

# 3D-tulostus hammastekniikassa, SLA-tulostimet

## TEKSTI JA KUVAT:

PHAMMS18-opiskelijaryhmä ja  
**Lehtori Pasi Alander**  
Hammasteknikkokoulutus  
Turun Ammattikorkeakoulu

## 3D-tulostamisen lyhyt historia

3D-tulostamisen esiasteena voidaan pitää 1800-luvun lopulla tehtyjä topografisia kartoja, joissa kolmiulotteiset maastonmuodot oli koottu kerroksittaisista vahalevyistä ja päällystetty paperikartalla (layered manufacturing). Wyn Kelly Swainson esitti 1960-luvulla ensimmäisen kerran, että muovia voitaisiin kovettaa muotoon kahden laserin avulla, ja haki tälle patenttia 1971. Samalla vuosikymmenellä jauhepetitulos (powder bed fusion, PBF) ja selektiivinen lasersintraus (selective laser sintering, SLS) kokivat alkusäyksensä. Charles W. Hull patentoi stereolitografia-tulostustekniikan (stereolithography apparatus, SLA) vuonna 1986. Hän perusti myös 3D Systems -nimisen yrityksen, joka toi markkinoille ensimmäisen SLA 3D-tulostimen vuonna 1987 nimeltä SLA-1. 3D-tulostuksen kehittymistä ovat hidastaneet edullisten laserjärjestelmien, valokovettavien materiaalien ja tehokkaiden henkilökohtaisten tietokoneiden puute. Vielä 80-90-luvulla ei ollut juuri saatavilla ohjelmistoja, joilla olisi voitu helposti luoda kolmiulotteisia tietokonemalleja, jotka ovat ratkaisevan tärkeitä tulostuskappaleiden siivuttamisessa tulostuskerroksiksi. Tämän jälkeen on kehitetty runsaasti eri tulostustekniikoita, kuten materiaalipursotus (material extrusion), materiaaliruisutus (material jetting), sideaineruisutus (binder jetting), 3D-laminointi (sheet lamination) ja suorakerrostus (direct energy deposition), muutamia mainitakseni.

Eri 3D-tulostustekniikoiden määrä ja samankaltaisuus aiheuttaa sen, että termeistä ja tekniikoista on välillä vaikea saada selvää. Siksi ASTM perusti vuonna 2009 ko-

mitean ASTM F42, joka standardoi esim. 3D-tulostuksen termejä (ISO/ASTM 52900) sekä valmistus- ja testimenetelmiä. Sen suositus on, että 3D-tulostamisesta käytettäisiin termiä "ainetta lisäävä valmistus" (additive manufacturing, AM). Toinen yleisesti käytetty termi on pikavalmistus, jota käyttää esim. Suomen pikavalmistusyhdistys, Finnish Rapid Prototyping Association (FIRPA). Yhdistys kerää yhteen Suomen 3D-tulostus asiantuntijoita yliopistoista, muista oppilaitoksista, tutkimuslaitoksista, tulostuspalveluita tarjoavista yrityksistä ja laitteiden myyjiä. He myös tilastoivat Suomessa olevia 3D-tulostimia lähinnä teollisuuden ja oppilaitosten näkökulmasta. Listalla ei ole lainkaan hammaslaboratorioissa olevia 3D-tulostimia. Tyypillisimmät 3D-tulostusindikaattorit hammastekniikassa ovat työmallit, purentakiskot, implanttiohjurit, oikomiskalvot, valuaihioiden tulostusvalu- ja prässitekniikoita varten, rankaproteesien ja metallokeräämisten siltojen CoCr-rungot. Yleisin 3D-tulostustekniikka hammaslaboratorioissa on stereolitografia-tulostustekniikka, jota kutsutaan myös allasvalopolymerisaatio- eli nesteen fotopolymerisaatiotulostukseksi (VAT photopolymerization).

## SLA-tulostimet hammastekniikassa

SLA-tulostimessa on tyypillisesti nesteallas eli vati (VAT), jossa voi olla pelkkää nestemäistä muovipolymeeriä tai polymeeriä, jonka seassa on keraamia tai metallia. Hammasteknisinä keraameina voi olla alumiinioksidi tai zirkonia. Nestemäinen muovi kovetetaan kerroksittain hyödyntämällä valoa, joka aiheuttaa muovin kovettumisen. Tämän jälkeen tulosteet pestään tyypillisesti

isopropanolilla ja loppukovetetaan vielä valokovetussuunissa. Tulosteet viimeistellään poistamalla tuet, jotka voivat olla verkkomaisia, kartiomaisia tai levymäisiä. Jos SLA-tulostimella tulostetaan keraami- tai metallitulosteita, täytyy tulosteista polttaa sideaineena oleva muovi pois (binder) ja tehdä sen jälkeen vielä sintraus, jos tulostusmateriaali sitä vaatii. Tämä vaatii hyvin huolellisesti suunniteltuja hallittuja lämmönno-ohjelmia ja voi kestää pitkään, jopa muutaman päivän. Siksi hammaslaboratorioissa tulostetaan SLA-laitteilla käytännössä vain muoveja. Pitkäaikaiseen käyttöön tarkoitettujen SLA-tulostukseen suunniteltujen muovien osalta tilanne on parantunut viime vuosina huomattavasti. Nykyään markkinoilla on useita SLA-muoveja, joita voidaan käyttää potilaan suussa oikeasti yli 48 tuntia, joka on medikaalilyhyksynän raja. Tämä varmaan kiinnostaa hammasteknikkoja, koska yhden purentakiskon materiaali kulut SLA-tekniikalla ovat noin 4 euroa. Toisaalta on esitetty että näiden muovien kulutuskestävyys olisi heikompi kuin perinteisten tai jyritysten.

Allasvalopolymerisointi jaotellaan yleensä kolmeen alaluokkaan materiaalia kovettavan valolähteen mukaan. Näitä valolähteitä ovat

- laser
- UV LED projektori eli Digital Light Processing (DLP)
- LCD-paneeli (Liquid Crystal Display)

Joitakin Suomen markkinoilla olevia SLA-tulostimia on listattu taulukkoon 1. Hintavertailussa on käytetty pelkän 3D-tulostimen hintaa huhtikuussa 2020, jotta vertailu olisi selkeämpää. Tulosteiden tulostamisen

Laite	Valmistaja/myyjä	Valonlähde	Muovien valmistaja	Pelkän tulostimen hinta (Alv 0%)
Asiga Max DLP	Scheu-Dental/ Orhomat Hepola	UV Led- projektor	Scheu Dental, GC	5000-10000
Creo C5	Planmeca/Plandent & Ortomat Hepola	LCD- paneeli	Dreve	5000-10000
FORM 2	Formalabs/ Maker 3D	Laser	Fromlabs	1400
FORM 3				3300-3800
Straumann P10+ capsule	Rapidshape/Straumann	UV Led- projektor	Straumann pro resiinit (DMG, GC, Detax, Dreve ja Shera)	5000-10000
Straumann P20+ Cartridge				5000-10000
Straumann P20				10000-15000
Straumann P30+				15000-20000

Taulukko 1. Suomessa myytäviä SLA tulostimia.

jälkeiseen loppuprosessointiin vaikuttaa käytetty muovi. Muovien käyttöohjeita tulee seurata tarkasti, ettei tulosteen pinta jää esimerkiksi pehmeäksi tai tahmaiseksi. SLA-tulostimia käytettäessä juoksevia kuluja tulee käytetyistä tulostusmuoveista, kuluvien osien uusimisesta, pesunesteistä ja likaantuneen pesunesteen kierrätyksestä. Työterveyslaitos ohjeistaa isopropanolin OVA-ohjeessa, että isopropanolia ei saa laskea viemäriin, koska aineen vuotaminen sisätiloihin ja viemäreihin aiheuttaa räjähdysvaaran. Isopropanolia sisältävä jäte, kuten 3D-tulosteiden pesuun käytetty pesuneste, johon liuennut muovia, luokitellaan pitoisuuden mukaan vaaralliseksi jätteeksi (ongelmajäte) tai jätteeksi. SLA-laitteiston kokonaishintaan vaikuttaa tulostimen lisäksi hankittavien lisälaitteiden määrä. On tärkeä pohtia, hankitaanko esimerkiksi pesulaite vai puhdistetaanko tulosteet ultraäänipesurissa. Myös loppukovettamiseen käytettävää laitetta on mietittävä. Loppukovettamiseen käytävät monet valokovettimet, joita hammaslaboratorioissa on jo valmiina. Hammaslaboratorio voi myös päätyä hankkimaan tulostuslaitteen mukana tarjottavan loppukovettimen.

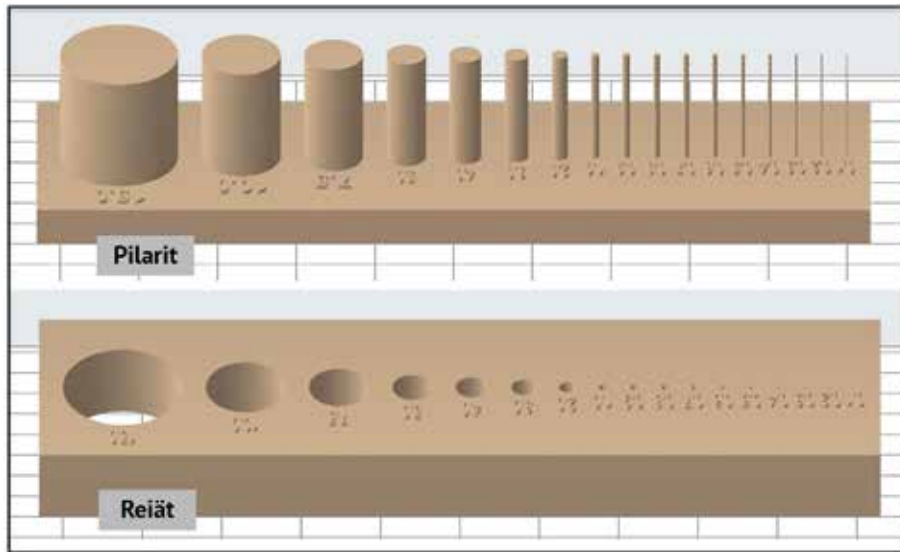
Laadukas valokovetusuuni voi olla kalliimpi kuin halvin lasersäteellä kovettava SLA 3D-tulostin, joiden lähtöhinta on muutamissa tuhansissa euroissa.

Laserilla toimivista SLA 3D-tulostimista suomalaisissa hammaslaboratoriossa näkee tyypillisimmin Formlabsin Form 2 tai Form 3 -tulostimia. Uudemman Form 3 -laitteen suurimpina etuina vanhempaan on vaihdettava laser ja se, että tulostettavaan kappaleisiin syntyy vähemmän vetokuormitusta uuden LFS-tulostustekniikan ansiosta (Low Force Stereolithography, LFS). Nimitys ei viittaa laserin tehoon, vaan joustavaan resiiniin pohjaan. Jouston ansiosta tulostettavaan kappaleisiin syntyy vähemmän vetojännitystä, jota syntyy joka kerta, kun kappale nostetaan tulostetun kerroksen jälkeen irti resiiniin pohjasta. Laserilla tapahtuvan kovettamisen heikkous on se, että lasersäde kovettaa vain lasersäteen kokoisen alueen kerralla, ja siksi ne ovat hitaita. UV LED projektorilla valonlähteenä käyttävät 3D-tulostimet ovat huomattavasti nopeampia, mutta myös kalliimpia kuin lasersäteellä toimivat tulostimet. Halvimpien

projektorilaitteiden lähtöhinta on nykyään alle 3000 euroa. Esimerkiksi teollisuus käyttöön suunniteltu FabPro 1000 (3D systems/PLM group) maksaa alle 2500€ ja siitä on olemassa myös NextDentin kaupittama dentaaliversio, johon sopii NextDentin muovit.

LCD-paneelilla varustetut tulostimet ovat kaikkein nopeimpia SLA-tulostimia. Ne ovat myös hyvin tarkkoja, koska LCD-paneelin koko vastaa tulostusalustan kokoa. Tämän takia valo matkaa LCD-paneelistä tulostusalustaan kohtisuoraan myös tulostusalustan reunoihin. Näin ollen tulostustarkkuus on koko tulostusalustan alalla sama. UV tai LED-projektorilla varustetuissa SLA-tulostimissa projektorin valonlähde on tulostusalustan keskikohdalla ja siksi valon matka tulostusalustan reunoihin on pidempi kuin tulostusalustan keskelle. Tätä vääristymää kompensoidaan matemaattisilla laskelmilla ja käytännössä tarkkuudessa ei ole eroa tulostusalustan eri kohdissa, vaikka tulostusalusta olisi iso. Tyypillisesti projektoritulostimien tulostusalustan koko on suurempi kuin LCD-paneelilla varustetuilla laitteilla.

### 3D-tulostusharjoittelu hammasteknikkokoulutuksessa



Kuva 1. Tutkimuksessa käytetyt testikappaleet

#### Tulostusharjoittelu ja -tarkkuus

Turussa hammasteknikkokoulutuksessa 3D-tulostimet otettiin käyttöön syksyllä 2019 PHAMMS18-ryhmän opiskelijoiden toimesta. Kurssilla käytettiin pelkästään SLA-tulostimia (Form 2, Asiga Max ja Straumann P30). Alussa tutkittiin ja yritettiin ymmärtää kuinka tulostusasetukset vaikuttavat tulostustarkkuuteen. Käytössä oli testikappaleita, joissa oli erikokoisia pilareita ja reikiä. Pilareiden ja reikien koot olivat 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 5, 7.5 ja 10 mm (Kuva 1). Jälkikäteen voidaan sanoa, että tulosten luotettavuuden kannalta isoimmat pilari- ja reikäkoot olisi voinut jättää pois. Niiden tilalle olisi voinut ottaa pilareita ja reikiä 0.1 mm välein kahteen milliin asti. Nyt esim. Form 2 -tulostimella tehtyjen testiryhmien keskiarvot olivat huomattavasti suuremmat kuin muilla, koska millin kokoisten pilarien ja reikien jälkeen seuraava koko oli 1.5 mm ja se nosti keskiarvoa enemmän kuin 0.1 mm välein tapahtuva muutos. Testikappaleita tulostettiin eri tulostusasunnoissa ja kerrospaksuuksilla 5 kappaletta ryhmää kohti. Tulostusasennot olivat: a) vaakatasossa tulostusalustaan kiinni (0 astetta), b) kyljellään (90 astetta + tuet), sivuttain kallistettu (45 astetta + tuet) ja toisesta päästä

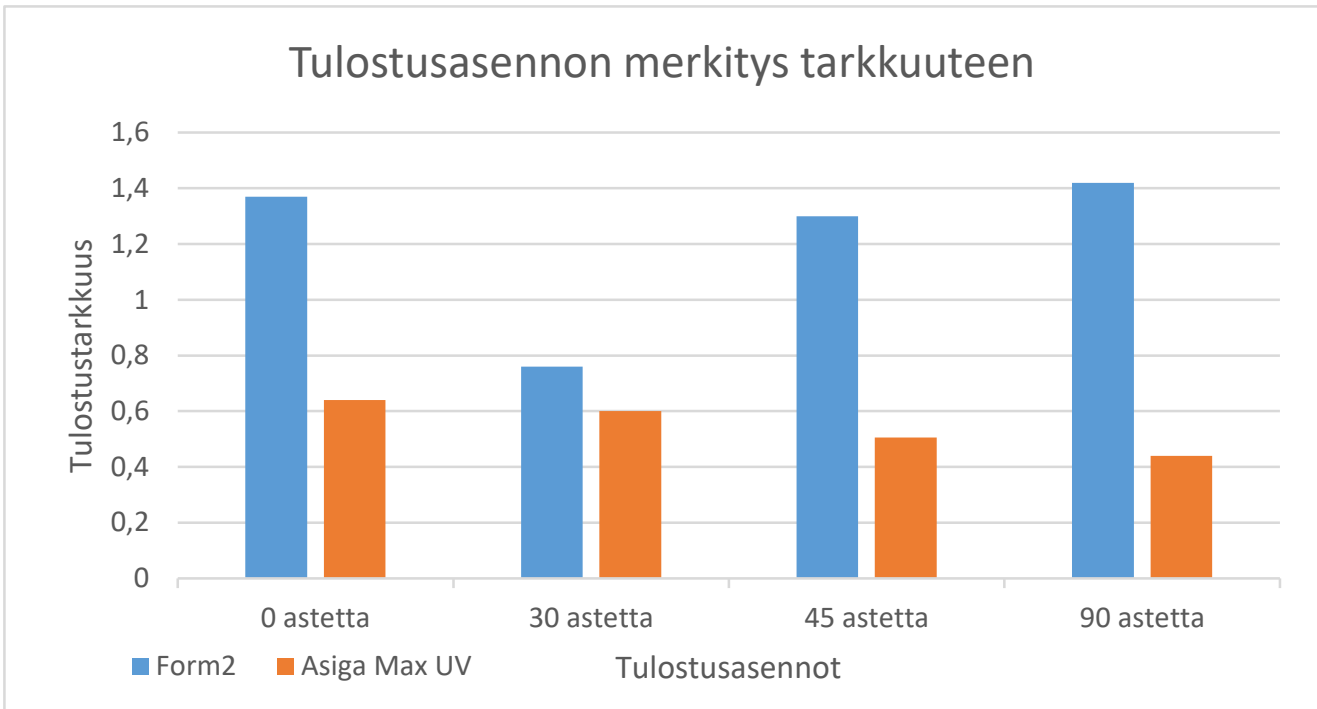
nostettu (30 astetta + tuet). Tarkoitus oli visuaalisesti tarkastella, mikä oli pienin pilari tai reikä, joka tulostui onnistuneesti, ja laskea ryhmäkohtainen tarkkuuskeskiarvo. Tämä testimenetelmä ja kappaleet valittiin siksi, että tulosteiden tarkastelu voitiin tehdä silmämääräisesti ilman testilaitetta. Tarkkuustulos katsottiin tukien poistamisen jälkeen. Pienin onnistunut pilari tai reikä laskettiin mukaan tarkkuuskeskiarvoon.



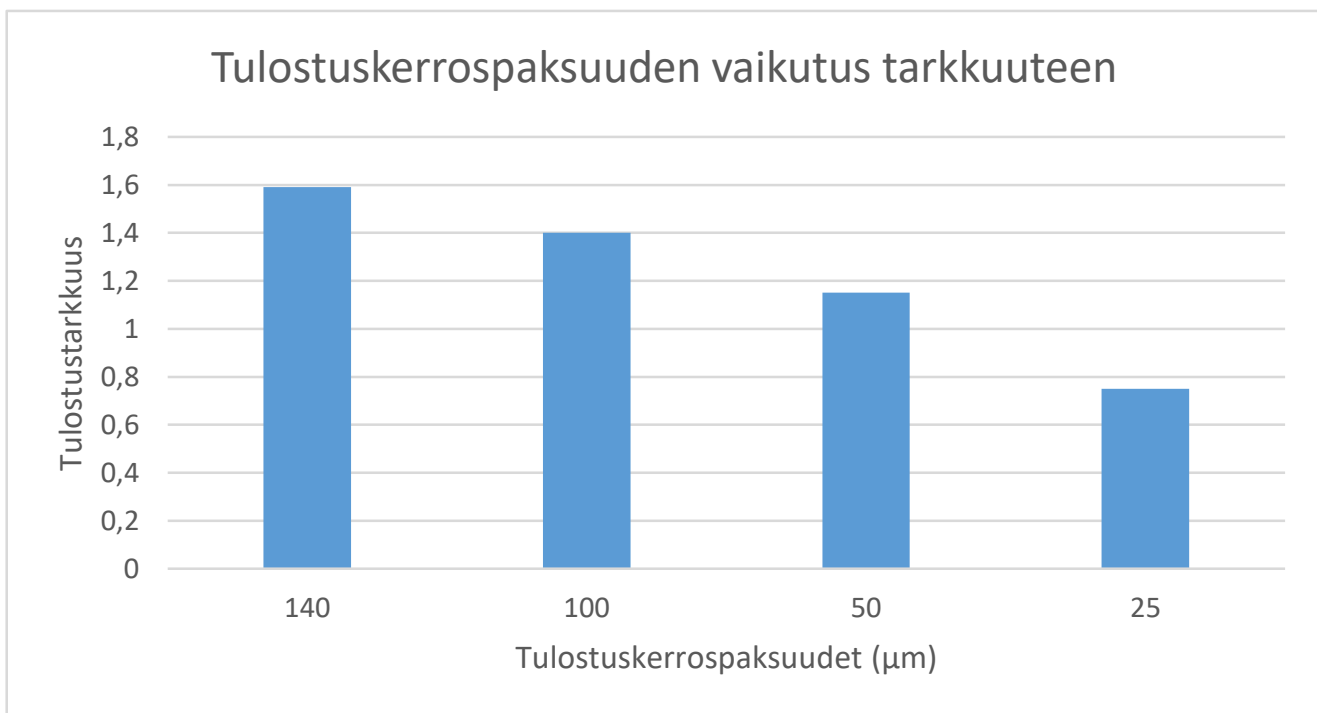
Kuva 2. Asigan MAX UV tulostimella tulostettuja testikappaleita ennen tukien poistamista

Rajallisen ajan takia kaikkia rinnakkaisia ryhmiä ei ehditty syksyllä tehdä, vaikka tulostusvolyymi maksimoitiin esim. kerrostamalla samalla kerralla kaksi kerrosta tulosteita (stacking) (Kuva 2). Tutkimusta oli tarkoitus jatkaa nyt keväällä, mutta oppilaitosten sulkemisen takia tutkimus on vielä kesken ja esimerkiksi kaikki koekappaleet Straumannin tulostimella on vielä tekemättä. Tutkimustuloksista ei voida siksi tehdä luotettavia johtopäätöksiä esimerkiksi eri 3D-tulostimien eroista. Toisaalta tähän mennessä tehtyjen rinnakkaisten ryhmien laitekohtaisissa keskiarvoissa Asiga MAX -tulostin on Form 2 -tulostinta parempi. Jos pilari- ja reikäryhmien tulokset lasketaan yhteen, Asigan keskiarvo on 0.55mm ja Form 2 -tulostimella tehtyjen ryhmien keskiarvo on 1.2mm. Asigan tarkin onnistunut pilari oli 0.3mm ja reikä 0.4mm. Form 2 -tulostimen tarkin pilari oli 0.8mm ja reikä oli 0.6mm. Tulostusasennon osalta tulokset menivät hieman ristiin (kuva 3) ja siksi on hankala sanoa mikä tulostusasento olisi paras. Ehkä sen voi sanoa, että Asigan Composer CAM-ohjelmisto tekee tukevammalla tulostustuet riippuvien kohtien (overhang) alle ja ne ovat tiiviimmin kuin Formlabsin Preform CAM-ohjelmiston tekemät. Tukia on

paljon (Kuva 2) ja ne ovat niin tukevia, että Asigan tarkin pilariryhmä oli kyljelleen tulostettu ryhmä. Tulostustaitojen kehittyessä näitä tukia pyritään keventämään ja niiden määrää vähentämään tulostusaineen menekin vähentämiseksi.



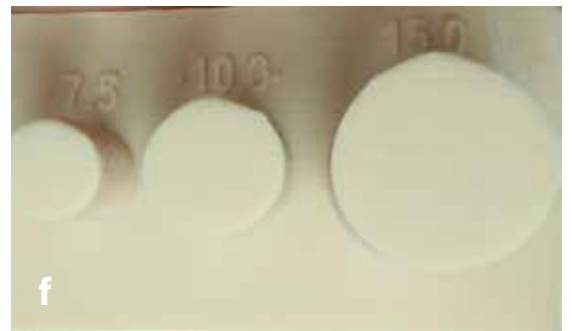
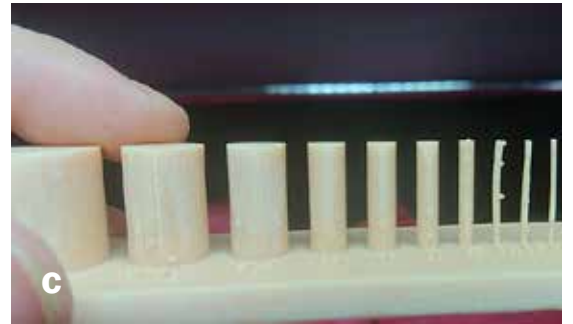
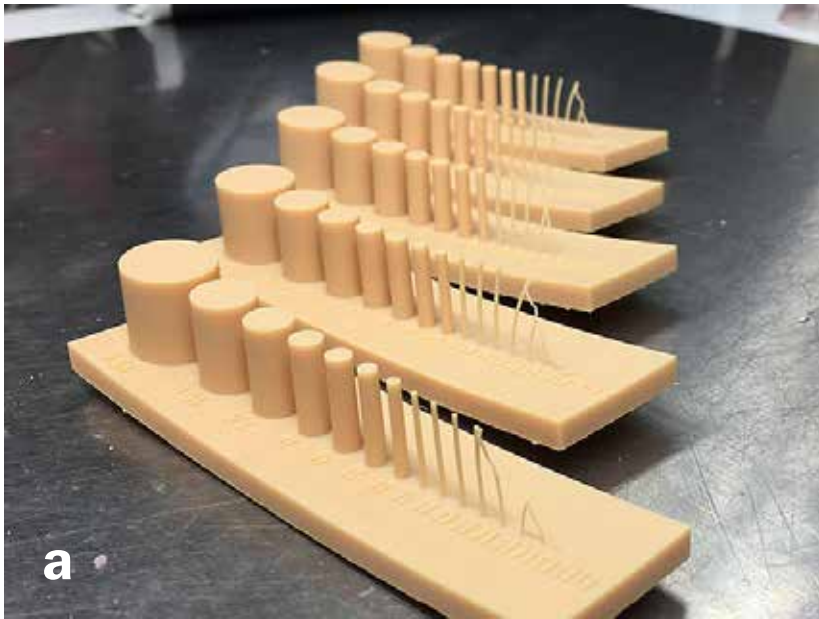
Selkein johtopäätös voidaan tehdä, kun vertaillaan tulostuskerroksen paksuutta. Mitä pienempi oli kerrospaksuus, sitä tarkempia koekappaleet olivat (Kuvat 4 ja 5). Reiät tulostuivat keskimäärin tarkemmin kuin pilarit. Reikien keskiarvo oli 0.9 mm ja pilareiden keskiarvo oli 1.7 mm Form 2 -tulostimella (Kuva 5). Tämä oli yllättävää, koska tulostuskappaleen paksuus vaikuttaa tarkkuuteen, erityisesti kun kyseessä on kappaleeseen tulostettavat reiät. Pilarikappaleen sokkelin ja reikäkappaleen korkeus olisi voinut olla hammasteknisiä sovelluksia ajatellen matalampi. Toisaalta sokkelin tai kappaleen korkeus eliminoi sen kovettumiskutistumisesta johtuvaa vääntymistä (warping).



**Kuva 4.** Eri kerrospaksuuden vaikutus tulostustarkkuuteen Form 2 -tulostimella, kun pilari- ja reikäryhmien tulokset on laskettu yhteen.



## Laitteiden käyttöönotto ja tulostusongelmat



Kuva 6. Yleisimmät ongelmat olivat tulosteiden taipuminen, osittainen tulostumattomuus ja muodon epätarkkuus.



Kuva 5. esimerkkejä tulostustarkkuudesta.

#### Kuvassa 6 esitetyt tyypillisimmät tulostusvirheet olivat seuraavanlaisia:

- Kappaleiden taipumista lisäsi tukien poisto tulosteista ennen loppukovetusta (6a, Form 2, Dental model resin, tulostussuunta 45 astetta).
- Jonkun verran esiintyi tulostuksia, joissa jokin este, kuten ilmakupla, roska tai aikaisemmasta tulostuksesta pudonnut kappale (esim. pieni pilari) tulostusaltaan pohjalla esti kappaletta tulostumasta kokonaan (6b, Form 2, rigid, tulostussuunta 45 astetta).
- Yleinen epätarkkuus tulostuksessa tai tukien poistamisesta johtunut pinnan epätarkkuus (6c, Form 2, Dental model, tulostussuunta 45 astetta).
- Terävien kulmien pyöristyminen (6d, Form 2, Standard black ja Standard clear, tulostussuunta 45 astetta).
- Tulosteen venymisestä johtuvaa epätarkkuutta, esim. yksi sivu tulosteesta ei vastaa STL-tiedoston muotoa. Tämä oli yleensä se sivu, joka oli tulostettaessa ylöspäin tulostusalustan suuntaan ja oli tuettu (6e ja 6g, Form 2, Standard clear ja Standard black, tulostussuunta 45 astetta).
- Pyöreät pilarit eivät olleet pyöreitä. (6f, Form 2, Dental model resin). Näissä kyljellään (90 astetta) tulostetuissa kappaleissa virhe esiintyi tukien varassa olleessa yläpinnassa, joka oli tulostusalustaan päin.

**Tämä artikkeli tehtiin osana Multicomponent Materials Centre of Expertise for Additive Manufacturing (MMAM)-projektia ja Turun AMK:n Suun terveyden tutkimusryhmää.**

Edellä mainituista virheistä huolimatta tulostaminen onnistui yllättävän hyvin. Esim. Form 2 -tulostimella saatiin hyvin nopeasti onnistuneita tulosteita ilman ongelmia, vaikka kokemusta tulostamisesta oli kaikilla osallistujilla vähän. Kahden muun laitteen CAM-ohjelmistot olivat hiukan hankalampia käyttää ja tuotetukea tarvittiin useamman kerran, mutta ne näyttäisivät olevan tarkkuudeltaan parempia. Toisaalta näin pienen otannan (5 testikappaletta/ryhmä) johdosta ei tilastollisesti luotettavia johtopäätöksiä voida tehdä.

Tiivistettynä voidaan sanoa, että ensiaskeleet 3D-tulostukseen on suhteellisen helppo ottaa ja onnistuneita tulosteita saa jo lyhyellä harjoittelulla. Myöskään kustannukset eivät ole päätähuimaavia. Halvimman SLA-tulostimen saa jo muutamalla tuhannella eurolla. Syvällisempi osaaminen eli ymmärrys esim. tulostussuuntien vaikutuksesta tulostustarkkuuteen ja pinnan laatuun vaatii pidemmän harjoittelun ja kokeilun. Näin on tietysti muidenkin uusien asioiden kanssa hammas-tekniikassa. 3D-tulostus jatkuu Turun AMK:ssa syksyllä metallitulostuksen merkeissä. Hammas-tekniikkokoulutus osallistuu tekniikan sektorin kanssa MMAM -projektiin (<https://mmam.turkuamk.fi/>), jossa on tarkoituksena kehittää 3D-tulostusosaamista ja perustaa lisäävän valmistuksen osaamiskeskus Keskuksen tarkoituksena on tarjota palveluja teollisuudelle ja myös lääketieteen sovelluksiin. Projektissa ollaan hankkimassa työkaluteräksen, titaanin ja CoCr-rankojen tulostamiseen pystyviä jauhepetitulostimia 2 kappaletta. Laitteiden kilpailutus käynnistyy huhtikuussa 2020. Sen tuloksista saamme kuulla toivottavasti myöhemmin Hammas-tekniikkolehden sivuilla.

Kiitos vielä Herpolan ja Straumanin edustajille Arille ja Artulle avusta ja teknisestä tuesta.

Kirjoituksen lähteenä on käytetty kirjaa: **A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing**. Authors Olaf Diegel, Axel Nordin & Damien Motte. Kustantaja: Springer 2020.