut ja hahmon luonnin tekniikat eivät olleet ennestään tuttuja. Uudestaan tehtynä työ sujui nykyisellä kokemuksella huomattavasti nopeammin.



Kuva 19. Valmis malli.

On vaikea sanoa, mikä työssä oli vaikeinta tai aikaavievintä. Moni asia oli vaikeaa ja hidasta vielä opetteluvaiheessa. Korvien, silmien ja huulien muotoileminen veivät todennäköisesti eniten aikaa. Hahmosta tallennettiin noin 60 eri versiota koko projektin aikana. Lopullisia versioita oli kaksi, joista oli vaikea valita suosikki. On hyvä olla varovainen tallennettaessa uudempia versioita, ettei kopioida aikaisempien versioiden päälle, sillä hahmoja tarkasteltaessa välillä hyviltäkin tuntuvat ratkaisut eivät aina ole toimivia. Tällöin versioita voi vertailla keskenään ja nähdä niiden eron, ja vasta sitten valita, mitä polkua pitkin jatkaa eteenpäin.

3.3 Shapeways-palvelun testaus

Shapewaysin tulostuspalvelu on sivuston design-osiossa, ja siihen pitää kirjautua sähköpostiosoitteella ja luoda omat tunnukset. Sivusto antaa ohjeet 3D-objektin luomiseen, ja sinne voi ladata esimerkiksi .obj-päätteisiä malleja, joita Sculptris luo. Ladattavan esineen kokorajoitus on 64 megatavua ja miljoona polygonia. Opinnäytetyötä varten tehty teos oli noin puolet enimmäiskoosta, 30 megatavua, mutta polygonimäärä oli lähellä miljoonan rajaa, 850 000 kolmiota.

Sculptrisin .obj-tiedostomuodossa ei ole määritelty esineen kokoa ollenkaan, mikä aiheuttaa ongelmia Shapewayssa. Teoksen osia, kuten korvat ja silmät, puuttui myös tuossa muodossa. Teos avattiin Blenderissä ja talletettiin .X3D (Extensible 3D) -muodossa, jossa teoksen sai asetettua sopivaan kokoon (korkeus noin 15 cm). Sivusto oli hiukan hidas lataamaan tämänkokoista työtä, sillä Shapeways tarkistaa työn eheyden ja mitat ladattaessa. Sivustolla on omat korjaustyökalut työn eheyttämiseksi tarvittaessa.

Sivustolle ladattiin kaksi eri versiota Spock-hahmosta. Kuvan 20 pudotusvalikosta näkee listan eri materiaalivaihtoehdoista. Jos veistosten korkeus olisi alle 89 mm, listaan ilmestyisivät lisäksi arvometallivaihtoehdot.

The screenshot shows the Shapeways website interface. At the top, there is a navigation bar with 'shapeways' logo, 'SHOP', 'DESIGN', and 'SELL' tabs, along with a search bar and a shopping cart icon. Below this is a secondary navigation bar with 'UPLOAD', 'How It Works', 'Get Started', 'My Models', 'Materials', 'Community', 'Tutorials', 'Blog', and 'Help' links.

The main content area is titled 'My Models'. It includes a 'Sort: Default' dropdown, a 'Show Unprintable Models' checkbox, and a 'Search My Models...' input field. A notification states: 'We migrated filters for managing your products to [Shop Inventory](#).'

Two model entries are visible:

Model Name	Material & Finish	Price	Qty	Actions
SpockV9	White Strong & Flexible	\$153.39	1	ADD TO CART
SpockV11	White Strong & Flexible	\$153.47	1	ADD TO CART

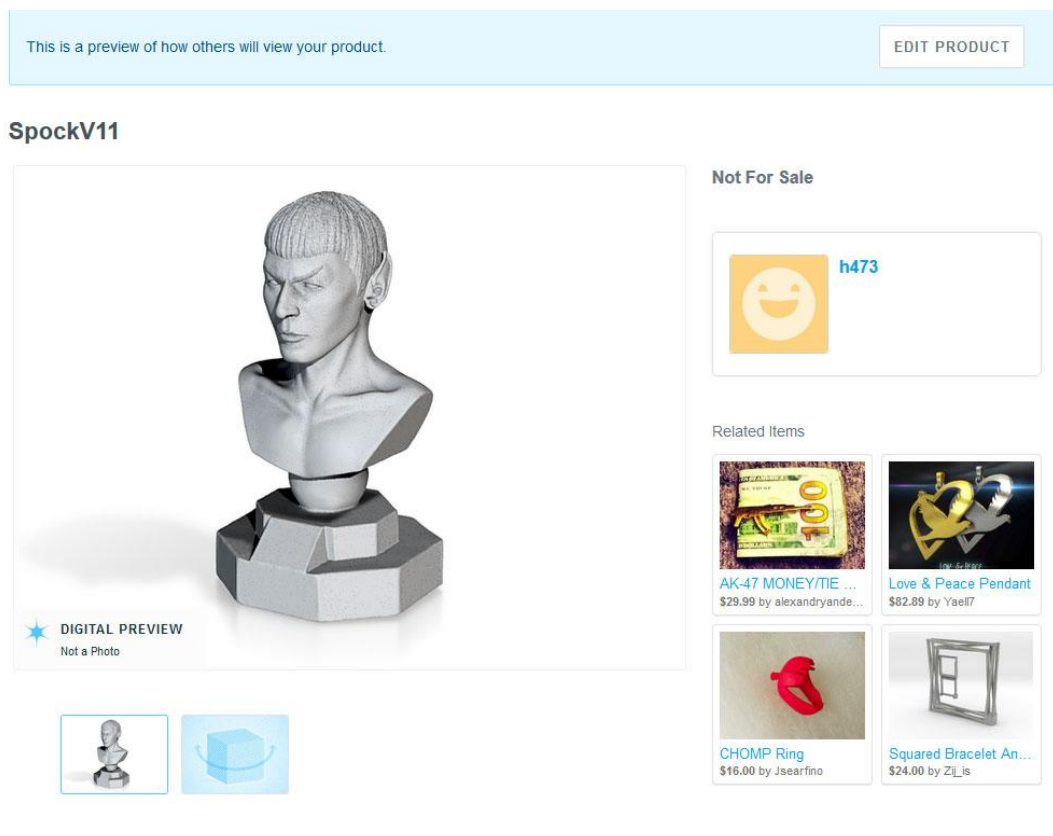
A dropdown menu for the material selection of SpockV11 is open, showing a list of materials including 'White Strong & Flexible', 'Blue Strong & Flexible Polished', 'Purple Strong & Flexible Polished', 'Frosted Ultra Detail', 'Frosted Detail', 'White Detail', 'Black Detail', 'Transparent Detail', 'Full Color Sandstone', 'Sandstone', 'Polished Grey Steel', 'Matte Black Steel', 'Polished Nickel Steel', 'Stainless Steel', 'Matte Gold Steel', 'Polished Gold Steel', 'Matte Bronze Steel', 'Polished Bronze Steel', 'Metallic Plastic', and 'Polished Metallic Plastic'.

At the bottom of the page, there is a sidebar with navigation links for 'DESIGN', 'SELL', and 'SHOP'. The 'DESIGN' section includes 'Getting Started', 'Materials', 'Hire a Designer', 'For Business', and 'Creator Apps'. The 'SELL' section includes 'Open a Shop', 'Developer API', 'Shop Tips & Tutorials', and 'Offer Design Services'. The 'SHOP' section includes 'Marketplace', 'Gift Guide', 'Beta Products', and 'Gift Cards'. There are also 'HELP' and 'COMPANY' sections with links like 'Help Center', 'Contact us', 'FAQs', 'Shipping Info', 'Material Status', 'About Us', 'Blog', 'Press', 'Careers', and 'Become a Partner'.

Kuva 20. Näkymä Shapeways -sivustolle ladatuista töistä [22].

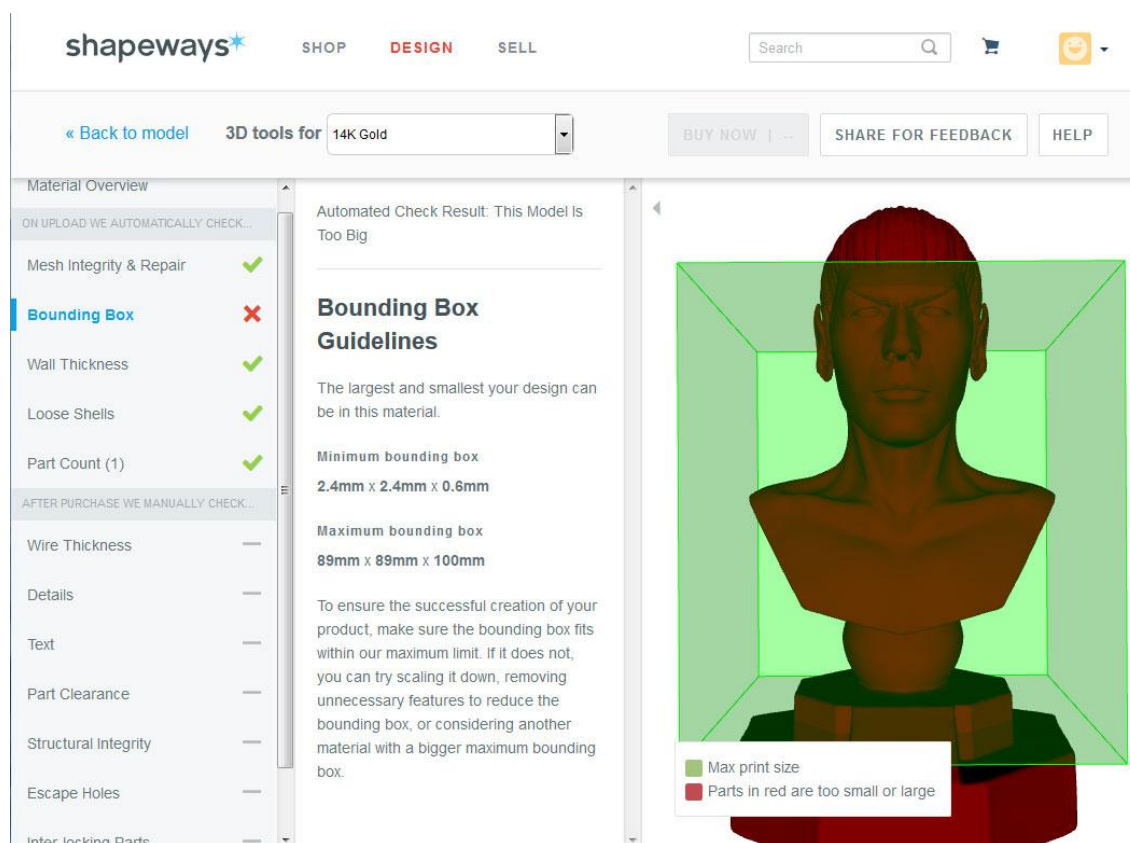
Sivulle ladattu 15 cm korkea veistos maksaisi 153 dollaria valkoisesta muovista tulostettuna, 213 dollaria hiekkakivenä ja 1 405 dollaria pronssipäällysteisenä teräksenä. Shapeways tarjoaa paljon materiaalivaihtoehtoja, joista kaikki teräksiset ovat suunnilleen samaa hintaluokkaa päällysteestä riippumatta. [22.]

Kuva 21 näyttää, millaisena muut sivuston käyttäjät näkisivät julkiseksi asetetun työn. Työ on kuitenkin asetettu yksityiseksi, eikä se ole esillä myytäväksi tai ladattavaksi [23].



Kuva 21. Esikatselu muiden vierailijoiden näkymästä [23].

Shapewaysin arvometalliteokset valmistetaan siten, että ensin työ tulostetaan vahasta, jonka päälle kaadetaan nestemäistä kipsiä. Vaha poltetaan pois kipsin sisältä, ja kipsi täytetään valitulla sulalla arvometallilla, esimerkiksi kullalla. Sivustolle ladatulle opinnäytetyön teokselle ei valitettavasti saatu hintaa esimerkiksi kullalle, koska se oli liian suuri arvometallivaihtoehdoille. Teoksen koon (Bounding box) tulisi olla enimmillään 89 mm x 89 mm x 100 mm. Nämä ovat todennäköisesti vahatulostimen enimmäismitat työlle. [24.] Kuvassa 22 automaattinen työn tarkistus antaa virheen bounding box -kohdassa.



Kuva 22. Ladattu veistos suhteutettuna arvometallityön maksimikokoon [24].

4 3D-tulostus ja -tulostimet

Keskeiset tulostustekniikat tämän tutkimuksen tarkoitukseen ovat FDM ja SLA eli muovilanka- ja ultraviolettitekniikat. Ne ovat edullisia ja soveltuvat kotikäyttöön. Laadukkaiden filamenttitulostimien hinnat alkavat noin viidestä sadasta eurosta, ultraviolettitulostin maksaa veroineen noin neljä tuhatta euroa. Tulostuksen laatu määrää pitkälti laitteen hinnan.

FDM eli Fused Deposition Modeling on suosituin ja edullisin tulostintekniikka, ja sitä käytetään enimmäkseen harrastusmielessä. Tuloste rakentuu sulattamalla muovilankaa kerroksittain. Laitteiden hinnat ovat laskeneet kahdesta tuhannesta dollarista kolmeen sataan muutaman vuoden aikana, minkä takia FDM:stä tuli eniten käytetty 3D-tulostin harrastuskäytössä [2]. Esine saattaa vääristyä hieman tulostettaessa, sillä sula muovi jähmettyy hitaammin kuin muissa tekniikoissa. FDM tukee monia eri filamenttimateriaaleja, kuten biohajoavaa PLA:ta ja ABS-muovia [25].

SLA eli Stereolithography käyttää ultraviolettisädettä kovettaakseen altaassa olevaa valoherkkää nestettä joko laserpisteellä tai DLP-projektorilla, joka heijastaa kaksiuolotteisen kuvan hartsiin, mikä nopeuttaa tulostusta huomattavasti ja mahdollistaa tarkemman resoluution [26]. SLA on kalliimpi käyttää kuin FDM, mikä johtuu hartsinesteen hinnasta. Projektissa käytetty Form 1+ -tulostin perustuu lasertekniikkaan.

SLS eli Selective Laser Sintering tarkoittaa sintrausta, jossa laser kuumentamalla muuntaa jauhemaisen materiaalin kiinteäksi (muovi, metalli, keramiikka, lasi). Metallisintrautulostimet ovat kalliita, ja niiden käyttötarkoitukset ovat teollisuudessa.

SLM eli Selective Laser Melting on sama kuin SLS, mutta tässä menetelmässä materiaali kuumennetaan sulamispisteeseen. Sintrauskoneiden hinnat ovat noin puolesta miljoonasta eurosta ylöspäin.

Objet (Polyjet) on kopiokonetyyppinen tulostin, jossa voi käyttää useita materiaalivärejä samanaikaisesti. Englantilaisissa sairaaloissa käytetään Objet 24- ja Objet 30 Pro -malleja potilaiden leikkausten suunnittelussa: esimerkiksi potilaan lonkkaluu voidaan tulostaa tekonivelen sovittamista varten [27]. Objet 24:n ja 30 Pron hinnat alkavat 19 000 dollarista [28].

3D Wax Printing on vahatulostus, josta saa valmistettua malleja eri metallien valamiselle, kuten arvometallit korujen valmistuksessa. Laitteet maksavat halvimmillaan noin 870 dollaria, ja hyvän tulostusresoluution (0,025 mm) koneet maksavat kuudesta tuhannesta dollarista ylöspäin [29].

CNC Router -jyrsin ei varsinaisesti ole tulostin, mutta se ansaitsee erityismaininnan siitä syystä, että se on ainoa keino valmistaa 3D-malleja puusta koneellisesti, ellei käytä puukuitufilamenttia, joka on sekoitus puukuitua ja esimerkiksi ABS-muovia.

On myös mahdollista rakentaa tulostin itse esimerkiksi kierrätetyistä PC-komponenteista, kuten CD-aseamista ja ohjelmoida laite itse. Tällöin hinnaksi tulee alle 100 euroa. Samalla voi oppia ohjelmointia. Instructables.com:ssa on ohjeet tulostimen rakentamiseksi askel kerrallaan [30].

4.1 Projektin 3D-tulostin

Kuvassa 23 on insinööriyöprojektissa käytetty Form 1+ -stereolitografiatulostin. Kone nostaa tulostettua työtä ylöspäin sitä mukaa, kuin laser kovettaa uuden kerroksen muovia valoherkässä hartsinesteessä. Laitteen oranssi kupu suodattaa ulkopuolisen valon ultraviolettisäteitä. [31.]



Kuva 23. Formlabsin Form 1+ -tulostin [31].

Koneen hartsimateriaaleissa on muutamia vaihtoehtoja eri käyttötarkoituksiin:

- muovi (Standard): väreinä valkoinen, harmaa, musta, läpinäkyvä
- valu (Castable): vahan tapainen materiaali, joka palaa puhtaasti poltettaessa, sopii esimerkiksi korujen valmistukseen
- taipuisa (Flexible): kumimainen materiaali.

Kone tulostaa enimmillään 125 x 125 x 165 -millimetrisiä töitä. Tulosteen ohuin rakenne on 0,3 millimetriä ja kerrospaksuudet ovat väliltä 0,025 mm – 0,2 mm. Koneen

lasersäde voi liikkua alle 0,01 millimetrin tarkkuudella, minkä ansiosta tulostuslaatu on hyvin korkealaatuista.

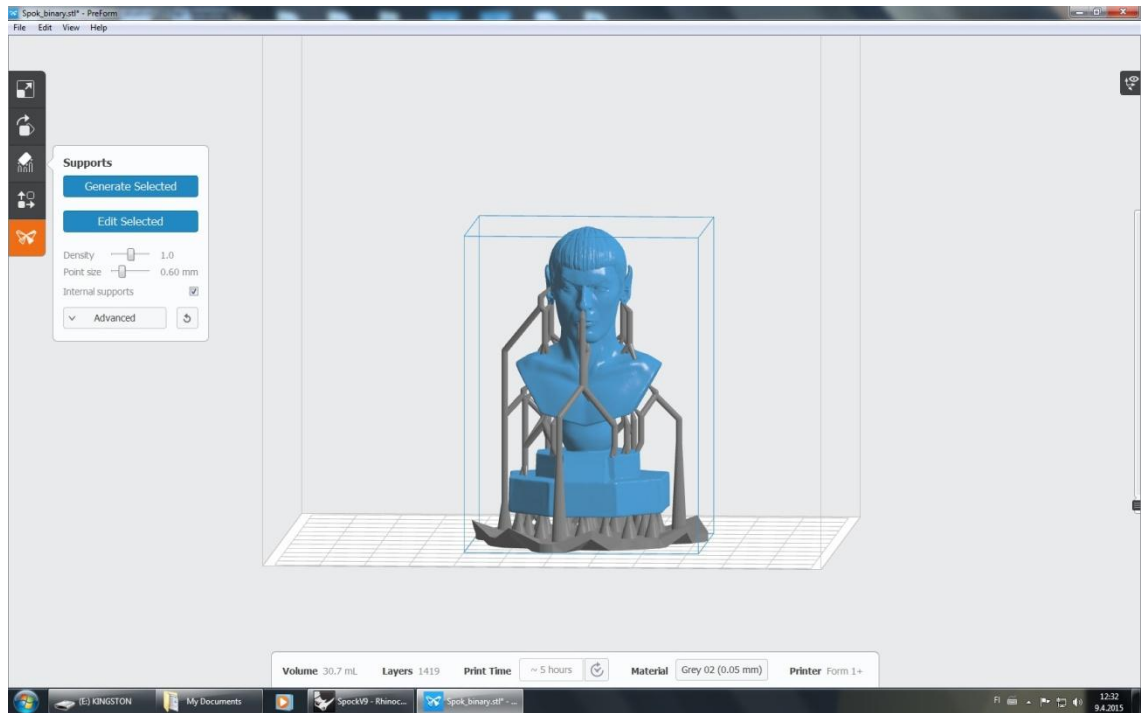
Projektissa käytetty Form 1+ sopii tarkoitukseen hyvin verrattuna yleisemmin käytettyyn filamenttitulostimeen tarkkuutensa puolesta: se on laitteesta riippuen noin 2–5 kertaa tarkempi. Form 1+ käyttää ultraviolettiaserian matalassa astiassa pidettävän valoherkän nestemäisen hartsin kovettamiseen. Hartsi on synteettistä pihkaa, ja koneen valmistaja on ainoa saman hartsimateriaalin tuottaja.

Laite soveltuisi tarvittaessa myös työn valumallin valmistamiseen siihen soveltuvalla castable-hartsinesteellä, mikä on suuri etu muihin tulostimiin verrattuna. Laitteen tulostusnopeus on hidas laserin tarkkuuden vuoksi. Kymmensenttisen objektin tulostukseen menee arviolta viisi tuntia keskivertotarkkuudella.

4.2 Harjoitustyön tulostus

Form 1+ -tulostimella on oma ohjelmistonsa (PreForm), jossa ladattuun malliin saa säädettyä sopivat asetukset tulostusta varten. Tulostin tukee Sculptrisin .obj-tiedostoja suoraan, mutta ohjelmassa oli kuitenkin ollut yhteensopivuusongelmia tämän tiedostomuodon kanssa, joten sen sijasta käytettiin yleisemmin tulostuksessa käytettyä formaattia .stl:aa (stereolithography). Teos muutettiin .stl-formaattiin Rhinoceros-3D-ohjelman kautta. PreForm käyttää omaa skaalausasteikkoaan, joten alun perin Blenderissä 15 senttimetriä korkeaksi asetettu työ jouduttiin sovittamaan sopivaan kokoon havainnollisesti vertaamalla koneen syöttöastian kokoa ruudulla havainnollistettuun työhön. Valkoista hartsia ei ollut tarjolla, joten väriksi valittiin harmaa. Muita vaihtoehtoja olisivat olleet musta ja läpinäkyvä.

Kuvan 24 näkymä on Form 1+ -3D-tulostimen PreForm-ohjelmasta, johon hahmo on ladattu valmisteltavaksi. Tässä asetetaan tukirankojen tiheyttä ja tarkkuutta. Ohjelma muodostaa työhön tukirangat (harmaalla), jotka mahdollistavat mallin ulkonemien tulostuksen, ja orientoi työn optimaalisesti. Ohjelmassa on perustyökalut ladatun objektin muokkaamiseen, kuten kopiointi, linjaus ja koon muuttaminen. Kuvan alalaidassa näkyy teoksen tilavuus millilitroina, tulostettavien kerrosten lukumäärä, arvioitu tulostusaika, materiaali ja valittu tulostin.



Kuva 24. PreForm-ohjelma.

Kun työn valmistelu on tehty, ohjelma lähettää tiedot tulostimelle, minkä jälkeen yhteyttä tietokoneeseen ei enää tarvita. Tästä eteenpäin tulostin toimii itsenäisesti. Kuvassa 25 näkyy työn tarkka tulostusaika, joka oli 4 tuntia 20 minuuttia.

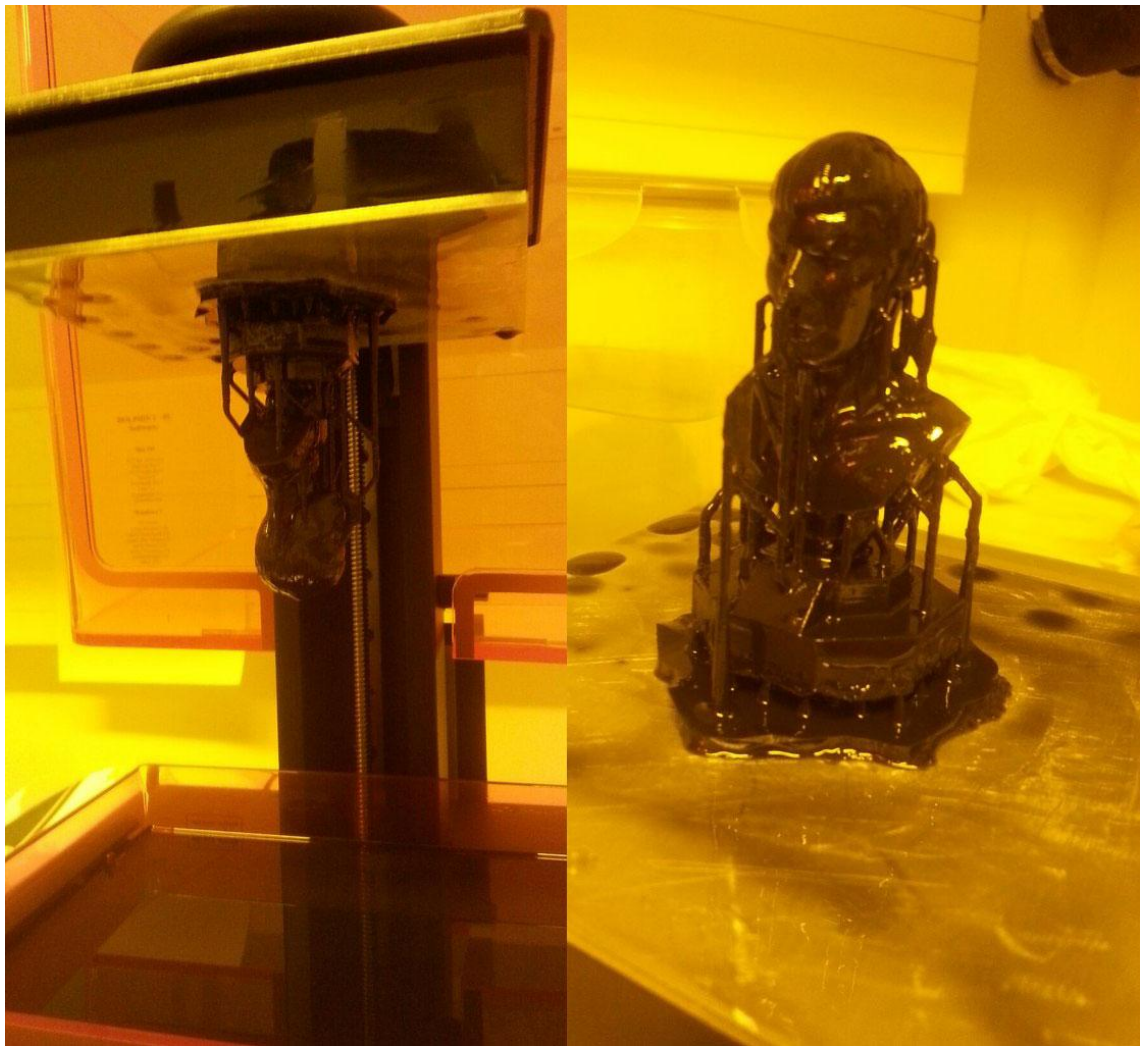


Kuva 25. Tulostusprosessin tiedot.

Tulostuksen jälkeen teline, jossa työ on kiinni, irrotetaan koneesta ja asetetaan tukialustalle, jossa työ irrotetaan telineestä lastalla. Tämän jälkeen työ upotetaan isopropyylialkoholiin, joka liuottaa ylimääräisen nestemäisen hartsin työn pinnasta. Liuotus kestää noin kymmenen minuuttia. Liuotuksen jälkeen seuraa vesihuuhtelu ja tukirankojen irrotus pihdeillä, minkä jälkeen teos asetetaan ultraviolettikaappiin kovettumaan. Kaapin UVA-lampun säteet kovettavat teoksen lasimaiseksi. Tästä syystä on hyvä irrottaa tukirangat ennen ultraviolettikäsittelyä, jotta teos ei vaurioitu tukien irrotuksessa.

Tulostus keskeytettiin noin kahden tunnin kohdalla. Ilmeisesti hartsineste oli vanhentunutta tai pilaantunutta, ja tulos oli muodoton möykky.

Tulostus aloitettiin uudelleen vielä samana iltana kahdeksan aikaan koulun työntekijän toimesta, ja tällä kertaa käytettiin mustaa hartsinestettä. Tulostusaika oli 12 tuntia suurimmalla mahdollisella tarkkuudella, jossa kerrospaksuus oli 0,025 mm. Uusi työ oli valmis seuraavana aamuna kahdeksan aikaan. Kuvassa 26 työ on vielä alustassa kiinni. Alusta asetetaan erilliseen telineeseen ylösalaisin työn irrotusta varten.



Kuva 26. Tulostetun työn irrotus.

Kuvassa 27 työ uitetaan isopropyylialkoholissa, jossa ylimääräinen hartsi liukenee pohjalle. Tämän jälkeen työ huuhdellaan vedessä ja tukirangat irrotetaan. Kuvien keltainen väri johtuu huoneen valaistuksesta. Valon keltaisessa spektrissä ei ole lähes lainkaan ultraviolettisäteilyä.



Kuva 27. Ylimääräisen hartsin poisto ja huuhtelu.

4.3 Tulokset

Kuvissa 28 ja 29 on teos tukirakennejäämien siistimisen jälkeen. Jäänteet leikattiin varovaisesti irti mattoveitsellä. Patsaalla on korkeutta vain 7,5 cm, mikä on puolet suunnitellusta 15 senttimetristä. Form 1+ :n ohjeissa mainitaan jälkihoito mineraaliöljyllä. Sillä todennäköisesti saisi pintanaarmuja peitettyä, mutta öljyä ei ollut käsillä tässä vaiheessa. Kuvat on otettu luonnonvalossa, jossa teoksen yksityiskohdat tulevat hyvin esille.



Kuva 28. Tulostettu patsas siistimisen jälkeen.



Kuva 29. Sivukuvat patsaasta.

Tulostettua patsasta verrattiin myös alkuperäiseen Sculptrisissa tehtyyn veistokseen. Digitaalisen mallin materiaali muutettiin muistuttamaan tulostettua työtä hyvän vertailutuloksen saavuttamiseksi.

Kuvissa 30 ja 31 näkyy tulostettu työ verrattuna Sculptrisin malliin. Kuvista huomaa puuttuvat osat nenästä ja korvasta sekä kuopan leuan juuressa. Hiuksista ja kulmakarvoista puuttuu yksityiskohtia. Patsaan pinnassa näkyy vaakatasossa hyvin pieniä uurteita, jotka johtuvat tulostuskerroksista. Kerrospaksuus on 0,025 millimetriä, minkä ansiosta tulostuslaatu on korkea. On hyvä huomioida, että patsas on noin shakkinappulan kokoinen.



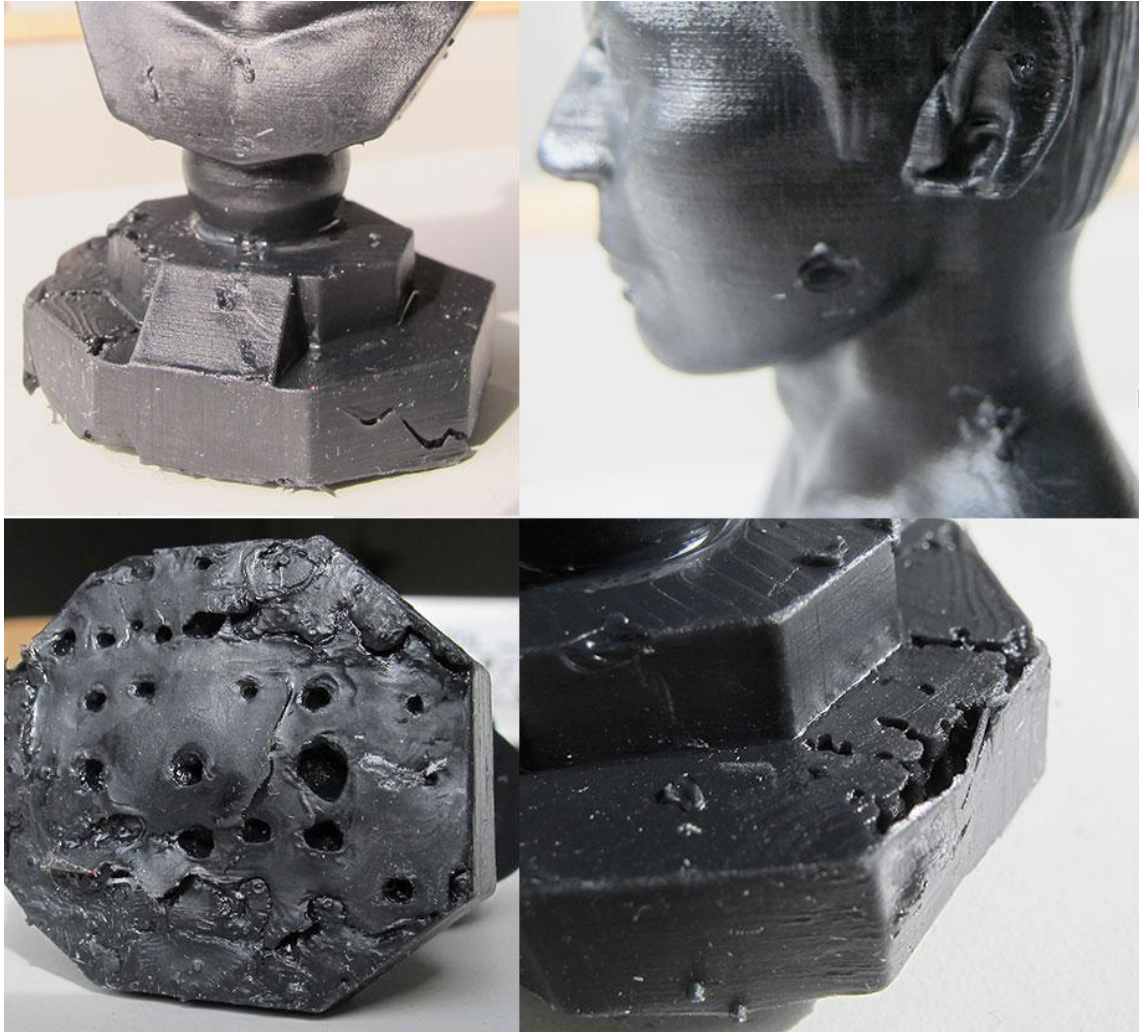
Kuva 30. Vertailukuva sivusta.



Kuva 31. Vertailukuva etuviistosta.

Kuvan 30 materiaali on nimeltään thuglee-chrome-02b, ja sen valo tulee sivuilta hieman yläviistosta. Tämä luo samantyyppiset olosuhteet ja sopii miltei täydellisesti tulostetun patsaan kanssa. Kuvan 31 materiaali on nimeltään mshade7, ja se muistuttaa materiaaliltaan harmaata metallia ja on edestäpäin katsottuna lähimpänä tulostettua patsasta väriltään ja valotukseltaan. Valo tulee tässä materiaalissa hieman ylhäältä ja edestäpäin. Molemmat materiaalit tulivat Sculptrisin mukana.

Kuvissa 32 ja 33 näkyy tulostuksessa aiheutuneita virheitä. Patsaan jalusta on haljennut, ja sen pohja ja toinen sivu ovat epämuodostuneet. Leuan juuressa on kolo. Nenänpäästä puuttuu pala.



Kuva 32. Tulostusvirheitä.

Molemmista korvanlehdistä puuttuu alaosat, ja niissä on vaakasuuntaisia poimuja, jotka näkyvät hyvin kuvassa 33. Leuan kolo on luultavasti aiheutunut tukirankojen poiston yhteydessä, sillä yksi ranka oli kiinni samassa kohdassa.



Kuva 33. Puuttuvat osat nenästä ja toisesta korvasta.

Tulostetun patsaan laatu on tyydyttävä. Tarkkuus on riittävä, vaikka yksityiskohtia puuttuukin, mutta tulostusvirheet ovat suuria. Vikojen ei pitäisi johtua tukirakenteiden puuttumisesta, sillä kuvista näkee niiden tukevan korvia ja nenää. Häiriöt johtuvat todennäköisesti PreForm-ohjelmasta tai itse tulostusprosessista. Laitteen kanssa oli ollut ongelmia aikaisemminkin.

Vahinkoja olisi ehkä voinut pienentää tulostamalla patsas lähemmäksi suunniteltua 15 senttimetrin kokoa, jolloin tukirakenteiden poistosta aiheutuneet vauriot olisivat jääneet pienemmiksi ja tarkkuus olisi lisääntynyt.

4.4 Tekniikan hyödyllisyys kuvanveistäjälle

Teoreettisesti digitaalisesta muovauksesta ja 3D-tulostuksesta voisi olla suuri apu kuvanveistäjän työssä, mutta käytännössä ne ovat luultavasti vain hienoja tekniikoita, joita voi kokeilla. Ammatissa arvostus on juuri oman käden jäljessä, se on se, mille perinteisen kuvanveistäjän ura on perustunut.

Ehkä tärkein ominaisuus kuvanveistäjälle tässä tekniikassa voisi olla mahdollisuus tehdä vahamalleja tulostimella metallivaluja varten. Vahamallit olisivat tallessa tiedostoina, eikä niitä tarvitsisi säilyttää fyysisesti. Silloin ne eivät veisi tilaa ja ne olisivat helposti ja nopeasti löydettävissä ja siirrettävissä. Form 1+ voisi olla tähän tarkoitukseen sopiva lasertarkkuutensa takia. Suurimmat ongelmat ovat laitteen ja hartsinesteen hinta. Laitetta on saatavilla vain yhdeltä toimittajalta, ja sen hinta on 4 150,80 € veroineen ja kuljetuksineen. Sama yritys on myös ainoa tähän koneeseen sopivan hartsinesteen valmistaja, ja litra nestettä maksaa 165,20 € veroineen ilman kuljetusta. Hartsilla on lisäksi rajoitettu käyttöikä, noin kaksi kuukautta syöttöastiassa ja vuoden verran avaamattomana. 3D-vahatulostimia saa noin 800 eurolla, mutta ammattikoneet maksavat 5 000 eurosta ylöspäin.

Itse muotoiluohjelmasta voi olla hyötyä teoksen suunnittelussa, jos käyttäjän taidot mahdollistavat ideoiden visuaalisen toteutuksen. Jotkut taiteilijat käyttävätkin digitaalisia työkaluja, kuten Adobe Illustratoria tai CAD-ohjelmaa teoksen suunnittelussa, ja itse teoksen he veistävät sitten käsin. [13, s. 59.]

3D-muotoiluohjelmista ja -tulostimista on ehkä enemmän apua teknologian parissa kasvaneille taiteilijoille ja korusepille, jotka työskentelevät jo koneiden parissa perinteisten menetelmien sijasta. 3D-tulostustekniikka ammattitarkoitukseen on kuitenkin niin kallista, että sillä tulisi olla keskeinen paikka työssä, ellei tutki halvempaa 3D-tekniikkaa harrastusmielessä.

4.5 Projektissa mukana olleen taiteilijan ajatuksia

Taiteilija Raimo Jaatisen huomioita 3D-muotoilukokeilun jälkeen:

"Olisi helpompi, jos voisi alussa muovata käsin ja sitten jatkaa tällä ohjelmalla."

"Jos on sarjatuotanto, vahamallien tulostus on kätevä printtausohjelmalla. Kaikista tulee varmasti samanlaisia. Säästyy aikaa."

"Tekniikka mahdollistaa mutkikkaiden ja paljon yksityiskohtia sisältävien valumuottien tekemisen. Perinteisessä tekniikassa pitäisi valmistaa hyvin monimutkainen muotti."

Raimo Jaatinen oli myös sitä mieltä, että 3D-muotoiluohjelmilla tuotetuista veistoksista puuttuu taiteilijan oman käden kosketus, mutta veistokset ovat kuitenkin verrannollisia käsin tuotettuun työhön. Jos henkilö pystyy luomaan veistoksen 3D-muotoiluohjelmalla tai savesta, hän pystyy luomaan ne kummallakin, olettaen että tekniikat ovat hallussa.

Taitelijan arvio tuotetusta patsaasta (3D-malli ja tulostettu):

Spock-patsaassa on onnistuttu välttämään aloittelijan virheitä, kuten silmien muotoilu sivusta, suun ympäristön rakenne ja liian ulkonevat poskipäät. Kaulan jänteet ja solisluut ovat liian voimakkaat, mutta voivat sopia sci-fi-henkeen. Selän rakenne on onnistunut. Hiukset ovat liian tasaiset. Jalusta on hyvä ja sopii teemaan. Kaiken kaikkiaan hyvin onnistunut patsas. Tulostuksen virheet ovat korjattavissa, jos teoksesta halutaan jatkossa tehdä esimerkiksi muotti pronssivalulle.

5 Yhteenveto

Insinööriyöprojektin tarkoitus oli tutkia digitaalisen muotoilun ja 3D-tulostuksen mahdollisuuksia taiteen tuottamisessa, ja tätä tarkoitusta varten luotiin patsas fiktiivisestä Spock-hahmosta Sculptris-muotoiluohjelmaa ja referenssikuvia käyttäen. Valmis malli työstä tulostettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Formlabs Form 1+ -3D-tulostimella. Ensimmäinen tulostus epäonnistui pilaantuneen materiaalin takia, mutta toisella yrityksellä tulostus onnistui muutamia virheitä lukuun ottamatta. Patsaan nenä, korvat ja jalusta olivat virheellisiä, mikä johtui tuntemattomasta teknisestä virheestä tulostusprosessissa. Tulos oli kuitenkin riittävä projektin tarkoitukseen. Kuvanveistäjä Raimo Jaatinen oli mukana Sculptrisin testauksessa, ja hän oli kiinnostunut sen käyttömahdollisuuksista. Sculptrisin kontrollit olivat hänelle kuitenkin vaikeita sisäistä lyhyessä harjoitteluajassa, ja ajatuksesta hänen omasta testityöstään luovuttiin. Sen sijaan taiteilija tuki projektia konsultoinneilla ja arvioinneilla. Lopullinen patsas oli tulostusteknisistä virheistä huolimatta onnistunut. Vaikka työ oli tulostettu korkeimmalla mahdollisella resoluutiolla, siitä silti puuttui selkeitä yksityiskohtia, jotka mahdollisesti olisivat näkyneet tulostamalla patsas suuremmassa koossa.

Form 1+ :n todellinen etu taiteentuottamisessa on varsinkin sen kyvyssä tulostaa vahaa vastaavaa Castable-materiaalia, jonka avulla voi valaa töitä metalleista. Tulostuslaatu oli taiteilijan mukaan riittävän tarkka valamiseen. Ongelmana olivat silti vielä laitteen

tekniset virheet, tulostusnopeus, koneen ja materiaalien hinnat ja hartsinesteen pilaantumisen mahdollisuus.

Ammattitason vahatulostimet, kuten hammaslääketieteessä käytetyt Stratasysin FrameWorx-tulostimet ovat hyvin erikoistuneita, eikä tämän tason laitteita ole tarjolla vielä riittävän edullisesti.

Kilpailu ei ole vielä edistynyt tarpeeksi pitkälle, jotta luotettavia ja edullisia laitevaihtoehtoja olisi tarjolla. Kun tällaisia laitteita on saatavilla, ne tuovat mukanaan paljon etuja myös taiteilijoille, varsinkin aloitteleville metallinvalajille ja digitaalisen taiteen tuottajille siten, että kaikki luodut mallit ovat digitaalisessa muodossa.

Digitaalinen taide on helposti tallennettavissa, löydettävissä ja siirrettävissä. Vahamalleja ei tarvitse säilyttää fyysisessä muodossa, vaan niitä tulostetaan tarvittaessa. Sama toimii myös muussa teollisuudessa varaosille. Myytäviä teoksia ei myöskään tarvitse varastoida suurina määrinä, vaan niitä voidaan tulostaa tilauksien ja asiakkaiden toivomusten mukaan (väri, materiaali), kuten Shapeways toimii.

Perinteinen käsin tuotettu taide pysyy tekniikan kehitymisestä huolimatta arvossaan, sillä se on pitkälti mahdotonta kopioida materiaalien ja veistoksen koon vuoksi. Teoksen luominen varsinkin substraktiivista metodia käyttäen esimerkiksi kivistä tai puusta vaatii taitelijalta huomattavaa taitoa ja kokemusta, jotka itsessään luovat arvoa teokselle.

Lähteet

- 1 3D-tulostimien historia. 2014. Verkkodokumentti. 3D Printing Industry. <<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>>. 5.2014. Luettu 10.4.2015
- 2 3D-tulostuspatenttien umpteutuminen. 2013. Verkkodokumentti. Quartz. <<http://qz.com/106483/3d-printing-will-explode-in-2014-thanks-to-the-expiration-of-key-patents/>>. 21.7.2013. Luettu 13.4.2015.
- 3 Prototyyppi metallitulostimesta. 2014. Verkkodokumentti. Pocket-lint. <<http://www.pocket-lint.com/news/131776-metal-3d-printing-at-home-is-here-at-last-thanks-to-the-3d-welder>>. 18.11.2014. Luettu 8.4.2015.
- 4 Kickstarter projekti piirilevytulostimelle. 2015. Verkkodokumentti. Computerworld. <<http://www.computerworld.com/article/2885188/3d-circuit-board-printer-a-smash-hit-on-kickstarter.html>>. 17.2.2015. Luettu 8.4.2015.
- 5 Yhdistetty muovi- ja elektroniikkatulostin. 2015. Verkkodokumentti. Pocket-lint. <<http://www.pocket-lint.com/news/132228-voxel8-will-print-an-entire-drone-or-anything-with-electronics-from-scratch>>. 5.1.2015. Luettu 10.4.2015.
- 6 Lasersintrauksen ongelmat. 2014. Verkkodokumentti. Gigaom. <<https://gigaom.com/2014/04/25/why-you-wont-see-a-laser-sintering-3d-printer-on-your-desk-anytime-soon/>>. 25.4.2014. Luettu 10.4.2015.
- 7 Mills, John W. 2006. Sculpting the Human Figure. The Crowood Press.
- 8 Pään muotoilua osa 1. 2011. Verkkodokumentti. Youtube. <<https://youtu.be/o0RrzLblwFM>>. 2.9.2011. Katsottu 12.3.2015.
- 9 Pään muotoilua osa 4. 2011. Verkkodokumentti. Youtube. <<https://youtu.be/ICyfrNbPq1U>>. 22.9.2011. Katsottu 12.3.2015.
- 10 Työkaluja nuken valmistukseen. Verkkokauppa. AliExpress. <<http://www.aliexpress.com/item/Set-of-11-21-working-head-Clay-Wax-Carver-Carving-OOAK-Doll-Tools-Set/933784071.html>>. Luettu 9.4.2015.
- 11 Puisia savityökaluja. Verkkokauppa. Scrapbooking and Cardmaking. <<http://scrapbookingandcardmaking.com/shop/10-wooden-sculpting-tools-clay-modelling-tools-10-quality-sculpting-tools/>>. Luettu 9.4.2015.
- 12 Metallisia vahatyökaluja. Verkkokauppa. Bellore. <<http://www.bellore.co.uk/shop/waxes/vt786147.aspx>>. Luettu 8.4.2015.
- 13 Loder, Claire. 2013. Sculpting and Handbuilding. The New Ceramics. Bloomsbury Publishing Plc.

- 14 Venus de Milo. 2010. Verkkodokumentti. Odditycentral.
<<http://www.odditycentral.com/news/chinese-artist-showcases-venus-de-milo-statue-made-of-excrements.html>>25.11.2010. Luettu 24.3.2015.
- 15 Normal mapping. Verkkodokumentti. Wikimedia.
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/Normal_map_example.png>. Haettu 24.3.2015.
- 16 Digitaalinen muotokuva. Verkkodokumentti. Dan Hughes McGrail - Digital Sculpture.
<<http://digital-sculpture.co.uk/digital-portrait-patrick-stewart/>>. Luettu 25.3.2015.
- 17 Ohjeita digitaaliseen muovaukseen. Verkkodokumentti. Dan Hughes McGrail - Digital Sculpture.
<<http://digital-sculpture.co.uk/page/8/>>. Luettu 25.3.2015.
- 18 Perikleen muotokuva. 2012. Verkkodokumentti. Thingiverse.
<<http://www.thingiverse.com/thing:32411>>. 18.10.2012. Haettu 11.4.2015.
- 19 Naisveistos. Verkkodokumentti. Shapeways.
<<http://www.shapeways.com/product/P2G5QSC2X/kneeling-woman?li=productGroup&optionId=43646253>>. Haettu 20.3.2015.
- 20 Pixologic Sculptris. Verkkokauppa. Pixologic.
<<http://pixologic.com/zbrush/features/overview/>>. Luettu 4.3.2015.
- 21 Pään mallintaminen Sculptrisissa. 2010. Verkkodokumentti. Youtube.
<<https://youtu.be/MgHfDslcqR0>>. 27.5.2010. Katsottu 9.3.2015.
- 22 Omat mallit. Verkkodokumentti. Shapeways.
<<https://www.shapeways.com/mymodels?li=nav>>. Haettu 23.3.2015.
- 23 Spock -patsas. Verkkodokumentti. Shapeways.
<<https://www.shapeways.com/product/4M66T2NE7/>>. Haettu 23.3.2015.
- 24 Bounding box. Verkkodokumentti. Shapeways.
<<https://www.shapeways.com/model/3dtools/3312064/0/91?check=3>>. Haettu 23.3.2015.
- 25 Biohajoava filamentti. 2015. Verkkodokumentti. 3ders.
<<http://www.3ders.org/articles/20150205-matterlab-robert-cicetti-develops-hemp-and-tagua-based-fdm-3d-printing-filaments.html>>. 5.2.2015. Luettu 12.4.2015.
- 26 DMF vastaan SLA. 2014. Verkkodokumentti. Pinshape.
<<http://blog.pinshape.com/fdm-vs-sla-kudo3d-explains-3d-printer-tech/>>. 6.11.2014. Luettu 20.3.2015.
- 27 Tulostimien käyttö sairaaloissa. 2014. Verkkodokumentti. Stratasys.
<<http://investors.stratasys.com/releasedetail.cfm?releaseid=868176>>. 26.8.2014. Luettu 8.4.2015.
- 28 Objet-tulostimien hinta. 2012. Verkkodokumentti. 3D Printing for you.

- <<http://www.3dprintingforyou.net/objet30-pro-price/>>. 22.5.2012. Luettu 5.4.2015.
- 29 Vahatulostimien hinnat. Verkkokauppa. AliExpress.
<<http://www.aliexpress.com/w/wholesale-3d-wax-printer.html>>. Luettu 11.4.2015.
- 30 Elektroniikkajäte 3D-tulostin. Verkkodokumentti. Instructables.
<<http://www.instructables.com/id/eWaste-60-3DPrinter/?ALLSTEPS>>. Luettu 7.4.2015.
- 31 Form 1+ -3D-tulostin. Verkkokauppa. Formlabs.
<<http://formlabs.com/products/form-1-plus/>>. Luettu 12.3.2015.