

Opinnäytetyö (AMK)

Hammastekniikka

2022

Noora Laiho, Milla Laine, Jenni Launto

3D-TARKKUUSVERTAILU- TUTKIMUS

– tulostettavan kappaleen sijainnin merkitys
tulostusalustalla allasvalopolymerisaatiotulostimilla



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Hammastekniikka

2022 | 38 sivua, 6 liitesivua

Noora Laiho, Milla Laine, Jenni Launto

3D-tarkkuusvertailututkimus

- tulostettavan kappaleen sijainnin merkitys tulostusalustalla
allasvalopolymerisaatiotulostimilla

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus tutkia, onko kappaleen sijainnilla tulostusalustalla vaikutusta tulostustarkkuuteen allasvalopolymerisaatio-tulostimilla. Lisäksi halusimme selvittää, onko eri allasvalopolymerisaatio-tulostustekniikoiden tulostustarkkuuksien välillä merkittäviä eroja. Mukana olleet tulostustekniikat olivat SLA, DLP ja LCD. Käyttämällä erilaisia tulostimia saimme kerättyä tietoa allasvalopolymerisaatio-tulostimista hammastekniikan ammattilaisten käyttöön.

Tutkimuksessa oli mukana kuusi erilaista allasvalopolymerisaatio-tulostinta. Jokaisella tulostimella tulostettiin 10 testikappaletta tulostusalustan keskellä ja 10 testikappaletta tulostusalustan oikeassa ylänurkassa. Testikappaleissa olleet kolme palloa toimivat mittauspisteinä. Tulostetut testikappaleet skannattiin ja verrattiin tietokoneohjelman avulla alkuperäiseen digitaaliseen mastermalliin.

Tulostettujen testikappaleiden sijainnilla tulostusalustalla ei ollut yhtenäistä linjaa pallojen halkaisijoiden ja etäisyyksien suhteen. Ainoa samankaltainen muutos kaikkien tulostimien testikappaleissa oli, että nurkassa tulostetuissa testikappaleissa pallojen halkaisijat olivat suurempia kuin keskellä tulostetuissa testikappaleissa. Kaikkien tulostimien pallojen halkaisijoiden keskiarvot täyttivät asetetun 100 µm klinisen raja-arvon. Tarkkuusvertailutuloksista löytyi tilastollista merkittävyyttä.

Asiasanat:

Allasvalopolymerisaatio, 3D-tulostus, hammastekniikka, tarkkuusvertailu

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Dental Technology

2022 | 38 pages, 6 pages in appendices

Noora Laiho, Milla Laine, Jenni Launto

3D-ACCURACY COMPARISON RESEARCH

- The significance of the placement of the object on the build plate in vat polymerization printing

The purpose of this thesis was to research does the placement of the object on the build plate have an effect on the vat polymerization printing accuracy. In addition, we wanted to examine is there significant differences between different vat polymerization (SLA, DLP and LCD) 3D printing techniques. Using a variety of 3D printers (six different printers) we were able to gather information about vat polymerization printers for dental professionals.

With each printer 10 test objects were printed on the center of the build plate and 10 test objects on the upper right corner of the build plate. The test objects had three spheres as measuring points. The printed objects were scanned and compared with the original digital master model using a computer software.

The placement of the printed test objects on the build plate did not have consistency in terms of sphere diameters and distances. The only consistent chance in the printed test objects was that the ones printed on the corner had larger sphere diameters compared to the ones printed on the center. The average sphere diameters with all printers were clinically acceptable as the deviations were below 100 μm . The accuracy of the precision comparison results were found to be statistically significant.

Keywords:

Vat polymerization, 3D printing, dental technology, accuracy comparison

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
2 Teoreettinen viitekehys	9
2.1 Kvantitatiivinen tutkimusmenetelmä	9
2.2 Työmallit	9
2.3 3D-tulostuksen tarkkuustutkimus	10
2.4 Allasvalopolymerisaatio	11
2.5 Tulostusten tarkkuus	12
2.6 Nestemäinen fotopolymeeri eli resiini	14
2.7 Tarkkuuden mittaaminen	15
3 Tutkimuksen tavoite, tarkoitus ja tutkimuskysymykset	17
4 Materiaalit ja menetelmät	18
5 Tulokset	26
6 Pohdinta	32
7 Luotettavuuden ja eettisyyden tarkastelu	36
8 Yhteenveto	37
Lähteet	38

Liitteet

Liite 1. Tarkkuusmittaustulokset.

Liite 2. SPSS ANOVA-analyysi.

Kuvat

Kuva 1. Resoluutio. (Favero ym. 2019.)	13
Kuva 2. Digitaalinen mastermalli.	18
Kuva 3. Asettelu tulostusalustalla.	21
Kuva 4. Käytetyt tulostusmateriaalit. Ylävasemmalta Model V2 Resin, P pro Master Model, Die and Model 2, alavasemmalta KeyModel®, FotoDent®, TR250LV.	22
Kuva 5. Skannauslevylle asettelu.	24
Kuva 6. Pallojen ja etäisyyksien numerointi testikappaleella. Numerot 1, 2, ja 3 kuvaavat palloja ja välit 1–2, 1–3 ja 2–3 pallojen etäisyyksiä. (Kuva otettu Gomista.)	25

Kuviot

Kuvio 1. Tulostettujen testikappaleiden pallojen halkaisijoiden keskiarvojen ero digitaalisen mastermallin pallojen halkaisijoihin (0-taso mastermallin pallon halkaisija, K = keskellä, N = nurkassa).	26
Kuvio 2. Tulostettujen testikappaleiden kaikkien pallojen (1, 2 ja 3) halkaisijoiden keskiarvon ero digitaalisen mastermallin pallojen halkaisijoihin (0-taso mastermallin kaikkien pallojen halkaisija).	27
Kuvio 3. Tulostettujen testikappaleiden pallojen etäisyyksien keskiarvojen erot digitaaliseen mastermalliin (mastermalli 0-arvo).	28
Kuvio 4. Tulostettujen testikappaleiden pallojen halkaisijoiden keskihajonnat.	29
Kuvio 5. Tulostettujen testikappaleiden kaikkien pallojen halkaisijoiden keskihajonnat.	30
Kuvio 6. Tulostettujen testikappaleiden pallojen etäisyyksien keskihajonnat.	31

Taulukot

Taulukko 1. Tutkimusryhmät.	19
-----------------------------	----

Taulukko 2. 3D-tulostimet.	20
Taulukko 3. Käytetyt materiaalit.	23
Taulukko 4. Jälkikäsittely.	23
Taulukko 5. Testikappaleiden tarkkuusmittausten tulokset.	41
Taulukko 6. Sijainnin p-arvo.	43
Taulukko 7. SPSS ANOVA-analyysi.	44

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

3D-TULOSTUS	Materiaalia lisäävä valmistustekniikka
CAD/CAM	Computer-Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu / Computer-Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
DLP	Digital Light Processing, 3D-tulostamisessa käytetty teknologia, joka käyttää projektoria.
LED	Light-Emitting Diode, loistediodi, joka tuottaa valoa.
LCD	Liquid-Crystal Display, nestekidenäyttö, käytetään mm. allasvalopolymerisaatio-tulostimissa.
MIKRONI	Mikrometri, SI-järjestelmästä johdettu pituusyksikkö, joka on 1×10^{-6} m ($1 \mu\text{m} = 0,001$ mm).
PIKSELI	Kuvapiste, kuvapinnan pienin yksikkö
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti, kestopuovi
RESOLUUTIO	Pikseleiden määrä pituusyksiköllä
SLA	Stereolithography, 3D-tulostamisessa käytetty teknologia, jossa käytetään laseria.
SPSS/SAS	Statistical Package for Social Sciences / Statistical Analysis System, tilastollisen tietojenkäsittelyn ohjelmisto
STL	Standard Tessellation Language, tiedostoformaatti, käytetään 3D-tulostimissa.
UV	Ultravioletti, valon aallonpituus. Sopii valokovetteisen muovin kovettamiseen.

1 Johdanto

Monessa hammasteknisessä työssä tarvittavat tiedot työn tekemiseen löytyvät työmallilta. Tarvittavia tietoja voi olla hampaiden koko, hampaiden etäisyydet, hammaskaaren muoto ja mitat. Jotta nämä tiedot ovat oikeat, on työmallin oltava tarkka. Hyvin tehty jäljennös on lähtökohta laadukkaalle proteettiselle työlle. (mrzezo 2015.)

Hammasteknisten mallien ja kojeiden valmistuksessa 3D-tulostaminen lisääntyy yhä enemmän 2020-luvulla. Tässä tutkimuksellisessa opinnäytetyössä selvitetiin, onko tulostettavan työn sijainnilla tulostusalustalla vaikutusta tulostuksen tarkkuuteen. Työn tutkimuskappaleet tulostettiin eri allasvalopolymerisaatio-tulostimilla, ja pyrittiin selvittämään, onko tekniikoiden välillä eroavaisuuksia tarkkuuksissa. Opinnäytetyön tutkimuksellista osuutta lisättiin ottamalla mukaan opinnäytetyön toimeksiantajan kehittämä tulostin.

Opinnäytetyön alussa syksyllä 2021 tehty kirjallisuuskatsaus osoitti, että tyypillisimmin hammasteknisissä 3D-tarkkuusvertailututkimuksissa oli tutkittu tulostuskerroksen paksuuden tai tulostuskulman vaikutusta tulostetun kappaleen tarkkuuteen. Tehdystä kirjallisuuskatsauksesta kävi ilmi tutkimusten vähäisyys, joissa tulostettavan kappaleen sijainnin merkitystä tulostusalustalla olisi tutkittu.

2 Teoreettinen viitekehys

2.1 Kvantitatiivinen tutkimusmenetelmä

Tässä tutkimuksessa tutkimusmenetelmä oli määrällinen eli kvantitatiivinen menetelmä. Määrällisessä tutkimuksessa analyysi perustuu numeerisen tiedon tarkasteluun. Kerätty aineisto sisältää lukuarvoja, joista voidaan muodostaa taulukoita, diagrammeja ja kaavioita. Määrällisessä tutkimuksessa mittausarvoja analysoidaan tilastollisin analyysimenetelmin käyttäen apuna ohjelmistoja kuten Excel, SPSS ja SAS. Määrällinen tutkimus vastaa esimerkiksi kysymyksiin, kuinka moni tai kuinka paljon. Tulokset analysoidaan ja päätelmät tehdään numeeristen tilastojen perusteella. (Ritala 2013.)

2.2 Työmallit

Kipsimallit ovat olleet hammasteknisellä alalla tärkeä työkalu jo pitkään. Hammasteknisessä työssä tarvittavat tiedot työn tekemiseen löytyvät työmallilta. Hammastekniset työt tehdään suun ulkopuolella, joten potilaan hampaistosta ja pehmytkudoksesta tulee saada tarkka jäljennös. (mrzezo 2015.) Farian ym. (2008) tekemässä tutkimuksessa mukana olleiden Suomessa käytettävien sili-koni-, polyeetteri- ja alginaattipohjaisista jäljennöksistä tehdyillä kipsimalleilla päästiin 120–300 µm tarkkuuteen.

Jäljennös voidaan tehdä digitaalisesti intraoraaliskanneria käyttäen tai jäljennös-aineella, jolloin saadaan fyysinen malli (Mangano ym. 2018). Kipsimallit sekä digitaaliset mallit ovat oleellinen osa hoidon suunnittelua, teknistä toteutusta sekä alkutilanteen dokumentointia (Jabbar & Mahmood 2009). Digitaalisten työmallien tulostaminen fyysisiksi malleiksi 3D-tulostimilla poistaa perinteisen työmallin valmistusprosessin työvaiheita ja tehostaa työnkulkua. Säästetyn ajan lisäksi työmallit saadaan tallennettua digitaaliseen muotoon. (Hazeveld ym. 2014; Kim ym. 2018.)

2.3 3D-tulostuksen tarkkuustutkimus

3D-tulostimet yleistyvät hammastekniikan päivittäisessä työnsäädössä 2020-luvulla. Materiaalia lisäävät tulostustekniikat, varsinkin eri allasvalopolymeerisaatiotekniikat, kuten SLA (stereolithography) ja DLP (digital light processing), ovat nykyään laajalti käytettyjä hammaslääketieteessä. Näillä tekniikoilla tulostettujen kappaleiden isoja etuja ovat korkea resoluutio tulosteissa, tulosteiden sileät pinnat sekä lyhyempi valmistusaika verrattuna muihin tulostustekniikoihin. (Nestler ym. 2021.) Jotta 3D-tulostimilla tehtävillä hammasteknisillä työvaiheilla saadaan kliinisesti hyväksyttävää jälkeä, tulee niiden tarkkuutta sekä toistettavuutta testata (Sherman ym. 2020).

Aikaisemmin tehdyt tutkimukset tulostusasetusten vaikutuksista tulostettavan kappaleen tarkkuuteen ovat tutkineet tulostusasennon ja kerrospaksuuden vaikutuksia työmallien tarkkuuteen. Syksyllä 2021 tehdyssä kirjallisuuskatsauksessa vain harvassa tutkimuksessa oli tutkittu tulostettavan kappaleen sijainnin merkitystä tulostusalustalla. Esimerkiksi Jennifer Ko ym. (2021) tutkivat laajalti tutkimuksessaan, miten eri kerrospaksuudet ja eri tulostuskulmat vaikuttavat tulostetun kappaleen tarkkuuteen, mutta tutkimuksessa ei ollut mainintaa kappaleen sijoittelusta tulostusalustalla.

Tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella tulostusasennon ja kerrospaksuuden vaikutus kappaleen tarkkuuteen on osoitettu olevan kliinisesti hyväksyttävissä rajoissa. Kirjallisuudessa on käytetty tai ehdotettu kliinisen tarkkuuden kynnsarvoja, joiden vaihteluväli oli 160–300 µm (Favero ym. 2017; Hazelveld ym. 2019; Sherman ym. 2020.) Sherman ym. (2020) toivat tutkimuksessaan esille myös tiukemman kliinisen raja-arvon 10–150 µm.

Erilaiset 3D-tulostustekniikat voivat aiheuttaa eroja tulostettavaan kappaleeseen. Kappale voi muun muassa kutistua tai vääntyä tulostuksen sekä loppukovetuksen aikana. Tällaiset virheet ovat yleisiä etenkin allasvalopolymeerisaatioon perustuvilla 3D-tulostimilla. (Nestler ym. 2021.) Hazelveld ym. (2014) ovat todenneet, että CAD-suunnitelman muuntaminen stl-tiedostoksi voi aiheuttaa vääristymiä tulostetussa kappaleessa. Opinnäytetyön tutkimuksessa stl-tiedoston

muutokset vaikuttivat kaikkiin tulostuksiin samanlaisesti, koska kaikissa testiryhmissä käytettiin samaa mastermalli-tiedostoa.

2.4 Allasvalopolymerisaatio

Allasvalopolymerisaatio on 3D-tulostustekniikka. Tekniikan tulostimissa on allas nestemäiselle valokovetteiselle muovimateriaalille, josta tulostettava kappale muodostuu. Allasvalopolymerisaatio-tekniikoissa voidaan käyttää eri muovimateriaaleja ja eri valonlähteitä. Muovimateriaalin kovettamisessa voidaan käyttää UV-lasersädettä, UV LED-valoprojektorilla tai -nestekidenäyttöä. Käytettävän valonlähteen perusteella eri allasvalopolymerisaatiotekniikoita ovat laservaloon perustuva stereolitografia (SLA), UV LED-projektorilla toimiva DLP-tekniikka ja UV LED-nestekidenäyttötekniikka (LCD). SLA-tekniikassa käytetään lasersädettä, joka kovettaa tulosteessa laserpisteen kokoisen alueen kerrallaan. DLP- ja LCD-tekniikoissa kovetetaan koko tulostuskerros kerralla. (Diegel ym. 2020; Ortomat Herpola.) Taulukkoon 3 on listattu opinnäytetyöhön valitut tulostimet ja niiden käyttämät allasvalopolymerisaatio-tulostustekniikat.

Laservaloa käyttävässä SLA-tulostusmenetelmässä valonlähde heijastetaan liikkuvan peilin kautta valokovetteisella resiinillä täytettyyn altaaseen. Kun laserilla on kovetettu eli polymeroitu koko tulostuskerros piste pisteeltä, tulostusala nostetaan. Tulostus on valmis, kun koko tulostettava kappale on kovetettu kerros kerrokselta. (Nestler ym. 2021; Ortomat Herpola.) SLA-tulostuksen heikkouksina ovat mahdolliset vääristymät, kuten kutistuminen, jotka syntyvät resiinin kovettuessa muoviksi lasersäteen avulla. Jos kutistuminen on huomattavaa, voivat eri kerrosten eri suuntiin suuntautuvat paineet aiheuttaa tulostettavan kappaleen kiertymistä varsinkin ohuissa ja pitkissä tulostuskappaleissa. (Varotsis 2019.)

DLP-tekniikassa kovetuksessa käytettävä valo heijastetaan tulostusaltaaseen projektorilla. Tällöin koko tulostuskerros kovettuu kerralla. Projektori lähettää keilamaisen valonsäteen tulostusaltaan alta tai sen sivulta, jolloin valo heijastetaan tulostusalaan peilin avulla. Koska projektorin käyttämä pikselimäärä on vakio, tulostettavan kappaleen tarkkuuteen vaikuttaa sen koko. Mitä isompi kappale on,

sitä suurempi on valon vääristymän mahdollisuus. (Ortomat Herpola.) Sherman ym. (2020) totesivat tutkimuksessaan DLP-tekniikan olevan nopeampi tulostustekniikka kuin SLA-tekniikka.

LCD-tekniikassa valo kohdistetaan yhdensuuntaisesti koko tulostusalustalle LED-valoryhmän avulla. Tällöin tulostettavien kappaleiden tulostuslaatuun vaikuttaa vain valonlähteen kuvapisteidien tiheys eli pikselien määrä. Mitä suurempi pikselimäärä, sitä tarkempi on tulostettava kappale. (Alander ym. 2020; Ortomat Herpola.) Tulostuslaatuun ei vaikuta valonsäteiden leviämisestä johtuva pikselivääristymä kuten DLP-tekniikassa. Sen sijaan LED-valoryhmän asettelu vaikuttaa valon voimakkuuden jakautumiseen. Esimerkiksi valojen järjestäminen suorakaitteen muotoon voi johtaa siihen, että valon voimakkuus on tulostusalustan keskellä voimakkaampaa kuin reunoilla. Tällöin tulostusalustan nurkassa kappaleen tulostustarkkuus on heikompi. (Ortomat Herpola.)

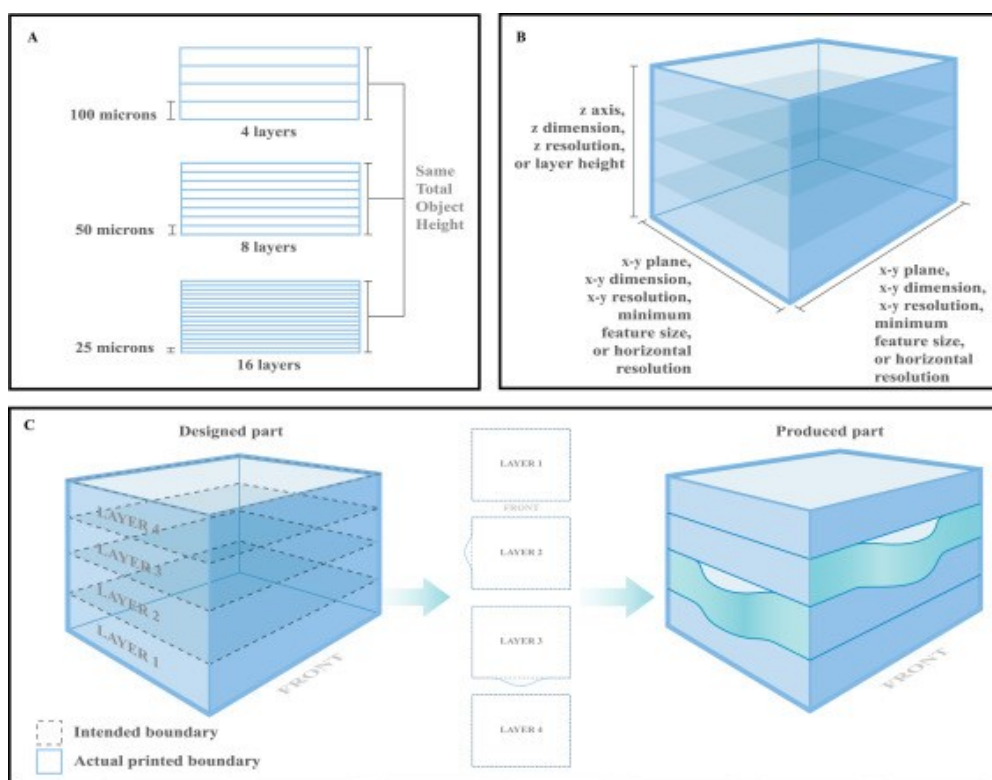
2.5 Tulostusten tarkkuus

Tulostusten tarkkuudella tarkoitetaan tässä tutkimuksessa sitä, kuinka hyvin 3D-tulostetut kappaleet vastaavat digitaalista mallia. Tulostimien tekniset ominaisuudet vaikuttavat pääasiassa resoluutioon ja materiaalin kutistuminen ja vääntyminen vaikuttavat kappaleen tarkkuuteen (Nestler ym. 2021). Allasvalopolymerisätiolla tuotetun kappaleen laatuun vaikuttavat monet parametrit, kuten resoluutio. 3D-tulostuksessa resoluutio voidaan jakaa kahteen osaan, z- ja xy -resoluutioon. (Kuva 1.)

Z-resoluutiolla määritellään kerroksen paksuus eli rakennusalustan tai aiemmin valmistetun kerroksen ja altaan pohjan välinen etäisyys (Kuva 1.) (Arnold ym. 2019). Tämä ilmoitetaan yleensä mikroneina. Mitä pienempi luku, sitä ohuempi on kerrospaksuus. (Nestler ym. 2021.) Tutkimukset ovat osoittaneet, että suurempi eli parempi resoluutio ja pienempi kerrospaksuus eivät välttämättä kaikissa tapauksissa tuota tarkempia tulostuskappaleita. Nostamalla z-resoluutiota eli kerrospaksuuden pienentämisellä voi mahdollisten epätasaisuuksien määrä

kappaleen pinnassa lisääntyä ja nämä epätasaisuudet tekevät tulostetusta kappaleesta epätarkemman. (Favero ym. 2017; Nestler ym. 2021).

Xy-resoluutiolla eli vaakasuuntaisella resoluutiolla tarkoitetaan SLA-tekniikassa lasersäteen halkaisijaa ja DLP- sekä LCD -tekniikoissa pikselikokoa. (Arnold ym. 2019.) Se määrittää pienimmän yksityiskohdan, jonka 3D-tulostin voi yhden kerroksen aikana tehdä. Mitä pienempi on lasersäteen halkaisija tai pikselikoko, sitä tarkemmat yksityiskohdat. (Ortomat Herpola.) Epäjohdonmukainen xy-resoluutio voi tuottaa tulostetun kappaleen pintaan poikkeamia halutusta muodosta, mikä tekee kappaleen pinnasta epätasaisen (Kuva 1.). (Favero ym. 2017; Nestler ym. 2021.)



Kuva 1. Resoluutio. (Favero ym. 2019.)

Tulostettavan kappaleen tarkkuuteen vaikuttavat kutistuminen ja vääntyminen. Yksi syy tähän on resiinin epätäydellinen polymeroituminen tulostusprosessin aikana, minkä vuoksi jälkipolymerointi on tarpeellinen. Tulostetun kappaleen

jälkikäsittelyllä on vaikutusta tulostettavan kappaleen tarkkuuteen ja erityisesti polymerisaatioasteeseen. (Nestler ym. 2021.)

Yleensä allasvalopolymerisaatio-tulostusprosessit ovat automatisoituja ja esimerkiksi tulostusnopeus, kovettumissyvyys sekä energian jakautuminen eli valoteho on asetettu tulostimeen valmiiksi (Unkovskiy ym. 2018). Laitekohtaisesti tulostuksen esivalmisteluja on mahdollista määrittää itse. Tällaisia esivalmisteluja on esimerkiksi kappaleen asento ja sijainti tulostusalustalla sekä mahdolliset tukirakenteet (Unkovskiy ym. 2018; Arnold ym. 2019). Muita tulostukseen vaikuttavia tekijöitä ovat polttokerros, joka kiinnittää kappaleen tulostusalustaan, yksittäisten kerrosten valotusaika sekä tulostusalustan nostonopeus ja tulostusaltaan lämpötila (Arnold ym. 2019). Näihin viimeisiin ei pysty kaikissa tulostimissa vaikuttamaan.

2.6 Nestemäinen fotopolymeeri eli resiini

Allasvalopolymerisaatiossa käytettävät fotopolymeerit ovat muovisekoituksia, jotka koostuvat erimittaisista hiiliketjuista. Hiiliketjuja kutsutaan monomeereiksi ja oligomeereiksi. Monomeeri on pieni molekyyli, joka voi reagoida toisten monomeerien kanssa muodostaen polymeerin. Oligomeeri on muodostunut monomeerien polymerisoitumisen seurauksena. (Aalto-yliopisto 2019.) Allasvalopolymerisaatio perustuu monomeerien ja oligomeerien käyttämiseen valoinitaattoreita (eng. photoinitiator) hyödyntäen nestemäisessä tilassa. Monomeerien ja oligomeerien muodostama nestemäinen resiini voidaan valopolymerisoida altistaen ne eri aallonpituuksilla oleville valonlähteille. (Bagheri & Jin 2019.)

Resiiniin lisättävät täyteaineet eli esimerkiksi pigmentit ja valoinitaattorit vaikuttavat 3D-tulostettavien materiaalien mekaanisiin ominaisuuksiin ja tarkkuuteen (Ling ym. 2022). Jos resiini ja siihen sisällytettyjen täyteaineiden välinen taitekerroin ei sovi yhteen, seurauksena voi olla laservalon siroaminen, mikä puolestaan johtaa kovettumissyvyyden vähenemiseen ja lopullisen kappaleen epätarkkuuksiin (Marcel ym. 2020).

Muovin koostumus ja sen ominaisuudet, kuten viskositeetti, kutistuminen ja mekaaniset ominaisuudet (esimerkiksi kovuus ja taipuminen) vaikuttavat 3D-tulostettujen kappaleiden mittatarkkuuteen (Ling ym. 2022). Resiinin viskositeetin on oltava oikea, jotta se virtaa helposti tulostettavan kappaleen ja altaan pohjan välissä jokaisen kerroksen jälkeen. Riittävät mekaaniset ominaisuudet ovat tärkeitä tarkkuuden sekä hammastekniikassa kliinisen toimivuuden kannalta. Vaatimukset 3D-tulostettavan materiaalin mekaanisille ominaisuuksille vaihtelevat eri hammasteknisten tarkoitusten mukaan. (Marcel ym. 2020.)

2.7 Tarkkuuden mittaaminen

Kirjallisuudessa on todettu, että kruunun hiontarajan istuvuuden tulisi olla 25–100 µm (Johnson ym. 2017, 85–86). Kappaleessa 2.3 esitetyistä kliinisistä raja-arvoista poiketen tässä opinnäytetyössä käytettiin kliinisenä raja-arvona 100 mikronia. Opinnäytetyön ohjaajien kokemukset ovat osoittaneet, etteivät aiemmissa tutkimuksissa käytetyt tarkkuuksien kliiniset raja-arvot ole käytännössä riittävän tarkkoja (Alander, Rakkolainen 6.10.2021).

Aiemmissa tulostustarkkuustutkimuksissa tarkkuuden mittaamiseen on käytetty kädessä pidettävää digitaalista työntömittaa tai tietokoneohjelmistoja. Työntömittoja käytettäessä mittausten toistettavuus on huonoa ja voi tapahtua virheitä (Hazeveld ym. 2014; Sherman ym. 2020). Raukunen (2020) totesi opinnäytetyössään, että työntömitta on luotettava mittausmenetelmä mitattaessa millimetrejä yhden desimaalin tarkkuudella. Tässä tutkimuksessa tarkkuusmittaustulokset esitettiin kolmen desimaalin tarkkuudella.

Hampaiden käyttö mitattavana kohteena tuottaa haasteita muodon ja epäsymmetrian vuoksi. Hampaiden pinnasta on vaikea saada mittauspisteitä, jotka olisivat toistettavissa (Kim ym. 2018). Kuten Kim ym. (2018) ja Nestler ym. (2021) tekivät tutkimuksissaan, tähän tutkimukseen lisättiin tutkittavaan malliin helpommin mitattavia muotoja.

Tutkimuksessa käytettiin tulostustarkkuuden mittaamiseen GOM Inspect- ohjelmistoa. GOM on ohjelmisto, joka on luotu 3D-kappaleiden digitaaliseen

analysointiin ja vertailuun. Ohjelmiston käyttösovellukset ovat laadunvalvon-
nassa, tuotekehityksessä sekä tuotannon tarpeissa. (Gom.) Ohjelmisto on suunniteltu toimimaan parhaimmillaan niin, että skannattuja tiedostoja verrataan alkuperäiseen CAD-malliin. Digitaalisille malleille voidaan tehdä erilaisia pintavertailuja tai päällekkäisiä kohdistuksia, joiden avulla muodostetaan raportteja käyttäjän tarpeen mukaisesti. Ohjelmistosta löytyy ilmaisen version lisäksi maksullinen GOM Inspect Professional -versio. (Gom.) Tutkimuksessa on käytetty GOMin ilmaisversiota.

3 Tutkimuksen tavoite, tarkoitus ja tutkimuskysymykset

Tarkoituksena oli selvittää kappaleen sijainnin merkitystä tulostusalustalla sekä erilaisten allasvalopolymerisaatio-tekniikoiden eroja tarkkuuteen. Tutkittiin onko tulostettavan kappaleen sijainnilla alustan keskellä tai nurkassa merkitystä kappaleen tarkkuuteen. Työn tavoitteena oli tuottaa laadukasta, tutkittua informaatiota työelämää varten.

Toimeksiantajan ehdotuksesta tässä tutkimuksessa tutkittiin tulostimien eroavaisuuksia tarkkuuksissa. Työelämässä 3D-tulostimilla ei aina saada tulostettua riittävän tarkkaa työmallia. Tutkimuksen tarkoitus oli vastata joihinkin kysymyksiin, joihin kirjallisuuskatsauksesta löytyneistä tutkimuksista ei löytynyt vastausta.

Tutkimuskysymyksiksi muodostuivat seuraavat:

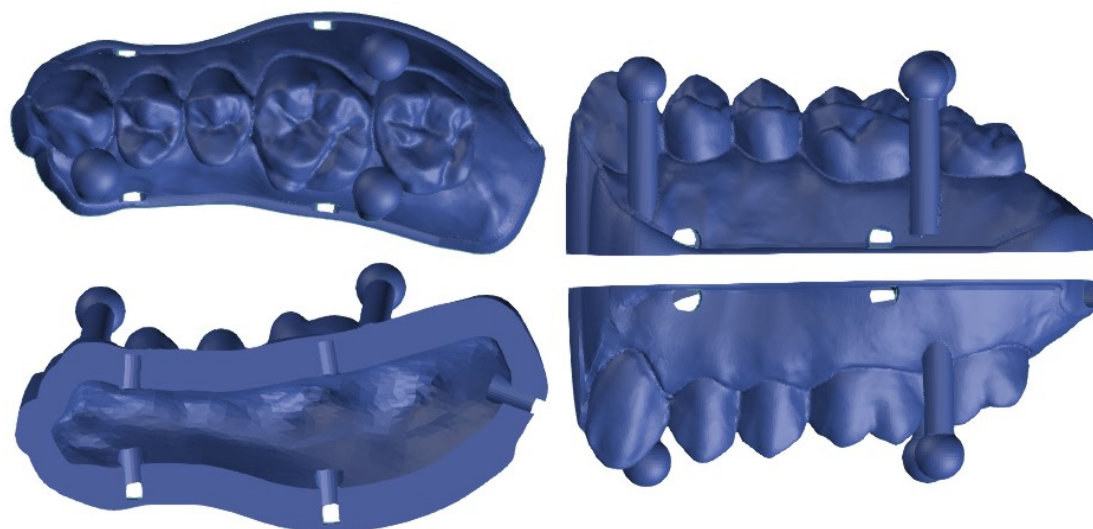
1. Vaikuttaako työmallin sijainti tulostusalustalla työmallin tarkkuuteen?
2. Onko eri allasvalopolymerisaatio-tulostustekniikoilla vaikutusta työmallin tarkkuuteen?

Hypoteesi tutkimukselle:

Erilainen tulostustekniikka ja kappaleen sijainti tulostusalustalla vaikuttavat työmallin tarkkuuteen.

4 Materiaalit ja menetelmät

Digitaalisen mastermallin suunnittelussa käytettiin pohjana hammastekniikan koulutuksessa käytettäviä kiinteän protetiikan kurssin mallihampaita. Mallin lopullinen muoto suunniteltiin käyttäen ohjelmia Autodesk Meshmixer, Autodesk Tinkercad ja 3Shape. Mastermallissa oli kolme palloa tolppien päässä sekä hammaskaaresta neljäsosa sisältäen hampaat 23–27. Kaksi palloista oli hampaiden 26 ja 27 vieressä ja yksi pallo oli d 23 vieressä (Kuva 2.). Mastermalli suunniteltiin ontoksi ja alareunaan lisättiin paineenpoistoaukkoja. Mastermallista tehtiin stl-tiedosto ja kaikissa tulostuksissa käytettiin aina samaa tiedostoa.



Kuva 2. Digitaalinen mastermalli.

Tutkimuksessa oli mukana kuuden (6) eri valmistajan allasvalopolymerisaatio-tulostin. Tulostimilla tulostettiin testikappaleet tulostusalustan keskellä ja nurkassa. Tutkimusryhmät on esitetty taulukossa 1. Jokaiseen tutkimusryhmään tulostettiin 10 testikappaletta ja tutkimuksessa oli 12 ryhmää ($n = 120$). Tutkimuksessa käytetyt allasvalopolymerisaatio-tekniikat olivat laservaloon perustuva stereolitografia (SLA), UV LED -projektorilla toimiva DLP-tekniikka ja UV LED -nestekidenäytötekniikka (LCD). Tekniikat on esitetty kappaleessa 2.4. Tutkimuksessa käytetyt

3D-tulostimet ja niiden tekniikat on listattu taulukossa 2. Taulukon tekniset tiedot on saatu tulostimien edustajilta.

Testikappaleet nimettiin koodauksella, josta selviää tulostin (F = Form 2, P = P30, S = SprintRay Pro 95, A = Asiga UV MAX 385, C = Planmeca Creo C5, L = Prototyyppi), tulostusjärjestys (tulostuksen järjestysnumero 01–10) sekä sijainti tulostusalustalla (K = keskellä alustaa, N = alustan oikeassa ylänurkassa). Koodi merkittiin mallin pohjaan tussilla. Esimerkiksi F08N tarkoittaa Form2-tulostimella kahdeksantena nurkassa tulostettua kappaletta.

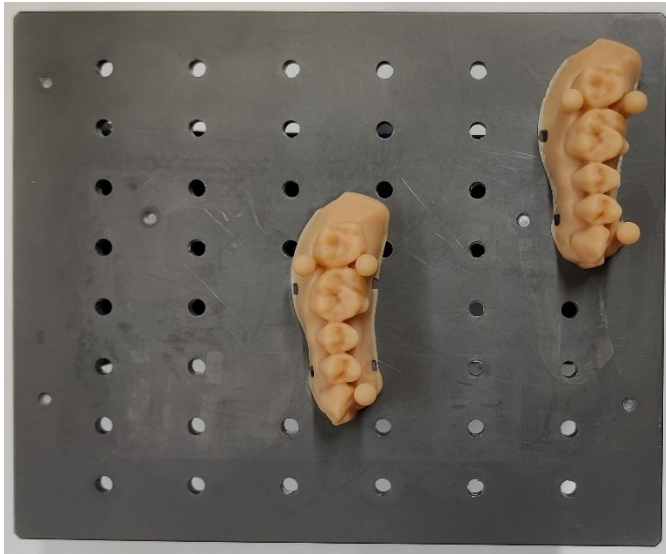
Taulukko 1. Tutkimusryhmät.

Tulostin / tulostuspaikka alustalla	Keskellä	Oikea yläkulma
Form 2	Ryhmä 1	Ryhmä 7
P30	Ryhmä 2	Ryhmä 8
SprintRay Pro 95	Ryhmä 3	Ryhmä 9
Asiga UV MAX 385	Ryhmä 4	Ryhmä 10
Planmeca Creo C5	Ryhmä 5	Ryhmä 11
Prototyyppi	Ryhmä 6	Ryhmä 12

Taulukko 2. 3D-tulostimet.

TULOSTIN	Form 2	P30	SprintRay Pro 95	Asiga UV MAX 385	Planmeca Creo C5	Proto-tyyppi
valmistaja	Formlabs	Straumann (pohjautuu RapidShape D30-tulostimeen)	SprintRay	Asiga	Planmeca	-
tekniikka	SLA	DLP	DLP	DLP	LCD	LCD
tulostus- alusta, koko (mm)	145x145x175	130x75	182x102x200	119x67x75	128x81x100	192x120
valonlähde, resoluutio	Laser spot 140 µm	385 nm UV LED pikselikoko 34 µm	405 nm LED pikselikoko 95 µm	385 nm UV LED pikselikoko 62 µm	405 nm UV LED xy-resoluutio 50µm	405 nm LED xy- resoluutio 50µm
valolähteen sijainti	Lasersäde heijastuu peilien kautta	Alustan alla	Alustan alla	Takana, heijastuu peilien kautta	Alustan alla	Alustan alla

Testikappaleet aseteltiin CAM-ohjelmistossa tulostusalustalle, yksi testikappale alustan keskelle ja yksi alustan oikeaan ylänurkkaan (Kuva 3.). Digitaalinen mastermalli aseteltiin CAM-ohjelmistossa alustalle 0° kulmaan ilman tukia tai pohjia. Kerrospaksuudeksi asetettiin 50 µm. Asettelusta tehtiin tiedosto jokaisella tulostimella käytössä olevalla CAM-ohjelmistolla ja eri tulostuskerroilla käytettiin aina samaa tiedostoa jokaisella tulostinmerkillä. Tulostus toistettiin kymmenen kertaa. Aikataulullisista syistä Creolla ja prototyyppillä käytettiin kahta eri tulostinta, jotka olivat malliltaan samat. Lopullisten testikappaleiden määrä tulostinryhmää kohden oli 20 kappaletta (10 keskellä, 10 nurkassa).



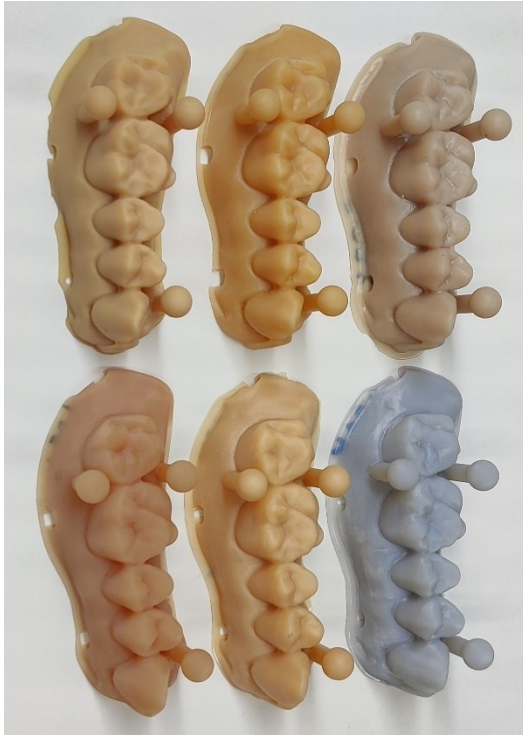
Kuva 3. Asettelu tulostusalustalla.

Form 2- ja P30 -tulostimet sijaitsivat Turun ammattikorkeakoulussa hammasteknikkokoulutuksen tiloissa. SprintRay-, Asiga-, Creo- ja prototyyppi -tulostimet sijaitsivat ulkopuolisten toimijoiden tiloissa. Tutkimuksen tekijät tulostivat itse testikappaleet Form 2-, P30- sekä Creo -tulostimilla. SprintRayn, Asigan sekä prototyyppin tulostimilla tulostuksen suoritti laitteen edustaja ohjeistuksen mukaisesti.

Testikappaleita tulostaessa kriteerinä oli kymmenen onnistunutta tulostusta. Jos alustasta irrotettaessa malli meni rikki tai mallista näki selvästi, että tulostus oli epäonnistunut, tulostus tehtiin uudelleen. Testikappaleen rikkoutumisen rajana oli hammasalue, pallojen tolpat sekä pallot. Muiden alueiden halkeamien ei katsottu haittaavan mittaustulosten tekemistä. Lisäksi syvällä fissuuroiden pohjilla olevien pienien ilmakuplien ei katsottu olevan merkittäviä, sillä skannerin valo ei ulotu niin pieniin väleihin.

Jokaisella tulostimella käytettiin materiaaleja, joita valmistaja suosittelee hammasteknisten mallien tulostukseen (Kuva 4., Taulukko 3.). Testikappaleiden jälkikäsittely tehtiin kunkin materiaalin tai tulostimen edustajalta saadun ohjeistuksen mukaisesti (Taulukko 5.). Tulostuksen jälkeen testikappaleet pestiin joko isopropanolilla, etanolilla tai Imprimio® Cleaning Liquid -nesteellä ultraäänilaitteessa tai pesulaitteessa valmistajan ohjeiden mukaan. Pesuaika vaihteli 3–10

minuutin välillä. Ensimmäisen pesun jälkeen testikappaleet pestiin puhtaamassa nesteessä 5–6 minuuttia. Pesujen jälkeen testikappaleet kuivattiin ja laitettiin loppukovetuslaitteeseen. Loppukovetuksen aika vaihteli 5–30 minuuttiin. Koulun tiloista ei löytynyt P30-tulostimessa käytetyn materiaalin valmistajan ohjeiden mukaista loppukovetuslaitetta, joten P30-testikappaleiden loppukovetus suoritettiin koulussa olevalla valokovettajalla materiaalin ohjeistuksesta poiketen.



Kuva 4. Käytetyt tulostusmateriaalit. Ylävasemmalta Model V2 Resin, P pro Master Model, Die and Model 2, alavasemmalta KeyModel®, FotoDent®, TR250LV.

Taulukko 3. Käytetyt materiaalit.

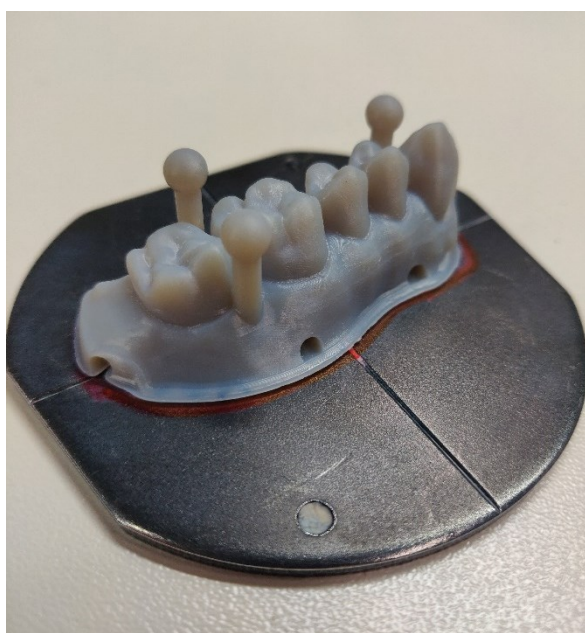
TULOSTIN	Form 2	P30	SprintRay Pro 95	UV MAX 385	Planmeca Creo C5	prototyyppi
käytetty tulostus- materiaali, erätunnus/- nro valmistus- maa	Model V2 Resin, Formlabs, 20210408 20221008 USA	P pro Master Model (dark beige), Deltamed GmbH, 202868A Saksa	Die and Model 2 (tan), SprintRay, S21I08T2 USA	KeyModel®, KeyPrint®, Keystone® Industries KF2441 USA	FotoDent® model2 (beige), Dreve, 109022X0 Saksa	TR250LV (gray), Phrozen, 76255 USA

Taulukko 4. Jälkikäsittely.

TULOSTIN	Form 2	P30	SprintRay Pro 95	UV MAX 385	Planmeca Creo C5	prototyyppi
pesulaite	Form Wash	Form Wash	Pro Wash/Dry	Rapid Shape RS Wash	BioSonic® UC50DB	L&R T14
pesu 1 (aika / käytetty aine)	5 min. / IPA	5 min. / IPA	5 min. / IPA	valmis ohjelma / Imprimo® Clening Liquid	5 min. / Industol PE 2	10 min. / IPA
pesu 2 (aika / käytetty aine)	5 min. / IPA	5 min. / IPA 2 min. oksidi- keroksen poisto kovetuksen jälkeen	5 min. / IPA	valmis ohjelma / IPA	5 min. / Industol PE 2	6 min. / IPA
kuivaus	kunnes kuiva	30 min.	kuivaus tapahtuu pesurissa	kunnes kuiva	kunnes kuiva	kunnes kuiva
loppu- kovetus- laite	Form Cure	Form Cure	ProCure	Rapid Shape RS cure	PCU LED	Nextdent
loppu- kovetus (aika / läm- pötila)	30min. / 60°C	6 min.	20 min.	5 min. / vakuumi	8 min. / vakuumi	10 min.

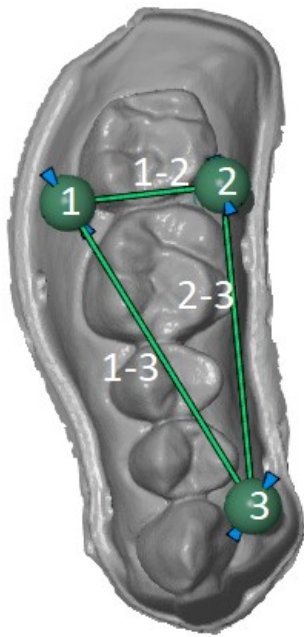
Kaikki testikappaleet skannattiin seitsemän (7) päivän sisällä tulostuksesta hammasteknikkokoulutuksen 3Shape E2 -skannerilla (3Shape, Kööpenhamina, Tanska). Skannerin tarkkuus oli 10 µm (3Shape). Skannerin skannauslevyn keskelle piirrettiin testikappaleen ääriiviiva. Ääriviivan avulla kaikki testikappaleet olivat samassa paikassa skannatessa (Kuva 5.). Testikappaleet kiinnitettiin alustaan muovailuvahalla. Muovailuvaha asetettiin testikappaleen sisälle niin, että pohja oli tiiviisti alustaa vasten. Tässä tutkimuksessa ei käytetty skannausspraytä, sillä tasaisen kerroksen saaminen kappaleen pinnalle voi olla hankalaa.

Skannauksessa käytettiin 3Shape-ohjelmistoa, jossa tehtiin ”työtilaus” aina ennen testikappaleen skannausta. Ohjelmassa valittiin hammaskaarelta testikappaleessa olevat hampaat ja ne merkittiin kokoanatomisiksi kruunuiksi. Materiaaliksi valitsimme PMMA:n. Ohjelmiston annettiin tehdä normaali skannaus sekä yksi lisäskannaus Fast Adaptive Scanning -toiminnolla.



Kuva 5. Skannauslevylle asettelu.

Skannatut stl-tiedostot analysoitiin ja verrattiin digitaaliseen mastermalliin GOM-ohjelmistossa. Kappaleista mitattiin jokaisen pallon halkaisija sekä pallojen väliset etäisyydet pallon keskipisteestä (Kuva 6.). Kaikki tulokset tilastoitiin Microsoft Exceliin kolmen desimaalin tarkkuudella.

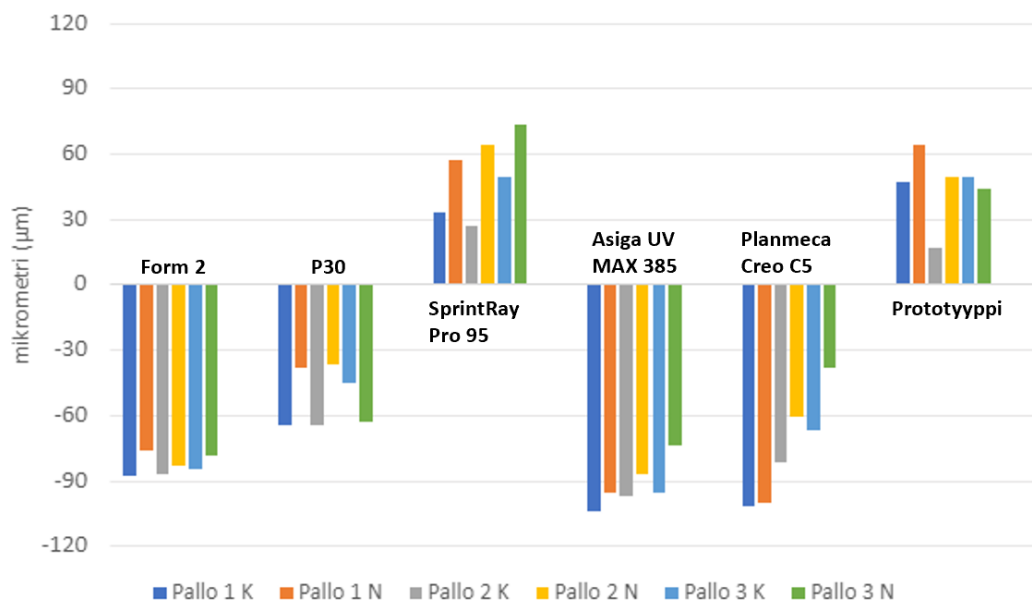


Kuva 6. Pallojen ja etäisyyksien numerointi testikappaleella. Numerot 1, 2, ja 3 kuvaavat palloja ja välit 1–2, 1–3 ja 2–3 pallojen etäisyyksiä. (Kuva otettu Gomitista.)

SPSS-ohjelmistossa ANOVA-analyysillä laskettiin sijainnin tilastollinen merkittävyys. Jokaisen tulostimen p-arvot kuvaavat ryhmien (sijainti keskellä ja nurkassa) välisten erojen tilastollista merkittävyyttä. Kun p-arvo on pienempi kuin yleisesti raja-arvona pidetty 0,05, ryhmien välillä on merkitseviä eroja. Analyysin tulokset on taulukoitu liitteessä 2 (Taulukko 6 ja 7).

5 Tulokset

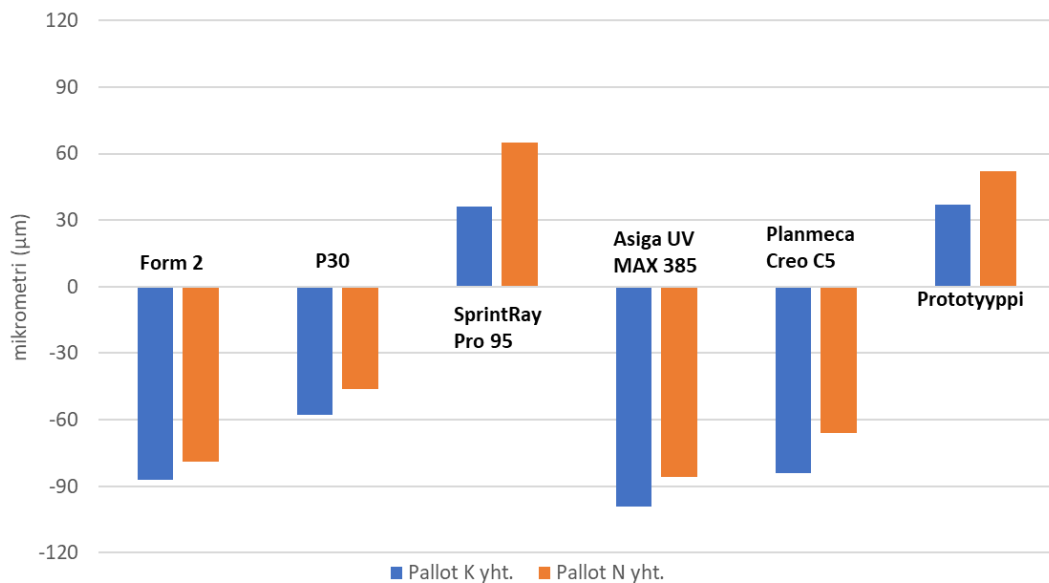
Digitaalisen mastermallin kaikkien pallojen halkaisijat olivat 4,988 mm. Tarkat tarkkuusmittaustulokset löytyvät liitteestä 1 (Taulukko 5). SprintRay ja prototyyppi -tulostimilla tulostettujen testikappaleiden pallojen halkaisijat olivat isompia kuin mastermallin. Form 2-, P30-, Asiga- ja Creo -tulostimilla testikappaleiden pallojen halkaisijat olivat pienempiä kuin mastermallissa. Suurimmat pallot tulostuivat SprintRayn tulostimella. Pallojen halkaisijoiden erot mastermalliin vaihtelivat välillä 27–73 μm . Pienimmät pallot tuli Asigan tulostimella. Pallojen halkaisijoiden erot mastermalliin vaihtelivat välillä -104 – -74 μm . (Kuvio 1.)



Kuvio 1. Tulostettujen testikappaleiden pallojen halkaisijoiden keskiarvojen ero digitaalisen mastermallin pallojen halkaisijoihin (0-taso mastermallin pallon halkaisija, K = keskellä, N = nurkassa).

SprintRayn ja prototyypin tulostuksissa keskellä olleissa malleissa pallot olivat kooltaan lähempänä mastermallin pallojen halkaisijoiden kokoa. Form 2-, P30-, Asiga- ja Creo -tulostimilla tulostetuissa testikappaleissa nurkassa olleissa malleissa pallot olivat lähempänä mastermallin pallojen kokoa. Vähiten eroja nurkan ja keskellä olevien pallojen halkaisijoiden välillä oli Form 2 -tulostuksien testikappaleissa, vaihteluväli oli 12 μm . (Kuvio 1.)

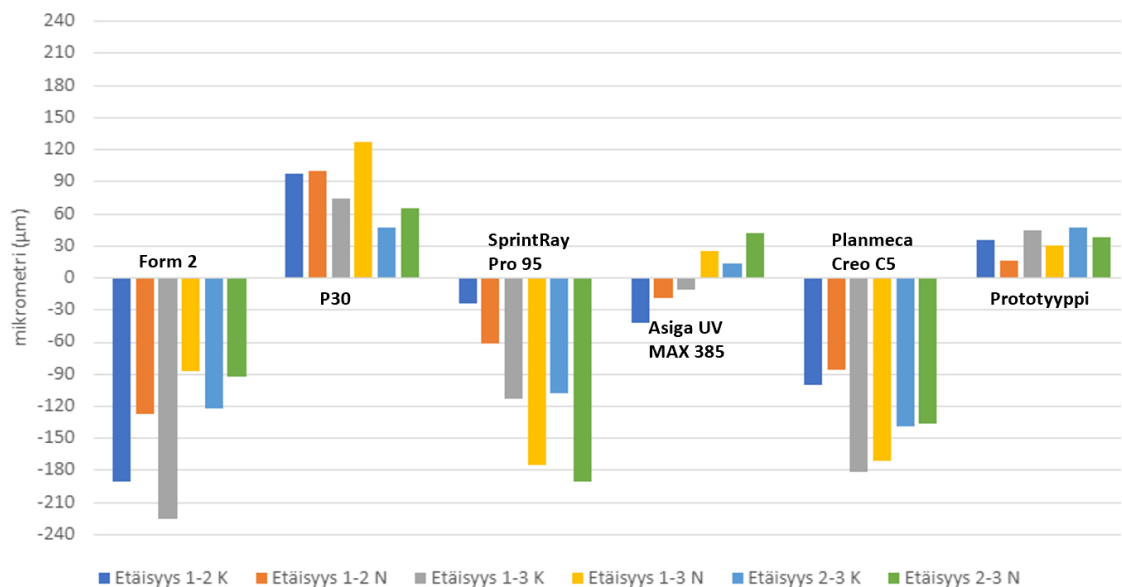
Vertailtaessa kaikkien pallojen halkaisijoiden keskiarvoja, saatiin samansuuntaiset tulokset kuin yksittäisten pallojen halkaisijoiden mittauksissa (Kuvio 1.). Form 2-, P30-, Asiga- ja Creo -tulostuksissa nurkassa olleiden testikappaleiden pallot olivat lähempänä mastermallin pallojen halkaisijoiden kokoa. SprintRayn ja prototyypin tulostuksissa keskellä olleiden testikappaleiden pallot olivat lähempänä mastermallin pallojen halkaisijoiden kokoa. (Kuvio 2.)



Kuvio 2. Tulostettujen testikappaleiden kaikkien pallojen (1, 2 ja 3) halkaisijoiden keskiarvon ero digitaalisen mastermallin pallojen halkaisijoihin (0-taso mastermallin kaikkien pallojen halkaisija).

Kaikilla tulostimilla keskellä olevien tulosteiden pallojen halkaisijat ovat pienempiä, kuin nurkassa tulostettujen testikappaleiden pallot. Pallojen halkaisijoiden keskiarvoja vertailtaessa nähtiin, että SprintRayn keskellä olevan testikappaleen pallojen halkaisijoiden koko oli lähimpänä mastermallin pallojen halkaisijoiden kokoa (ero mastermalliin 36 μm). Verrattaessa keskellä ja nurkassa tulostettuja testikappaleita SprintRayn tulostetuissa testikappaleissa oli suurin ero kaikkien pallojen halkaisijoissa (ero 29 μm). Pienin ero kaikkien pallojen halkaisijoissa verrattaessa keskellä ja nurkassa tulostettuja testikappaleita oli Form 2 -testikappaleissa (ero 8 μm). (Kuvio 2.)

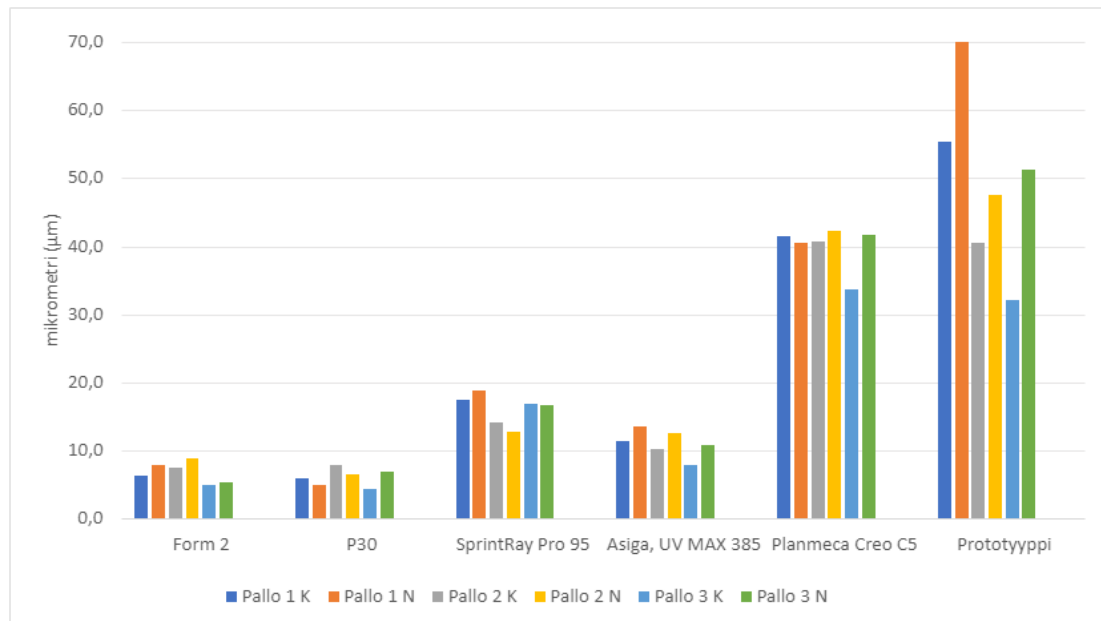
Digitaalisessa mastermallissa pallojen keskipisteiden etäisyydet olivat 13,601 mm (väli 1–2), 28,160 mm (2–3) ja 31,145 mm (1–3). Tarkat tarkkuusmittaustulokset löytyvät liitteestä 1 (Taulukko 5). Tulostimista P30 ja prototyyppi tulostivat testikappaleita, joiden pallojen etäisyydet olivat pidempiä kuin mastermallin pallojen etäisyydet. Form 2-, SprintRay- ja Creo -tulostimissa pallojen etäisyydet olivat lyhyemmät kuin mastermallissa. Asigan testikappaleista löytyi sekä lyhyempiä että pidempiä pallojen etäisyyksiä verrattaessa mastermalliin. (Kuvio 3.)



Kuvio 3. Tulostettujen testikappaleiden pallojen etäisyyksien keskiarvojen erot digitaaliseen mastermalliin (mastermalli 0-arvo).

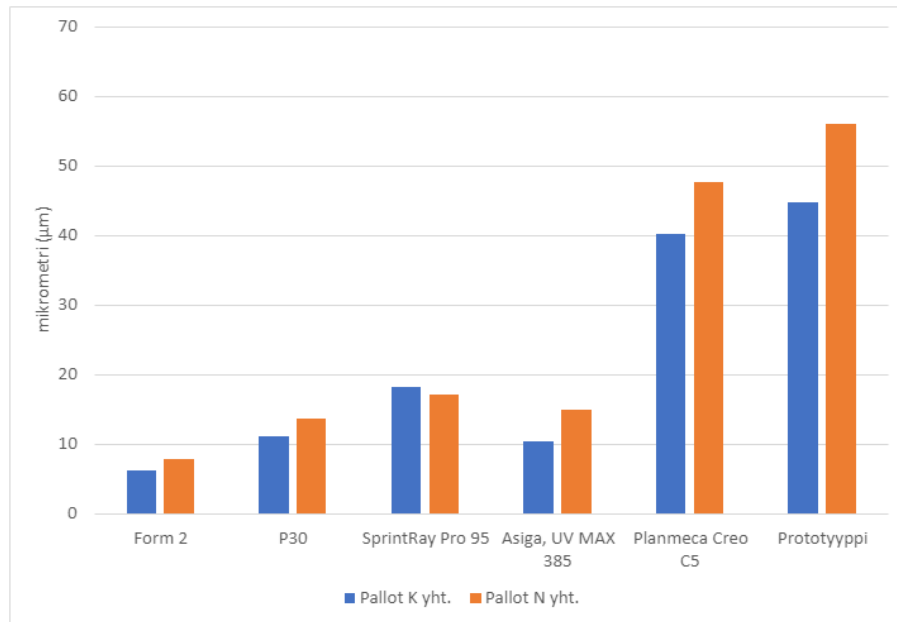
Asigan ja prototyypin testikappaleissa pallojen etäisyydet olivat lähimpänä mastermallia niin keskellä kuin nurkassa. Form 2- ja Creo -tulostuksissa testikappaleiden pallojen etäisyydet olivat nurkassa lähempänä mastermallia kuin keskellä tulostetuissa testikappaleissa eli pallojen etäisyydet olivat nurkassa pidempiä kuin keskellä tulostetuissa testikappaleissa. P30- ja SprintRay -tulostuksissa keskellä tulostetuissa testikappaleissa pallojen etäisyydet olivat lähimpinä mastermallin pallojen etäisyyksiä. Asigalla tulostetuissa testikappaleissa pallojen etäisyyksistä ei ilmennyt selkeästi olivatko keskellä vai nurkassa tulostetut testikappaleet tarkempia. Prototyypin nurkassa tulostetuissa testikappaleissa pallojen etäisyydet olivat lyhyemmät eli lähempänä mastermallin pallojen etäisyyksiä kuin keskellä tulostetuissa testikappaleissa. Creolla tulostetuissa testikappaleissa oli

pienimmät erot pallojen etäisyyksissä nurkassa ja keskellä tulostettujen testikappaleiden välillä. (Kuvio 3.)



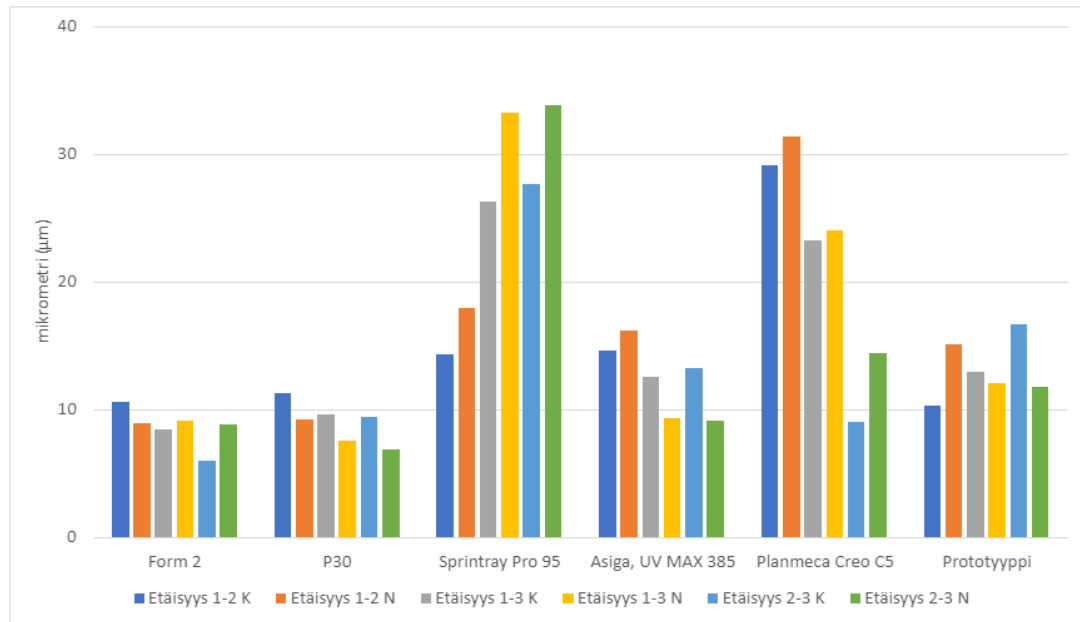
Kuvio 4. Tulostettujen testikappaleiden pallojen halkaisijoiden keskihajonnat.

LCD-tulostimissa (Creo ja prototyyppi) pallojen halkaisijoiden kokovaihtelu oli suurinta eli toistettavuus oli heikointa. Form 2- ja P30 -tulostimissa keskihajonnat olivat pienimmät, alle 10 µm. Form 2-, Asiga- ja prototyyppi -tulostimilla pallojen halkaisijoiden keskihajonnat olivat suurempia nurkassa tulostetuissa testikappaleissa. P30-, SprintRay- ja Creo -tulostuksissa keskihajonnat eivät olleet johdonmukaisia. Esimerkiksi P30-tulostimella pallojen 1 ja 2 keskihajonnat olivat pienemmät nurkassa tulostetuissa testikappaleissa, kun taas pallon 3 pienimmät keskihajonnat olivat keskellä tulostetuissa testikappaleissa. (Kuvio 4.)



Kuvio 5. Tulostettujen testikappaleiden kaikkien pallojen halkaisijoiden keskihajonnat.

Keskellä tulostettujen testikappaleiden kaikkien pallojen keskihajonnat olivat pienemmät kuin nurkassa tulostetuissa testikappaleissa. Poikkeuksena oli SprintRay, jossa kaikkien pallojen keskihajonnat olivat hieman pienemmät nurkassa tulostetuissa testikappaleissa kuin keskellä tulostetuissa testikappaleissa. Vertailtaessa kaikkien pallojen halkaisijoiden keskihajontoja yksittäisten pallojen halkaisijoiden keskihajontoihin, saatiin samansuuntaiset tulokset. (Kuvio 5.)



Kuvio 6. Tulostettujen testikappaleiden pallojen etäisyyksien keskihajonnat.

Form 2- ja P30 -tulostimilla pallojen etäisyyksien keskihajonnat olivat pienimmät, suurimmillaan 11 μm . Keskihajonta pallojen etäisyyksissä oli suurinta SprintRayn ja Creon tulostuksissa. P30-tulostuksissa keskihajonnat olivat isompia keskellä olevissa malleissa. SprintRayn ja Creon tulostuksissa testikappaleissa keskihajonnat olivat suuremmat nurkissa olevissa malleissa. Form 2-, Asiga- ja prototyypin -tulostuksissa keskihajonnat eivät olleet johdonmukaisia pallojen etäisyyksissä. Esimerkiksi Form 2 -tulosteissa pallojen etäisyyksien, 1–3 ja 2–3, keskihajonnat olivat keskellä tulostetuissa testikappaleissa pienemmät, kun taas pallojen 1–2 etäisyyden keskihajonta oli nurkassa pienempi. (Kuvio 6.)

6 Pohdinta

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko kappaleen sijainnilla tulostusalustalla vaikutusta kappaleen tarkkuuteen. Tutkimme kolmea erilaista allasvalopolymerisaatio-tulostustekniikkaa ja niiden tarkkuutta kuuden (6) erilaisen tulostimen avulla. Tutkimuksen tarkoituksena ei ollut asettaa tutkimuksessa käytettyjä tulostimia paremmuusjärjestykseen. Testikappaleet tulostettiin tulostusalustan keskellä ja oikeassa yläkulmassa, jonka jälkeen testikappaleet skannattiin ja vertailtiin digitaalisesti tietokoneohjelmiston avulla.

Kun tarkkuustutkimustuloksia verrattiin tässä opinnäytetyössä asetettuun kliiniseen raja-arvoon, kaikkien tulostimien pallojen halkaisijoiden keskiarvot täyttivät asetetun 100 μm kliinisen raja-arvon. SprintRayn keskellä tulostettujen testikappaleiden kaikkien pallojen halkaisijoiden keskiarvot olivat lähimpänä mastermallia (36 μm) (Kuvio 2., Taulukko 5.). Asigan keskellä tulostettujen testikappaleiden kaikkien pallojen halkaisijoiden keskiarvot olivat kauimpana mastermallista (99 μm). Vertailtaessa sekä keskellä että nurkassa tulostettuja testikappaleita, prototyyppi-tulostimen testikappaleiden kaikkien pallojen halkaisijoiden välillä oli vähiten eroa mastermalliin ($K = 37 \mu\text{m}$, $N = 52 \mu\text{m}$). Tarkasteltaessa yksittäisten pallojen halkaisijoiden keskiarvoja, kliinisen raja-arvon ylitti Asigan (-104 μm) ja Creon (-102 μm) pallo 1K (Kuvio 1.).

Pallojen etäisyyksiä tarkasteltaessa vain kaksi tulostinta täytti opinnäytetyössä asetetun kliinisen raja-arvon. Asigalla mittaustulosten erot mastermalliin olivat -11–42 μm ja prototyyppillä 15–47 μm . Muiden tulostimien testikappaleiden arvot jäivät kliinisen raja-arvon ulkopuolelle. P30-tulostimen pallojen etäisyyksien arvojen erot (46–127 μm) mastermalliin olivat Sherman ym. (2020) tutkimuksessa esille tuodun tiukemman kliinisen raja-arvon sisällä (10–150 μm). Form 2-, SprintRay- ja Creo -tulostimien pallojen etäisyyksien arvojen erot mastermalliin olivat laajimman kliinisesti hyväksyttävän raja-arvon sisällä (160–300 μm) (Taulukko 5.).

Opinnäytetyössä oli yhteensä kuusi mittauskohdetta, kolme pallon halkaisijaa (3/6) ja kolme pallojen etäisyyttä (3/6). P-arvoja laskettaessa Form 2- ja P30 -

tulostimilla 5/6 mittauskohteista löytyi tilastollista merkittävyyttä. SprintRay-tulostimella puolestaan jokaisesta mittauskohteista (6/6) löytyi tilastollista merkittävyyttä. Asiga-tulostimella tilastollista merkittävyyttä löytyi 4/6 mittauskohteista. Creo-tulostimella mittauskohteista (0/6) ei löytynyt tilastollista merkittävyyttä. Prototyyppi-tulostimella tilastollista merkittävyyttä oli 2/6 mittauskohteista. Taulukoinnit löytyvät liitteestä 2. (Taulukko 6 ja 7.)

Tutkimuskysymyksiin ei saatu selkeää vastausta. Tulostettujen testikappaleiden sijainnilla tulostusalustalla ei ollut yhtenäistä linjaa pallojen halkaisijoiden ja etäisyyksien suhteen. Tuloksien avulla pystyttiin kuitenkin osoittamaan Form 2- ja Creo -tulostimien osalta, että pallojen halkaisijat ja pallojen etäisyydet olivat nurkassa tulostetuilla testikappaleilla lähempänä mastermallin mittoja. SprintRaylla puolestaan keskellä tulostetuissa testikappaleissa mitat olivat lähempänä mastermallin mittoja. P30-, Asiga- ja prototyyppi -tulostimien testikappaleista ei voitu tehdä samanlaista johtopäätöstä (Kuvio 2 ja 3).

Tutkimuksen nurkassa olleiden testikappaleiden pallojen halkaisijat olivat isompia kuin keskellä tulostettujen testikappaleiden pallojen halkaisijat kaikilla tulostimilla. Osassa tulostimia (SprintRay ja prototyyppi) nurkassa olevien pallojen etäisyydet olivat pienempiä kuin keskellä tulostettujen testikappaleiden pallojen etäisyydet, joten ei voida todeta, että nurkassa tulostetut testikappaleet olisivat symmetrisesti suurempia. Tämä voi johtua siitä, että tulostimet eivät tulosta symmetrisesti kappaleita, vaan vääristävät mittoja x- tai y -akselilla. Lisäksi tulostusprosessin ja loppukovetuksen aikana voi tapahtua kappaleen vääntymää.

Form 2-, P30- ja Asiga -tulostimilla tulostetuilla testikappaleilla keskihajonnat pallojen halkaisijoissa ja pallojen etäisyyksissä ovat samankaltaiset. Kahdella tulostinmerkillä (Creo ja prototyyppi) tulostukset tehtiin kahdella erillisellä, mutta samanlaisella tulostimella. Näissä testikappaleissa keskihajonta oli suurempaa. Nämä hajonnat toivat esille, että tulostusten tarkkuudessa voi olla eroja samantyyppisten tulostimien välillä.

Vertailtaessa tätä tutkimusta aiemmin tehtyihin tutkimuksiin löytyi poikkeavia tuloksia. Sherman ym. (2020) totesivat tutkimuksessaan, että tulostetut kappaleet

olivat isompia tulostusalustan keskellä kuin nurkassa niin halkaisijoissa kuin etäisyyksissä. Sherman ym. käyttivät tutkimuksessaan DLP-tekniikan JUELL 3D-tulostinta. Tässä tutkimuksessa käytetyillä DLP-tulostimilla (P30, SprintRay, Asiga) saatiin testikappaleen mittapisteiden etäisyyksissä yhtenevää dataa Shermanin ym. tulosten kanssa eli etäisyydet olivat suuremmat tulostusalustan keskellä tulostetuissa testikappaleissa. Pallojen halkaisijat taas antavat ristiriitaista informaatiota, sillä P30- ja Asiga -tulostimilla tulostetut testikappaleet ovat suurempia tulostusalustan nurkassa. Arnold ym. (2019) totesivat tutkimuksessaan ettei tulostettavan kappaleen sijainnilla tulostusalustalla ole vaikutusta tarkkuuteen. Tämä tutkimus tuotti osittain vastakkaisia tuloksia, sillä testikappaleiden eri sijainneilla tulostusalustalla saatiin aikaan erilaisia muutoksia tulostustarkkuuksissa.

Mahdollisia syitä testikappaleiden epätarkkuuksiin voi olla useita. Yksi syy voi olla resiinin kovettuessa mahdollisesti tapahtuva muovin vääristyminen tai kutistuminen. Toinen syy voi olla eri allasvalopolymerisaatio-tulostustekniikoiden ominaispiirteet. SLA-tekniikassa laseria ohjataan peilien avulla. Laserin valo kulkee pisimmän matkan tulostusalustan nurkkiin, mikä voi aiheuttaa vääristymää tulostuskappaleessa. DLP-tekniikassa pikselivääristymä ja LCD-tekniikassa valon voimakkuus voi aiheuttaa suuremman mahdollisuuden tulostuskappaleen vääristymälle tulostusalustan nurkissa.

Luonnosta ei löydy matemaattisesti täydellistä symmetriaa (Toivola & Härkönen, 23). Pallo ei ole koskaan symmetrinen, joten tarkkaa tai luotettavaa mittausta ei voida saada käsin tehdyillä mittauksilla. Käytimme tutkimuksessa kuitenkin palloa mittauskappaleena, koska esimerkiksi kuution terävien kulmien skannaus olisi ollut epätarkkaa käytössämme olleella skannerilla. Testikappaleiden pallojen halkaisijoiden keskiarvot saatiin tietokoneohjelmiston avulla, joten mitat saatiin käyttäjästä riippumattomina.

Tulostimia ei voida vertailla keskenään, sillä niiden välillä oli paljon muuttujia. Tulostimien käyttöikää ei kontrolloitu, pitkä käyttöikä voi vaikuttaa esimerkiksi valon tehoon. Myös tulostusalustojen ja -alaiden käyttöiät vaihtelivat. Kaikissa tulostimissa oli eri materiaali, eikä kaikkien materiaalien käyttöönottohetkeä pystytty toteamaan. Lisäksi jokaisella materiaalilla oli omat käyttösuositukset, kuten tukien

käyttö, jotka jätettiin tässä tutkimuksessa huomioimatta johtuen tutkimusasetelmasta. Yhtenä muuttujana oli tulostusalustojen eri koot, mikä voi vaikuttaa tulostettavien kappaleiden tarkkuuteen.

Tutkimuksessa ei voitu vertailla tulostustekniikoita ja niiden tuloksia keskenään, sillä DLP- ja LCD -tekniikan tulostimien tuloksissa oli ristiriitaisia eroja. Esimerkiksi P30-tulostin tulostaa halkaisijoiltaan pienempiä palloja ja SprintRay suurempia palloja kuin mastermalli, vaikka molemmat käyttävät DLP-tekniikkaa. Form 2 oli ainoa SLA-tulostin. Nämä tiedot huomioiden, emme voi vastata tutkimuskysymykseen tulostustekniikoiden erojen vaikutuksesta tulostustarkkuuteen.

Opinnäytetyön jatkotutkimuksena voisi tutkia materiaalin vaikutusta tuloksiin. Tarkkuuksia mitattaisiin samoilla tulostimilla käyttäen samaa materiaalia kaikissa tulostimissa. Näin saataisiin rajattua pois tässä tutkimuksessa ollut iso muuttuja. Toinen mielenkiintoinen tutkimusaihe olisi kappaleen erilaisten säilytysolosuhteiden vaikutus kappaleen tarkkuuteen. 3D-tulostus on hammasteknisellä alalla nopeasti kehittyvä osa-alue, joten uusien tutkimuksien tekeminen on tarpeellista.

7 Luotettavuuden ja eettisyyden tarkastelu

Tietoperustaa luodessa huomioitiin eettisyys ja tieteellisen tutkimuksen vaatimukset. Tietoperustan lähteenä käytettiin tuoretta ja tieteellistä tutkimustietoa ja muita soveltuvia lähteitä. Opinnäytetyön testausvaihetta tehdessä noudatettiin rehellistä, tarkkaa ja huolellista työskentelytapaa.

Kaikki testikappaleet tulostettiin samasta stl-tiedostosta ja jokaisen tulostimen kohdalla käytettiin samaa CAM-asettelua. Kaikki tulostetut testikappaleet tehtiin noudattaen mahdollisimman tarkasti materiaalien valmistajien ohjeita kaikissa työvaiheissa ja tulostusresiniin käyttökelpoisuus tarkistettiin. Tulostetut testikappaleet muutettiin stl-tiedostoksi käyttämällä samaa skanneria asetuksia muuttamatta, näin minimoitiin vääristymien mahdollisuus. Muuttujien määrä testausvaiheessa pyrittiin pitämään mahdollisimman pienenä, yhtenäisten, vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi. Tutkimuksessa saadut mittaustulokset mitattiin tietokoneohjelmistolla ihmisestä riippumattomilla valinnoilla.

Tulostettujen testikappaleiden vertailussa syntyneisiin tuloksiin suhtauduttiin puolueettomasti ja ne myös esitettiin niin. Tuloksia ei vääristelty ja tulostuksissa ilmenneet muuttujat pyrittiin kuvaamaan mahdollisimman selkeästi. Tuloksia verrattiin muihin vastaaviin julkaistuihin tutkimuksiin.

8 Yhteenveto

Tulostettujen testikappaleiden sijainnilla tulostusalustalla ei ollut yhtenäistä linjaa pallojen halkaisijoiden ja etäisyyksien suhteen. Kaikkien tulostimien nurkassa tulostettujen testikappaleiden pallojen halkaisijat olivat suurempia, mutta eivät aina tarkempia, kuin keskellä tulostetuissa testikappaleissa. Kaikkien tulostimien pallojen halkaisijoiden keskiarvot täyttivät asetetun 100 µm kliinisen raja-arvon.

Kun pallot olivat pienempiä kuin mastermallissa, olivat pallot nurkassa tarkempia. Pallojen ollessa mastermallia isompia, pallot olivat keskellä tarkempia. Pallojen etäisyyksistä ei voitu tehdä suoria johtopäätöksiä.

Tutkimuksella ei saatu suoraa vastausta kumpaankaan tutkimuksessa esitettyyn tutkimuskysymykseen. Tutkimuksella luotiin uutta laadukasta tietoa hammasteknisen alan käyttöön allasvalopolymerisaatio-tulostamisesta. Tutkimuksen tuloksien avulla hammaslaboratorioilla on mahdollisuus säätää omien tulostimiensa asetuksia saadakseen tarkempia tulostuksia.

Lähteet

3Shape. 3Shape Lab Scanners. Viitattu 8.3.2022.

<https://www.3shape.com/en/scanners/lab>

Aalto-yliopisto. Lipponen, S. 2019. Polymeerit: Polymerointimekanismit. Kemi-antekniikan korkeakoulu. Viitattu 7.2.2022. https://mycourses.aalto.fi/plu-ginfile.php/901006/mod_resource/content/2/Luento%201_Polymerointimekanismit.pdf

Alander P. & PHAMMS18. 2020. 3D-tulostus hammastekniikassa, SLA-tulostimet. Hammasteknikkolehti. 2/2020, 4-9.

Arnold, C.; Monsees, D.; Hey, J. & Schweyen, R. 2019. Surface Quality of 3D-Printed Models as a Function of Various Printing Parameters. Materials. 2019. 12(12). Viitattu 30.1.2022. <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/12/1970/htm>

Bagheri, A. & Jin, J. 2019. Photopolymerization in 3D Printing. ACS Applied Polymer Materials. 1(4), 593-611. American Chemical Society. Viitattu 30.1.2022. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsapm.8b00165>

Diegel, O.; Nordin, A. & Motte, D. 2020. A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. Singapore: Springer. EBook Collection. E-kirja. Viitattu 1.11.2021. https://turkuamk.finna.fi/Record/turkuamk_electronic.995369077205970

Faria, A.; Rodrigues, R.; Macedo, A.; Mattos, M. & Ribeiro, R. 2008. Accuracy of stone casts obtained by different impression materials. Brazilian Oral Research. Scielo Brasil. 22(4). Viitattu 10.3.2022. <https://www.scielo.br/j/bor/a/9ttDXPfwSKgtXrk4n5WkM/?lang=en#>

Favero, C.S.; English, J.D.; Cozad, B.E.; Wirthlin, J.O.; Short, M.M. & Kasper, F.K. 2017. Effect of print layer height and printer type on the accuracy of 3-dimensional printed orthodontic models. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 152(4), 557–565. Viitattu 4.10.2021. [https://www.ajodo.org/article/S0889-5406\(17\)30595-4/fulltext](https://www.ajodo.org/article/S0889-5406(17)30595-4/fulltext)

Gom. 2020. What is GOM Inspect. Viitattu 1.11.2021. <https://www.gom-inspect.com/en/overview.php>

Hazeveld, A.; Huddleston Slater J. J. R. & Ren, Y. 2014. Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 145(1), 108–115. Viitattu 9.9.2021. [https://www.ajodo.org/article/S0889-5406\(13\)00906-2/fulltext](https://www.ajodo.org/article/S0889-5406(13)00906-2/fulltext)

Jabbar, A. & Mahmood, A. 2009. A Modified Technique of Orthodontic Model Trimming. *Pakistan Orthodontic Journal*. 1(1), 34-40. Viitattu 22.2.2022. <https://www.poj.org.pk/index.php/poj/article/view/36>

Johnson, T.; Patrick, D. G.; Stokes, C. W.; Wildgoose D. G. & Wood, D. J. 2017. *Basics of Dental Technology. A Step by Step Approach*. 2. painos. John Wiley & Sons LTd. Chichester, UK.

Kim, S.; Shin, Y.; Jung, H.; Hwang, C.; Baik, H. & Cha, J. 2018. Precision and trueness of dental models manufactured with different 3-dimensional printing techniques. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 153(1), 144–153. Viitattu 6.9.2021. [https://www.ajodo.org/article/S0889-5406\(17\)30647-9/fulltext](https://www.ajodo.org/article/S0889-5406(17)30647-9/fulltext)

Ko, J.; Bloomstein, R. D.; Briss, D.; Holland, J. N.; Morsy, H. M.; Kasper, F. K. & Huang, W. 2021. Effect of build angle and layer height on the accuracy of 3-dimensional printed dental models. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 160(3), 451–458. Viitattu 26.10.2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0889540621003498>

Ling, L.; Taremi, N. & Malayala R. 2022. A Novel Low-Shrinkage Resin for 3D Printing. *Journal of Dentistry*. Vol 118. Viitattu 30.1.2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300571222000148>

Mangano, A.; Berretta, M.; Luongo, G.; Mangano, C. & Mangano, F. 2018. Conventional vs Digital Impressions: Acceptability, Treatment Comfort and Stress Among Young Orthodontic Patients. *The Open Dentistry Journal*. Vol 12, 118-124. Viitattu 22.2.2022. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5815028/>

Marcel, R.; Reinhard, H. & Andreas, K. 2020. Accuracy of CAD/CAM-fabricated bite splints: milling vs 3D printing. *Clin Oral Invest*. 24(12), 4607–4615. Viitattu 31.1.2022. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7666673/>

mrzezo. 2015. 3 Gypsum Products for Dental Casts. Pocket Dentistry. Viitattu 22.2.2022. <https://pocketdentistry.com/3-gypsum-products-for-dental-casts/>

Nestler, N.; Wesemann, C.; Spies, B.C.; Beuer, F. & Bumann, A. 2021. Dimensional accuracy of extrusion- and photopolymerization-based 3D printers: In vitro study comparing printed casts. The Journal of Prosthetic Dentistry. 125(1), 103–110. Viitattu 4.10.2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022391319307486>

Ortomat Herpola. Tulostimen valinta. Viitattu 1.11.2021 <https://www.ortomat-herpola.fi/files/3D-tulostimen%20valinta.pdf>

Raukunen, A. 2020. Mittaustekniikan mittausharjoitusten suunnittelu. Opinnäytetyö. Kone- ja tuotantotekniikka. Turku: Turun ammattikorkeakoulu. Viitattu 8.2.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/337420/Raukunen_Anshelm.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Ritala, P. 2013. Johdatus tutkimusmetodologiaan. Päivä 2: Keskeiset kvantitatiiviset ja kvalitatiiviset tutkimusmenetelmät. Lappeenrannan yliopisto. Viitattu 8.2.2022. https://developmentcentre.lut.fi/digi/Moodle_pohjat/Ritala_Johdatus%20tutkimusmetodologiaan%202013.pdf

Sherman, S.L.; Kadioglu, O.; Currier, G.F.; Kierl, J.P. & Li, J. 2020. Accuracy of digital light processing printing of 3-dimensional dental models. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 157(3), 422–428. Viitattu 6.9.2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889540619308935>

Toivola, M. & Härkönen, T. Avoin matematiikka 8 lk. Osio 3: Tasogeometriaa. https://avoinoppikirja.fi/tiedostot/ylakoulu/matematiikka/avoin_matematiikka_8lk_osio3.pdf

Unkovskiy, A.; Bui, P.H.; Schille, C.; Geis-Gerstorfer, J.; Huettig, F. & Spintzyk, S. 2018. Objects build orientation, positioning, and curing influence dimensional accuracy and flexural properties of stereolithographically printed resin. Dental Materials. 34(12), 324-333. Viitattu 24.1.2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564118305943>

Varotsis A. B. 2019. What is SLA 3D printing? HUBS a protolabs company. Viitattu 4.10.2021. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>

Taulukko 5. Testikappaleiden tarkkuusmittausten tulokset.

Mittauspiste\tulostin	Master-malli	Form 2	P 30	Sprintray Pro 95	Asiga UV MAx 385	Plan-meca Creo C5	Prototyyppi
Pallo 1 K	4,988	4,900	4,923	5,021	4,884	4,886	5,035
Keskihajonta	-	0,006	0,006	0,017	0,012	0,041	0,055
Pallo 1 N	-	4,912	4,950	5,045	4,892	4,888	5,052
Keskihajonta	-	0,008	0,005	0,019	0,014	0,040	0,070
Pallo 2 K	4,988	4,901	4,924	5,015	4,891	4,906	5,005
Keskihajonta	-	0,007	0,008	0,014	0,010	0,041	0,041
Pallo 2 N	4,988	4,905	4,951	5,053	4,901	4,927	5,037
Keskihajonta	-	0,009	0,007	0,013	0,013	0,042	0,048
Pallo 3 K	4,988	4,903	4,943	5,037	4,893	4,921	5,037
Keskihajonta	-	0,005	0,004	0,017	0,008	0,034	0,032
Pallo 3 N	4,988	4,909	4,925	5,061	4,914	4,950	5,032
Keskihajonta	-	0,005	0,007	0,017	0,011	0,042	0,051
Pallo K	4,988	4,901	4,930	5,024	4,889	4,904	5,025
Keskihajonta	-	0,006	0,011	0,018	0,010	0,040	0,045
Pallot N	4,988	4,909	4,942	5,053	4,902	4,922	5,040
Keskihajonta	-	0,008	0,014	0,017	0,015	0,048	0,056
Pallo 1 K ero master-malliin (%)	-	-0,088 (-1,8%)	-0,065 (-1,3%)	0,033 (0,7%)	-0,104 (-2,1%)	-0,102 (-2,0%)	0,047 (0,9%)
Pallo 1 N ero master-malliin (%)	-	-0,076 (-1,5%)	-0,038 (-0,8%)	0,057 (1,1%)	-0,096 (-1,9%)	-0,1 (-2,0%)	0,064 (1,3%)
Pallo 2 K ero master-malliin (%)	-	-0,087 (-1,7%)	-0,065 (-1,3%)	0,027 (0,5%)	-0,097 (-2,0%)	-0,082 (-1,6%)	0,017 (0,3%)
Pallo 2 N ero master-malliin (%)	-	-0,083 (-1,7%)	-0,037 (-0,7%)	0,064 (1,3%)	-0,087 (-1,7%)	-0,061 (-1,2%)	0,049 (1,0%)
Pallo 3 K ero master-malliin (%)	-	-0,085 (1,7%)	-0,045 (-0,9%)	0,049 (1,0%)	-0,096 (-1,9%)	-0,07 (-1,3%)	0,049 (1,0%)
Pallo 3 N ero master-malliin (%)	-	-0,079 (-1,6%)	-0,063 (-1,3%)	0,073 (1,5%)	-0,074 (-1,5%)	-0,038 (0,8%)	0,044 (0,9%)
Pallot K ero mastert-malliin (%)	-	-0,087 (-1,7%)	-0,058 (-1,2%)	0,036 (0,7%)	-0,099 (-2,0%)	-0,084 (-1,7%)	0,037 (0,8%)
Pallot N ero master-malliin (%)	-	-0,079 (-1,6%)	-0,046 (-0,9%)	0,065 (1,3%)	-0,086 (-1,7%)	-0,066 (-1,3%)	0,052 (1,0%)

(jatkuu)

Taulukko 5 (jatkuu).

Mittauspiste\tulostin	Master-malli	Form 2	P 30	Sprintray Pro 95	Asiga UV MAx 385	Plan-meca Creo C5	Proto-tyyppi
Etäisyys 1-2 K	13,601	13,41	13,698	13,576	13,559	13,5	13,636
Keskihajonta	-	0,011	0,011	0,014	0,015	0,029	0,01
Etäisyys 1-2 N	13,601	13,473	13,7	13,539	13,582	13,515	13,616
Keskihajonta	-	0,009	0,009	0,018	0,016	0,031	0,015
Etäisyys 1-3 K	31,145	30,919	31,219	31,031	31,134	30,963	31,189
Keskihajonta	-	0,009	0,01	0,026	0,013	0,023	0,013
Etäisyys 1-3 N	31,145	31,057	31,272	30,969	31,169	30,973	31,175
Keskihajonta	-	0,009	0,008	0,033	0,009	0,024	0,012
Etäisyys 2-3 K	28,160	28,037	28,206	28,051	28,173	28,02	28,207
Keskihajonta	-	0,006	0,009	0,028	0,013	0,009	0,017
Etäisyys 2-3 N	28,160	28,067	28,224	28,023	28,202	28,023	28,198
Keskihajonta	-	0,009	0,007	0,034	0,009	0,014	0,012
Etäisyys 1-2 K ero mas-termalliin (%)	-	-0,191 (-1,4%)	0,097 (0,7%)	-0,025 (-0,2%)	-0,042 (-0,3%)	-0,101 (-0,7%)	0,035 (0,3%)
Etäisyys 1-2 N ero mas-termalliin (%)	-	-0,128 (-0,9%)	0,099 (0,7%)	-0,062 (-0,5%)	-0,019 (-0,1%)	-0,086 (-0,6%)	0,015 (0,1%)
Etäisyys 1-3 K ero mas-termalliin (%)	-	-0,226 (-0,7%)	0,074 (0,2%)	0,114 (-0,4%)	-0,011 (0,0%)	-0,182 (-0,6%)	0,044 (0,1%)
Etäisyys 1-3 N ero mas-termalliin (%)	-	-0,088 (-0,3%)	0,127 (0,4%)	-0,176 (-0,6%)	0,024 (0,1%)	-0,172 (-0,6%)	0,03 (0,1%)
Etäisyys 2-3 K ero mas-termalliin (%)	-	-0,123 (-0,4%)	0,046 (0,2%)	-0,109 (-0,4%)	0,013 (0,0%)	-0,14 (- 0,5%)	0,047 (0,2%)
Etäisyys 2-3 N ero mas-termalliin (%)	-	-0,093 (-0,3%)	0,064 (0,2%)	-0,191 (-0,7%)	0,042 (0,1%)	-0,137 (-0,5%)	0,038 (,0,1%)

Taulukko 6. Sijainnin p-arvo.

Form 2	p-arvo
pallo 1	,002
pallo 2	,255
pallo 3	,015
etäisyys 1–2	,000
etäisyys 1–3	,000
etäisyys 2–3	,000
P30	
pallo 1	,000
pallo 2	,000
pallo 3	,000
etäisyys 1–2	,685
etäisyys 1–3	,000
etäisyys 2–3	,000
SprintRay Pro 95	
pallo 1	,004
pallo 2	,000
pallo 3	,008
etäisyys 1–2	,000
etäisyys 1–3	,000
etäisyys 2–3	,000
Asiga UV MAX 385	
pallo 1	,166
pallo 2	,147
pallo 3	,000
etäisyys 1–2	,005
etäisyys 1–3	,000
etäisyys 2–3	,000
Planmeca Creo C5	
pallo 1	,872
pallo 2	,259
pallo 3	,126
etäisyys 1–2	,739
etäisyys 1–3	,331
etäisyys 2–3	,622
Prototyyppi	
pallo 1	,558
pallo 2	,167
pallo 3	,715
etäisyys 1–2	,003
etäisyys 1–3	,033
etäisyys 2–3	,175

Taulukko 7. SPSS ANOVA-analyysi.

Form 2		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
pallo 1	Between Groups	,001	1	,001	13,632	,002
	Within Groups	,001	18	,000		
	Total	,002	19			
pallo 2	Between Groups	,000	1	,000	1,384	,255
	Within Groups	,001	18	,000		
	Total	,001	19			
pallo 3	Between Groups	,000	1	,000	7,203	,015
	Within Groups	,000	18	,000		
	Total	,001	19			
dist1 2	Between Groups	,020	1	,020	203,748	,000
	Within Groups	,002	18	,000		
	Total	,021	19			
dist1 3	Between Groups	,096	1	,096	1232,001	,000
	Within Groups	,001	18	,000		
	Total	,097	19			
dist2 3	Between Groups	,005	1	,005	81,643	,000
	Within Groups	,001	18	,000		
	Total	,006	19			
P30						
pallo 1	Between Groups	,004	1	,004	115,904	,000
	Within Groups	,001	18	,000		
	Total	,004	19			
pallo 2	Between Groups	,004	1	,004	72,378	,000
	Within Groups	,001	18	,000		
	Total	,005	19			
pallo 3	Between Groups	,002	1	,002	50,869	,000
	Within Groups	,001	18	,000		
	Total	,002	19			
dist1 2	Between Groups	,000	1	,000	,170	,685
	Within Groups	,002	18	,000		
	Total	,002	19			
dist1 3	Between Groups	,014	1	,014	182,241	,000
	Within Groups	,001	18	,000		
	Total	,015	19			
dist2 3	Between Groups	,002	1	,002	23,684	,000
	Within Groups	,001	18	,000		
	Total	,003	19			

(jatkuu)

Taulukko 7. (jatkuu)

SprintRay Pro 95		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
pallo 1	Between Groups	,003	1	,003	10,660	,004
	Within Groups	,006	18	,000		
	Total	,009	19			
pallo 2	Between Groups	,007	1	,007	33,941	,000
	Within Groups	,003	18	,000		
	Total	,010	19			
pallo 3	Between Groups	,003	1	,003	8,954	,008
	Within Groups	,005	18	,000		
	Total	,008	19			
dist1 2	Between Groups	,007	1	,007	24,686	,000
	Within Groups	,005	18	,000		
	Total	,011	19			
dist1 3	Between Groups	,019	1	,019	20,151	,000
	Within Groups	,017	18	,001		
	Total	,035	19			
dist2 3	Between Groups	,034	1	,034	35,001	,000
	Within Groups	,017	18	,001		
	Total	,051	19			
Asiga UV MAX 385						
pallo 1	Between Groups	,000	1	,000	2,089	,166
	Within Groups	,003	18	,000		
	Total	,003	19			
pallo 2	Between Groups	,000	1	,000	2,303	,147
	Within Groups	,003	18	,000		
	Total	,003	19			
pallo 3	Between Groups	,003	1	,003	31,749	,000
	Within Groups	,001	18	,000		
	Total	,004	19			
dist1 2	Between Groups	,002	1	,002	10,501	,005
	Within Groups	,004	18	,000		
	Total	,007	19			
dist1 3	Between Groups	,006	1	,006	38,078	,000
	Within Groups	,003	18	,000		
	Total	,008	19			
dist2 3	Between Groups	,004	1	,004	24,818	,000
	Within Groups	,003	18	,000		
	Total	,007	19			

(jatkuu)

Taulukko 7. (jatkuu)

Planmeca Creo C5		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
pallo 1	Between Groups	,000	1	,000	,027	,872
	Within Groups	,030	18	,002		
	Total	,030	19			
pallo 2	Between Groups	,002	1	,002	1,361	,259
	Within Groups	,029	18	,002		
	Total	,031	19			
pallo 3	Between Groups	,004	1	,004	2,578	,126
	Within Groups	,025	18	,001		
	Total	,029	19			
dist1 2	Between Groups	,000	1	,000	,114	,739
	Within Groups	,028	18	,002		
	Total	,029	19			
dist1 3	Between Groups	,001	1	,001	,998	,331
	Within Groups	,009	18	,001		
	Total	,010	19			
dist2 3	Between Groups	,000	1	,000	,252	,622
	Within Groups	,003	18	,000		
	Total	,003	19			
Prototyyppi						
pallo 1	Between Groups	,001	1	,001	,356	,558
	Within Groups	,073	18	,004		
	Total	,074	19			
pallo 2	Between Groups	,004	1	,004	2,074	,167
	Within Groups	,036	18	,002		
	Total	,041	19			
pallo 3	Between Groups	,000	1	,000	,138	,715
	Within Groups	,032	18	,002		
	Total	,032	19			
dist1 2	Between Groups	,002	1	,002	11,504	,003
	Within Groups	,003	18	,000		
	Total	,006	19			
dist1 3	Between Groups	,001	1	,001	5,337	,033
	Within Groups	,003	18	,000		
	Total	,004	19			
dist2 3	Between Groups	,000	1	,000	1,997	,175
	Within Groups	,004	18	,000		
	Total	,004	19			