



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Tuomas Mannio, Jaan Seitsara, Tarmo Tossavainen

3D-tulostettujen tukipohjallisten mallinnus ja materiaalien kulutuskestävyyden arviointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Apuvälineteknikko

Apuvälineteknikon koulutusohjelma

Opinnäytetyö

14.11.2019

Tekijät Otsikko	Tuomas Mannio, Jaan Seitsara, Tarmo Tossavainen 3D-tulostettujen tukipohjallisten mallinnus ja materiaalien kulutuskestävyyden arviointi
Sivumäärä Aika	40 sivua + 2 liitettä 14.11.2019
Tutkinto	Apuvälineteknikko
Tutkinto-ohjelma	Apuvälineteknikon koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Apuvälinetekniikka
Ohjaajat	Lehtori Tomi Nurminen Yliopettaja Pekka Paalasmaa
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli mallintaa yksilölliset 3D-tulostetut tukipohjalliset ja arvioida kuukauden mittaisen käyttöjakson aikana, kuinka 3D-tulostettu polyamidiseos kestää päivittäisessä käytössä. Opinnäytetyö lähti liikkeelle opinnäytetyöntekijöiden yhteisestä kiinnostuksesta 3D-tulostukseen ja sen tuomiin mahdollisuuksiin apuvälinealalla.</p> <p>Opinnäytetyön aikana kehitimme tukipohjallisen päkiän alueelle joustoa lisäävän ratkaisun 3D-mallinnusohjelmistojen avulla sekä arvioimme kahden eri tulostusmateriaalin kestävyyttä normaalissa päivittäisessä käytössä. Työelämästä kulkeutuneen tiedon mukaan 3D-tulostettujen tukipohjallisten joustoa lisääviä ratkaisuja tulisi kehittää, jotta jäykkä 3D-tulostusmateriaali kestäisi paremmin kulutuskäyttöä. Lopulliset versiot mallinnetuista tukipohjallisista tulostettiin HP:n 3D-tulostimella kesällä 2019. Käyttöjakso sijoittui saman vuoden syksylle, jolloin itse opinnäytetyökin toteutettiin.</p> <p>Testijakson alussa tukipohjallisten paksuus mitattiin ennalta määritellyistä kohdista, jotka toistimme testijakson päätyttyä. Tällä metodilla pyrittiin saamaan konkreettista tietoa 3D-tulostusmateriaalien kulumisesta. Kuukauden pituisen käyttöjakson aikana havaittiin hienoista kulumista ja pieniä konkreettisia muutoksia 3D-tulostettujen tukipohjallisten materiaaleissa. Materiaaleissa oli eroavaisuuksia niin kestävyudessa kuin toimivuudessaakin.</p> <p>Mahdollisille jatkekehityksille mallinnuksen ja tukipohjallisten päällystykseen osalta on tarvetta, sillä aihealue on vielä melko tuntematon eikä pitkäaikaistutkimuksia ole. Tukipohjallisten liukkaan ja kovan pinnan osalta tullaan tarvitsemaan vielä tuotekehitystä, jotta ne voidaan ottaa laajempaan kulutuskäyttöön.</p>	
Avainsanat	3D-tulostus, mallinnus, tukipohjalliset

Authors Title	Tuomas Mannio, Jaan Seitsara, Tarmo Tossavainen Modelling of 3D-printed insoles and wear differences of two different printing materials
Number of Pages Date	40 pages + 2 appendices 14th of November 2019
Degree	Bachelor of healthcare
Degree Programme	Prosthetics and orthotics
Specialisation option	Prosthetics and orthotics
Instructors	Tomi Nurminen, Senior Lecturer Pekka Paalasmaa, Principal Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to model custom made insoles that would be later made using 3D-printing machines and to conduct a testing period in which insoles were used for a time period of one month. Another aspect of our thesis was to study two different printing materials of which the insoles were made from. The idea behind this thesis arose from our common interest in 3D-printing and the opportunities this relatively new technology brings to our field of work in prosthetics and orthotics.</p> <p>After the printing was done certain tests were carried out for our insoles. Our idea was to study if the two different 3D-printing materials would wear out at a different rate during ordinary everyday use. We also wanted to study how would our 3D-modelled insole design perform during a month-long test period. We knew that the current problems 3D-printed insoles are facing nowadays are that they are too rigid and brittle. Keeping that in our mind we modelled our insoles with a design solution that would hopefully make our insoles more durable during walking.</p> <p>During the test-period, we conducted we saw moderate wear on both 3D-printing materials that were used to print the insoles from. We also got some results regarding our insole design that was modelled to sustain the amount of stress coming from walking better than before. There were differences in material endurance and functionality.</p> <p>There is room for possible follow-up studies to be carried out regarding 3D-printing, modelling and the materials that are currently used. Our thesis scratched just the surface of 3D-printing and there is a lot more to study.</p>	
Keywords	3D-printing, modelling, custom made insoles, 3D insoles

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Opinnäytetyön lähtökohdat	2
3	Jalkaterän ortoosit eli tukipohjalliset	4
4	3D-teknologia	7
4.1	3D-muovimateriaalit	9
4.2	Polyamidit, PA 11 ja PA 12	9
5	Tukipohjallisten valmistusprosessi opinnäytetyössä	12
5.1	3D-skannaus	12
5.2	Tukipohjallisten mallintaminen	14
5.3	Kappaleiden hionta ja sovitus	17
6	Aineiston kerääminen	19
6.1	Tukipohjallisten arviointiin valitut menetelmät	19
6.2	Tukipohjallisten tulostusmateriaalin kulumisen mittaaminen	20
6.3	Röntgenmikroskoopin hyödyntäminen tukipohjallisten kuvaamisessa	21
6.4	Optinen mikroskopia	24
7	Tulokset	25
7.1	Röntgenmikroskoopin tulokset	25
7.2	Mikrometrimittaukset tukipohjallisten käyttöjakson päätyttyä	26
7.3	Optinen mikroskopiakuvaus testijakson jälkeen	32
8	Johtopäätökset ja pohdinta	35
9	Liitteet	45

1 Johdanto

Jalkaterän ortooseilla tarkoitetaan kengän sisälle laitettavia apuvälineitä, kansankielellä kutsuttuja tukipohjallisia. Pohjalliset voivat olla joko tehdasvalmisteisia tai yksilöllisesti valmistettuja kappaleita. Niiden valmistukseen on olemassa erilaisia menetelmiä. Suurin osa yksilöllisistä jalkaterän ortooseista valmistetaan pikapohjallisina, kipsimallin mukaan tehtyinä tai pohjallisaihion jyrinnällä 3D-skannatun tiedoston mukaisesti. Uusin yksilöllisten jalkaterän ortoosien valmistusmenetelmä on skannatun jalan mukaan tehty 3D-tulostettu pohjallinen. (Ahonen & Kantola & Liukkonen 2004: 400—406.)

Keskitymme opinnäytetyössämme tarkastelemaan 3D-tulostettujen tukipohjallisten materiaalia ja sen kestävyyttä. Tarkoituksenamme on selvittää, miten 3D-tulostettujen pohjallisten materiaali soveltuu päivittäiseen käyttöön ja miten tukipohjalliseen mallintamamme muotoilu toimii käytännössä. Vertailemme 3D-tulostettujen testisarjojen kahden eri materiaalin ominaisuuksia. Toimimme itse testiryhmänä kuukauden mittaisella käyttöjaksolla. Tukipohjalliset tulostetaan Hewlett & Packardin (HP) käyttämällä PA 11 ja PA 12-polyamidi tulostusmateriaaleilla. Pääasiallisena tarkoituksenamme on selvittää, soveltuvatko nämä materiaalit tukipohjallisten valmistukseen. Opinnäytetyö luo tietoa kuntoutus- ja apuvälinealalle 3D-tulostusmateriaalien soveltuvuudesta tukipohjallisten valmistuksessa. Helpottaako 3D-tulostaminen ja tulostusmateriaalit tukipohjallisten valmistusprosessia ja miten nykyisesti paljon käytetyt tulostusmateriaalit, PA 11 ja PA 12 kestävät kulutusta? Lisäksi täsmennämme 3D-tulostuksen maailmassa käytettäviä erilaisia tulostustapoja sekä valmistamiemme 3D-tulostettujen tukipohjallisten mallinnusprosessia.

Hewlett & Packard tarjoaa tulostusmahdollisuuden tukipohjallisiin. 3D-tulostusmallit on skannattu opinnäytetyön tekijöiden jalkateristä. Käytimme työssämme 3D-skannattujen tiedostojen muokkaamiseen VX-elements, Insole Design Software, Modo ja MeshMixer ohjelmia. Päkiän alueelle suunniteltiin varvastyönön rullausta varten 3D-mallintamalla kevennyksiä, joilla saamme lisättyä jousto-ominaisuuksia tasapintaiseen pohjalliseen verrattuna. Tämänkaltaiselle innovaatiolle on ollut kysyntää, sillä HP:n kanssa yhteistyötä tekevilta tahoilta saamamme palautteen mukaan päkiänalueen murtuminen on ollut ongelmana 3D-tulostetuissa pohjallisissa.

2 Opinnäytetyön lähtökohdat

Opinnäytetyön idea syntyi kiinnostuksesta 3D-tulostamiseen ja sen hyödyntämiseen apuvälinetekniikan käytännön töissä. Aiemmat tukipohjallisiin liittyvät opinnäytetyöt eivät käsittele 3D-tulostettujen tukipohjallisten materiaalikestävyyttä käytännössä, joten aiheeseen perehtyminen on perusteltua ja tarpeellista.

Opinnäytetyömme perustuu kvantitatiiviselle tutkimukselle ja on toiminnallinen työ, jossa aineistonkeruumenetelmänä käytämme lisäksi omaa kokemusta ja havainnointia. Kvantitatiivisen, eli toisin sanoen määrällisen tutkimuksen perusteisiin kuuluvat tutkimuskohteen kuvaaminen numeraalisesti. Kvantitatiivisessa tutkimuksessa pyritään löytämään erilaisia syy- ja seuraussuhteita vertailemalla esimerkiksi tutkimuksessa esiin nousevia numeerisia tuloksia. Vertailulla pyritään selittämään tutkittua ilmiötä perinpohjaisesti (Jyväskylän yliopisto 2015.)

Aineistoa kerättiin erilaisilla koe- ja analyysimenetelmillä, joista pyrimme muodostamaan selkeän ja hyvin ymmärrettävän kokonaisuuden. (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006). Tehtävänä opinnäytetyössä oli valmistaa arvioitavat tukipohjalliset sekä käyttää niitä ennalta määritellyn käyttöjakson mukaisesti. Käyttöjakson jälkeen arvioimme tukipohjallismateriaalien kestävyyttä ja havaittuja muutoksia. Opinnäytetyömme monista eri tiedonkeruumenetelmistä johtuen voimme kutsua metodiamme menetelmätriangulaatioksi. Menetelmätriangulaatiolla tarkoitetaan useiden eri menetelmien ja tiedonhankintatapojen yhdistämisestä tutkimuksen tiedonkeruun prosessissa (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006.)

Opinnäytetyömme tutkimusasetelmana oli mallintaa 3D-tekniikalla neutraalit tukipohjalliset normaaliin käyttöön ja 3D tulostaa nämä markkinoilla saatavilla olevilla menetelmillä. Toinen tavoitteemme oli suorittaa käyttöjakso, jonka avulla saisimme konkreettisia tuloksia 3D-tulostettujen tukipohjallisten toiminnasta sekä tämän ohella havainnoida tulostusmateriaalin kestävyyttä ja soveltuvuutta. HP tarjosi opinnäytetyöhön tarvittavat 3D-tulostettavat tukipohjalliset sekä materiaalitietoa käytetyistä polyamidiseoksista. Mallinsimme tukipohjalliset LutraCad-nimiseltä ohjelmistoyritykseltä saadulla Insole Design Software-tietokoneohjelmalla, johon saimme kahden kuukauden kokeilulisenssin.

Opinnäytetyömme tutkimusongelmana oli 3D-tulostettujen tukipohjallisten sopivuus jokapäiväiseen käyttöön sekä materiaalikestävyys. Mallinsimme 3D-mallinnusohjelmilla 3 paria yksilöllisiä tukipohjallisia opinnäytetyön toteuttajille. Loimme tukipohjallisten tulostustiedostot ja lähetimme ne 3D-tulostuksen tarjoavalle HP:lle, joka puolestaan postitti pohjalliset niiden valmistuttua. Hankimme omaa käyttökokemusta käyttöjakson ajalta ja toimimme osallistuvina havainnoitsijoina. Mittasimme materiaalin kulutuskesktoa havainnoimalla pintaa, väriä, halkeamia ja taipumista. Mittasimme tulostusmateriaalien paksuuden eroja mikrometriruuvilla sekä tarkkailimme pintaa optisella mikroskoopilla ja röntgenmikroskoopilla.

3 Jalkaterän ortoosit eli tukipohjalliset

Jalkaterän ortoosien tarve voi syntyä erilaisten kiputilojen, virheasentojen tai perussairauksien seurauksena. Tukipohjallisilla pyritään saavuttamaan parempi tuki jalalle niin kävelyssä kuin seisoma-asennossakin. Jalkaterän yksilölliset ortoosit jaetaan valmistusmenetelmän mukaan:

- valmispohjallisiin
- puolivalmiisiin pikapohjallisiin
- elementtipohjallisiin
- kipsijäljennöksen mukaan tehtyihin tukipohjallisiin
- 3D-skannatun jäljennöksen myötä aihioista koneella jyrsittyihin pohjallisiin.

Yksilöllisten jalkateräortoosien materiaalit jaetaan karkeasti pehmeisiin, puolikoviin ja koviin materiaaleihin kovuudeltaan. Yleisiä materiaalivaihtoehtoja jalkateräortoosien valmistuksessa ovat vaahtokumit, umpi- ja avosolui-nen polyetyleenimuovi (EVA), luonnonkorkki, lasikuitu ja hiilikuitu. Tukipohjallisten päällystyksiä ja pehmeitä kevennyksiä voidaan tehdä huovasta, polyuretaanielastomeerista, nahasta, silikonista ja mikrokuitukankaista. Pehmeyttä tarvitaan tukipohjallisten iskua vaimentavaan ominaisuuteen ja käyttömukavuuteen. Valmistusmateriaaleja voidaan yhdistellä eri kovuuksien mukaan asiakkaan yksilöllisiin tarpeisiin nähden. Materiaalin paksuudella voidaan säädellä pohjallisen jäykkyyttä. Jäykkyyttä voidaan tarvita esimerkiksi ohjaamaan ja tukemaan kantaluuta kohti neutraalimpaa asentoa. (Ahonen ym. 2004: 400-406.)

Uusimpana menetelmänä tukipohjallisia voidaan tehdä 3D-tulostimella jalkaterästä skannatun mallinnuksen mukaisesti. Tätä viimeisimpänä mainittua valmistusmenetelmää olemme käyttäneet opinnäytetyömme tukipohjallisten valmistuksessa. Yksilöllisiä jalkaterän ortooseja valmistavat muun muassa apuvälineteknikot, jalkaterapeutit, jalkojenhoitajat ja fysioterapeutit. (Davia-Aracila & Hinojo-Peréz & Jimeno-Morenilla & Mora-Mora 2017; Ahonen ym. 2004: 400–406.)

Jalkaterän ortooseista eli tukipohjallisista löytyy paljon erilaista kirjallisuutta ja tutkimuksia. Jalkaterän anatomian ja biomekaniikan tutkiminen yhdistettynä eri indikaatioiden hoitoon tukipohjallisilla on usein eri tutkimuksien pääkohteena. Lisäksi erilaisten valmistusmenetelmien vertailu, arviointi ja kuvaus ovat yleisiä tutkimustavoitteita.

(Shaw ym. 2018; Telfer & Woodburn & Collier & Cavanagh 2017; Dombroski & Froats & Balsdon 2014.)

Yksilöllisten jalkaterän ortoosien tarve arvioidaan aina terveydenhuollon ammattilaisen johdolla. Päätös ortoosien teosta syntyy yhteistyössä asiakkaan kanssa. (Ahonen ym. 2004: 405.) Tukipohjallisten tavoitteena voi olla esimerkiksi erilaisten kiputilojen lievitys niin jalkaterässä, kuin polvissa, lonkissa ja alaselässä asti. Yleisryhtiin voidaan yrittää vaikuttaa tukipohjallisten tuomilla muutoksilla jalkaterien asentoihin. Työ- ja toimintakyvyn säilyttäminen pyritään saavuttamaan oikeanlaisilla tukipohjallisilla. Tarkoituksena on tukea jalkaterän luita, lihaksia ja niveliä. Muita syitä tukipohjallisten tarpeille voivat olla jalkojen virheasentojen korjaaminen ja tuenta, jalkapohjan painekohtien kevennys, lihasaktivaation lisäys jalkaterän alueella tai traumaperäisten vammojen hoito. Erityisesti diabetesta sairastavilla henkilöillä jalkapohjien painehaavojen kevennyksillä on saatu hyviä tuloksia (Telfer & Woodburn & Collier & Cavanaugh 2017).

Jalkaterän ortoosihoidon suunnitteluun kuuluu asiakkaan haastattelu ja kliinisten tutkimuksien suorittaminen. Asiakkaalta otetaan jalkaterien mitat skannaamalla tai vaahtolaatikolla. Asiantuntijoilla on erilaisia tapoja mitanottoon, joten yhtä ainoata oikeaa tapaa ei ole. Haastattelun avulla selvitetään muun muassa seuraavia tietoja:

- Kivun määrittäminen ja vaikutukset päivittäisiin toimintoihin (missä, milloin, minkälaista ja miten?)
- Yleinen terveydentilanne, perussairaudet ja fyysinen aktiivisuus
- Työn laatu, harrastukset ja vapaa-ajan aktiviteetit
- Käytössä olevat kengät ja mahdolliset aikaisemmat tukipohjalliset. (Takatalo 2019.)

Kliinisillä tutkimuksilla selvitetään asiakkaan:

- Jalkaterän poikkeamia ja niistä johtuvia oireita
- Poikkeamien syyt: onko ne rakenteellisia vai toiminnasta johtuvia?
- Alaraajojen nivelten liikelaajuuksia ja -suuntia, liikkeen laatua sekä symmetriaa
- Kuormitettujen ja kuormittamattomien mittaustuloksien eroja: mahdollisten kompensatioliikkeiden syitä ja seurauksia
- Asiakkaan kävelyä, yleisryhtiä ja kehon linjauksia. (Virrantaus & Saarikoski 2004: 223–227, 235–236.)

Ammattilaisen päättelykyky, ongelmanratkaisutaidot ja tutkimusmittareiden hallinta kehittyvät ajan myötä kliinistä työtä tekemällä. Perusteelliset esitiedot ja kliiniset tutkimukset auttavat apuvälinealan ammattilaista valitsemaan asiakkaalle tarkoituksenmukaisen yksilöllisen tukipohjallismallin sekä siinä käytettävät valmistusmateriaalit. Erilaisten materiaalien asiantuntemus ja valmistusmenetelmien hallinta antavat lisätyökaluja tukipohjallisen valmistukseen. Asiakasta on neuvottava oikeanlaisen kengän valinnassa, jotta tukipohjallinen toimii yhdessä kengän kanssa ja tuottaa halutun vaikutuksen. Kirjallisuuteen, tutkimuksiin ja artikkeleihin perehtymällä asiantuntija pystyy kehittämään ammattilista osaamistaan.

4 3D-teknologia

3D-tulostus on materiaalia lisäävää valmistusta (*Additive Manufacturing*, lyhenne AM), jossa luodaan kolmiulotteisia osia 3D CAD-tiedostoista (*Computer Aided Design*). 3D-tulostus rakentaa tulostettavan kappaleen kerros kerrokselta (Lehtinen 2015). 3D-tulostetun kappaleen materiaalien ominaisuudet ovat riippuvaisia tulostuksen parametreista, joita ovat muun muassa tulostus-/sulatuslämpötila (terminen prosessi), resoluutio, kerrospaksuus, geometria, materiaalin parametrit ja tulostussuunta. Tulostamalla voidaan valmistaa yksityiskohtaisesti hankalimpiakin fyysisiä kappaleita, joihin ei aikaisemmillä valmistusmenetelmillä voida päästä. Usein kappaleista saadaan kevyempiä samoilla lujuusominaisuuksilla, sillä 3D-tulostamisella pystytään vaikuttamaan kappaleen sisällä oleviin rakenteisiin valmistusvaiheessa. Valmistuksella on lisäksi materiaaleja säästävä vaikutus, sillä tulostin käyttää vain suunnitellun mallinnuksen mukaisesti materiaaleja. (Sung, Ye & Mei, Hyung-Ick & Do-Young, Jae-Do & Tsu-Wei, Pulickel & Lijie, Jonghwan 2018; Tukes 2018).

3D-tulostus pitää sisällään monia erilaisia tulostustapoja:

- Materiaalin pursottaminen eli FDM (*Fused Deposition Modelling*). Tulostusmateriaalia sulatetaan liikkuvien suuttimien kautta alustalle kerroksittain.
- Stereolitografialla (SL) eli ultraviolettii- (UV) ja lasersäteellä kovettamalla photopolymeereja tai hartseja. Kemiallisessa reaktiossa nestemäinen materiaali muuttuu kiinteäksi valon avulla. Tämä prosessi vaatii tukirakenteita tulostuskappaleeseen. Lopullinen kovetus suoritetaan erillisessä UV-uunissa. Lämpökäsittelyllä voidaan alentaa tulostetun kappaleen sisäisiä jännityksiä.
- Materiaalin suihkuttaminen (*Material Jetting*). Mustesuihkun kaltaiset suuttimet ruiskuttavat materiaalia pisaroina ja kerroksittain. Toiset suuttimet ruiskuttavat vahaa tukimateriaaliksi. Kerrokset jähmettyvät jäähtyessään.
- Sideaineen ruiskutus (*Binder Jetting*). Pulverimateriaalia levitetään rullalla alustalle. Tulostuspää ruiskuttaa sideainetta (liimaa ja väriainetta) kerroksittain. Uusi kerros jauhetta levitetään edellisen päälle.

- Jauhepetimenetelmä (*Powder Bed Fusion, PBF*). Jauhe levitetään alustalle ja sulatetaan lasersäteen avulla. Uusi jauhekerros levitetään rullan avulla. Seuraava kerros sulatetaan ristiin aikaisemman kanssa. Kerrokset sulautuvat yhteen.
- Arkkilaminointi (*Laminated Object Manufacturing, LOM*). Malli synnytetään liimaamalla ohuita kalvoja päällekkäin. Kalvo leikataan haluttuun muotoon laserilla. Seuraava kalvo liimataan, jonka jälkeen lämmitetty valssi puristaa kerrokset toisiinsa. Materiaalina esim. paperi ja kuumaliima.
- Kohdennettu sulatus (*Direct Energy Deposition, DED*). Kohdennetulla lämpöenergialla sulatetaan materiaalia kerroksittain. Materiaaleina lanka, nauha ja jauhe. Energia tuotetaan elektronisuihkulla, laserilla, valoakaarella tai plasmalla. Suutin kääntyy X-, Y- ja Z- suunnissa. Materiaali tuodaan suuttimesta tulostettavan kappaleen pintaan. (Loughborough University 2019).

HP käytti pohjallistemme tulostamisessa HP Multi Jet Fusion yhdistelmäteknologiaa, jossa perustana on jauhepetimenetelmä (*Powder Bed Fusion*) ja tekniikka, jossa mustesuihkun kaltaiset suuttimet ruiskuttavat toiminnallisia aineita tulostettavaan kohteeseen kerroksittain. Tulostin levittää ohuen kerroksen jauhetta tulostusalueelle. Tulostuspää lukee tulostustiedostosta viipaloidun kaavakuvan kyseiselle kerrokselle, esilämmittää alueen ja ruiskuttaa toiminnalliset aineet jauheeseen haluttuihin kohtiin. Tämän jälkeen kohteeseen ohjataan energiaa, jolloin kerros ja aineet sulautuvat aikaisempien kerrosten kanssa. Tulostusprosessi toistetaan kerros kerrokselta, kunnes kappale on lopulta valmis (HP Multi Jet Fusion technology 2019).

Perinteisessä kuvatulostuksessa kuvan rakenteellinen elementti on pikseli, joka sijaitsee halutussa pisteessä pituus/korkeussuunnassa, eli X- tai Y-akselilla. HP käyttää 3D teknologiassaan vokseleita, joka on pikseli, johon on lisätty syvyys eli Z-akseli. Syvyys-elementin lisäys mahdollistaa monimutkaisempien sekä tarkempien kappaleiden tulostamisen. Tulostusjauheeseen on myös mahdollista lisätä toiminnallisia aineita ruiskuttamalla niitä tulostuksen aikana kappaleeseen. Tällä pyritään vaikuttamaan lopullisen kappaleen ominaisuuksiin, yksityiskohtiin ja tarkkuuteen. Eri materiaalien lisäämisellä tulostusprosessin aikana on mahdollista saavuttaa lukemattomia erilaisia lisäominaisuuksia. Eri ominaisuuksia ovat esimerkiksi pinnan karheuteen, kitkaan, vetolujuuteen,

taipaisuuteen, kovuuteen, lämmönjohtavuuteen sekä materiaalin väriin vaikuttavat lisäykset. (HP Multi Jet Fusion Technology 2019).

4.1 3D-muovimateriaalit

3D-tulostuksen yleistyessä erilaisia 3D-pursotusmateriaaleja on tullut entistä enemmän tarjolle. Vaihtoehtoja ovat esimerkiksi ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*), PLA (*polylactic acid*) ja PVA (*polyvinyl alcohol*). ABS tunnetaan mekaanisista ominaisuuksistaan, PLA helpposta tulostettavuudesta ilman muovin käryjä ja PVA:ta käytetään yleisesti tukirakenteiden tulostamiseen. Vesiliukoisena PVA voidaan myös poistaa tulosteista itse rakenteita vahingoittamatta. (Carneiro & Lopes & Silva. 2018.)

Vuonna 2018 käytettäviä pursotettavia materiaaleja olivat verkkopolymeerit:

- PET (*polyetyleeni terephthalaatti*)
- TPU (lämpömuovautuva *polyuretaani*)
- PA (*polyamide*)
- PC (*polykarbonaatti*)
- HIPS (iskunkestävä *polystyreeni*). (Carneiro ym. 2018).

Polymeerikomposiiteissa voi olla täyteenä lasi- tai hiilikuituja, puun hiukkasia (PLA-matriisi), hiekkakiveä (*co-polyester* matriisi), rautapartikkeleita (magneettinen PLA matriisi), hiiliperäisiä täyteaineita (sähköä johtava PLA matriisi) tai väriä muuttavia materiaaleja (PLA-matriisi, jossa on lämpövärjäytyviä tai fluorisoivia lisäaineita) (Carneiro, ym. 2018.)

4.2 Polyamidit, PA 11 ja PA 12

Polyamidit ovat osakiteisiä teknisiä muoveja, jotka ovat levinneet maailmalle moneen eri käyttökohteisiin (Bruder 2016). Polyamideita kutsutaan myös nyloneiksi. Yhdysvalloissa nylon onkin vakiintuneempi termi puhuttaessa erilaisista polyamideista. Nimen käyttö juontaa juurensa ensimmäisestä polyamideista valmistetusta kaupallisesta tuot-

teesta, joka sai Yhdysvaltojen markkinoilla nimekseen nylon. (Seppälä 2004: 212.) Polyamideja käytetään yleisesti monissa eri käyttökohteissa kuten esimerkiksi putkien, työkalujen, pinnoitteiden, vaatteiden ja tiivisteiden valmistuksessa. Kappaleet, jotka valmistetaan polyamideista ovat luontaisesti kovapintaisia sekä hyvin kulutuskestäviä. Polyamidien vahvuutena on hyvä lämpötilojen sietokyky. Ne pysyvät jämökkänä ja lujuana jopa lähestyessä sulamispistettä. (Seppälä 2004: 213.)

Tukipohjalliset tulostettiin opinnäytetyötä varten PA 11 ja PA 12-nimisistä polyamidiseoksista. Näihin materiaaleihin päädyttiin HP:n kontaktimme suosituksesta. PA 11- ja PA 12- materiaaliseoksien erityisominaisuutena ovat pidemmät hiilivetyketjut, joten seokset imevät vähemmän vettä lyhytketjuisiin polyamideihin verrattuna. (Seppälä 2005: 213—215.) PA 11 seoksen raaka-aineena toimii *aminoundekaanihapo* ja PA 12 raaka-aineena on *lauriinilaktaami*. Raakamateriaali on pulveria, joka sulatetaan haluttuun muotoon 3D-tulostimessa. PA 11 on taipuisaa ja hyvin rasitusta kestävä polyamidiseosta, joka sopii erityisesti pohjallisiin. PA 11 materiaalilla on myös sertifikaatit suoralle ihokontaktille ja se on kemikaaleille resistenssi materiaali. PA 12 polyamidiseos on taas PA 11 materiaaliin verrattuna halvempaa. Kumpaakin polyamidiseosta on yhteensä kolmessa tukipohjalliskappaleessa. Polyamidiseosten jako tukipohjallissamme on toteutettu seuraavanlaisesti:

- Ensimmäinen tukipohjallispari, vasen kappale PA 12 / oikea kappale PA 11 polyamidiseosta
- Toinen tukipohjallispari, molemmat mallit PA 11 polyamidiseosta
- Kolmas tukipohjallispari, molemmat mallit PA 12 polyamidiseosta

PA 11 ja PA 12-polyamidiseoksia on tutkittu materiaaliominaisuuksiltaan erilaisin keinoin; muun muassa lämpötilanvaihteluilla, kosteusaltistuksilla ja mekaanisilla rasitustesteillä. Testien perusteella voidaan todeta, että kosteus sekä lämpötilan vaihtelut PA 11 ja PA 12- materiaalien ympärillä ovat ilmenneet vahvuuden, muokattavuuden sekä kovuuden heikentymisinä. Salazarin ym. (2014) mukaan muutokset ovat suurempia PA 12:ssa kuin PA 11 polyamidiseoksessa, PA 11-seoksen ollessa kokonaisvaltaisesti kulutuskestävämpi vaihtoehto. (Salazar ym. 2014:39.)

Testijaksomme aikana PA 11 ja PA 12-polyamidiseoksista valmistetut tukipohjalliset me altistuvat normaalista käytöstä johtuvalle kosteudelle ja lämpötilanvaihteluille kenkien sisällä. Salazarin (ym. 2014) mukaan kosteus sekä lämpötilanvaihtelu ovat keskeisiä osatekijöitä polyamidiseosten mahdollisessa kulumisessa ja materiaalin heikentymisessä. (Salazar ym. 2014:39). Tukipohjalliset tulevat olemaan kosketuksissa ainakin hien, lian, kiviaineksien ja sukkien kanssa, joten on mielenkiintoista nähdä, saameko merkityksellisiä tuloksia materiaalin kulumisesta taikka muutoksesta tukipohjallispareissamme. Jalkapohjan liukuminen tukipohjallisen päällä käveltäessä aiheuttaa kitkaa jalan ja materiaalin välillä, jonka voi olettaa tuottavan materiaalia kuluttavaa vaikutusta.

5 Tukipohjallisten valmistusprosessi opinnäytetyössä

Opinnäytetyö aloitettiin tutustumalla 3D-materiaalien ominaisuuksiin, tukipohjallisten teoriaperustaan sekä 3D-teknologiaan yleisesti. Tukipohjallisten valmistusprosessi lähti liikkeelle jalkaterien mitanotosta vaahtolaatikolla. Mitanotto vaahtolaatikolla tapahtui vaiheittain seuraavanlaisesti:

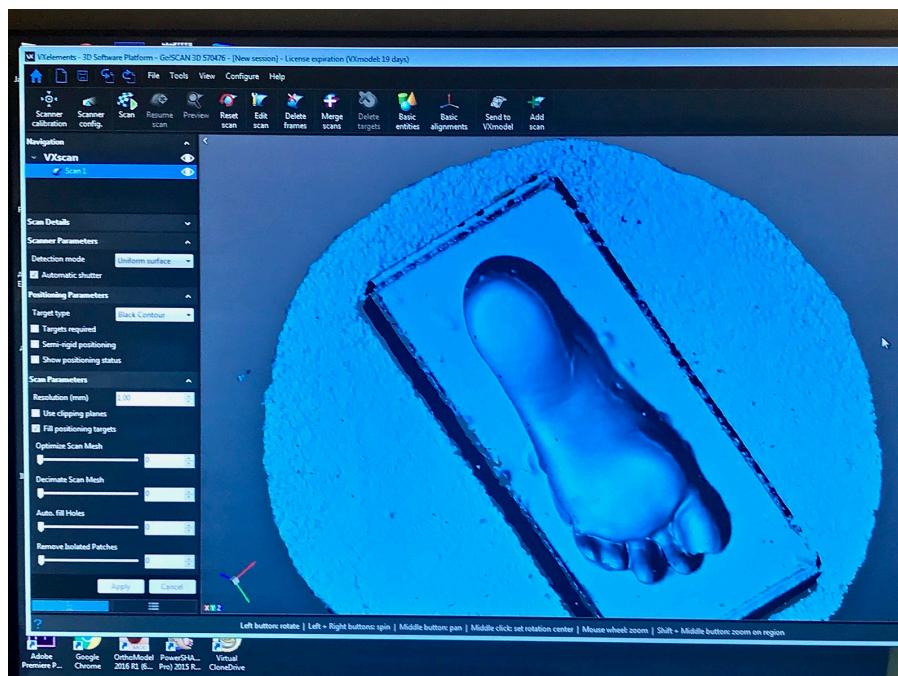
- Tuolilla istuen, polvien kulma 90 astetta fleksiassa
- Jalkaterät olivat kuormitettuina, paino jalan päällä
- Nilkassa sijaitseva subtalaarinivel asetettiin neutraalisasentoon
- Mitanottajalla tiukka ote nilkasta sekä polvesta
- Jalkaterä painettiin tasaisesti vaahtolaatikon pohjaan asti

5.1 3D-skannaus

Vaahtolaatikkomuottien valmistuttua ne skannattiin GO! Scan 3D-käsiskannerilla. 3D-skanneri luo kolmiulotteisen kuvan (kuvio 1.) vaahtolaatikkoon painautuneesta jalkaterästä. Halutun objektin 3D-skannaus onnistuu kuvaamalla objekti joka suunnalta sekä pitämällä etäisyys 3D-skannerin ja objektin välillä sopivana. Skannauksen jälkeen tiedosto siistitään ja parannellaan skannerin omalla VX-elements 6-ohjelmistolla (kuvio 2.). Muokattu tiedosto muunnetaan lopulta stl-tiedostoksi.

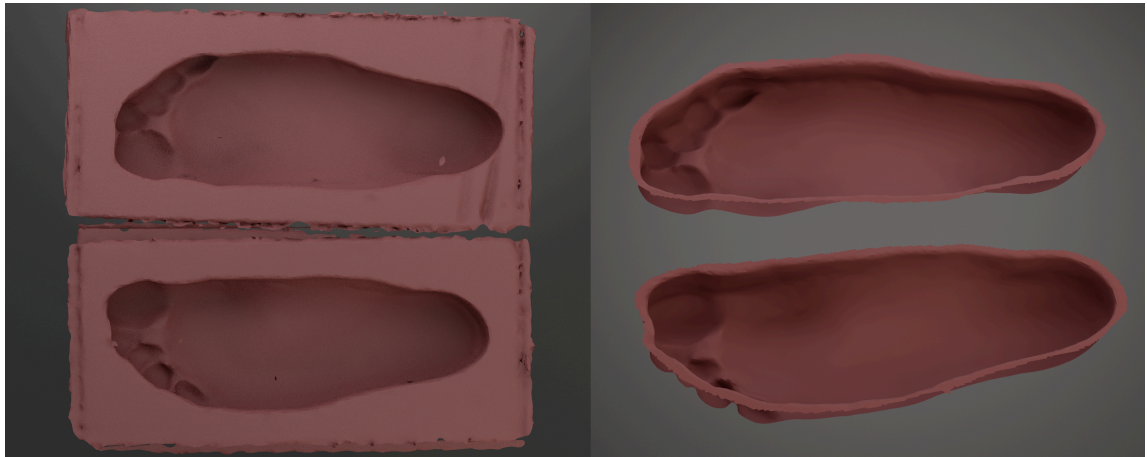


Kuvio 1. (vas.) Vaahtolaatikoiden skannaus 3D-skannerilla. (oik.) Skannattu vaahtolaatikko.



Kuvio 2. Tiedoston siistiminen tehtiin VX-elements 6 ohjelmassa.

Skannatuissa tiedostoissa on etenkin aluksi paljon ylimääräistä dataa (kuvio 3), sillä 3D-skanneri lukee kaiken mihin sen keilaus kohdistuu. Turhat muodot voidaan leikata pois ja siivota lähes kaikissa 3D-ohjelmissa. Opinnäytetyössämme ylimääräiset reunat leikattiin ja siivottiin Modo 3D-ohjelmalla. Jäljelle jäi helpommin hahmotettava ja muokattava tiedosto tukipohjallisen lopullista mallinnusta varten, joka tehtiin Insole Design Software-ohjelmalla. Tiedostojen työstämisessä mittakaavan tarkastaminen oli oleellinen osa muokkausta, jotta mallinnus onnistuisi.



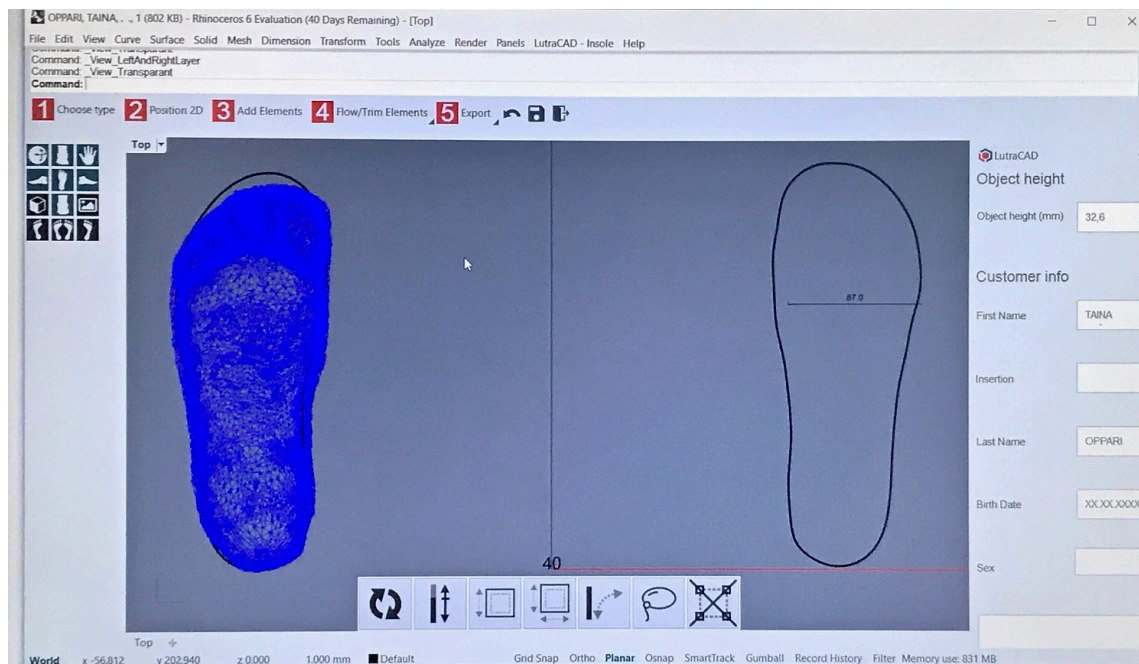
Kuvio 3. Viimeistelemätön vaahtolaatikkoskannaus (vas.) ja siistitty vaahtolaatikkoskannaus (oik.) jalkaterän painaumasta.

5.2 Tukipohjallisten mallintaminen

Tukipohjallisten mallintamiseen käytettiin Lutracadin Insole Design Software 3D-ohjelmaa. 3D-mallinnusohjelman kehittänyt LutraCad on Alankomaalainen pienyritys, joka on erikoistunut ortotiikan mallintamiseen ja suunnittelun mahdollistamiseen tietokoneella. Yritys on kehittänyt Rhinoceros 3D-mallintamisohjelmiston päälle asennettavan lisäohjelman, jolla voidaan mallintaa 3D-skannatuista jalkateristä tukipohjallisia (Lutracad 2019.)

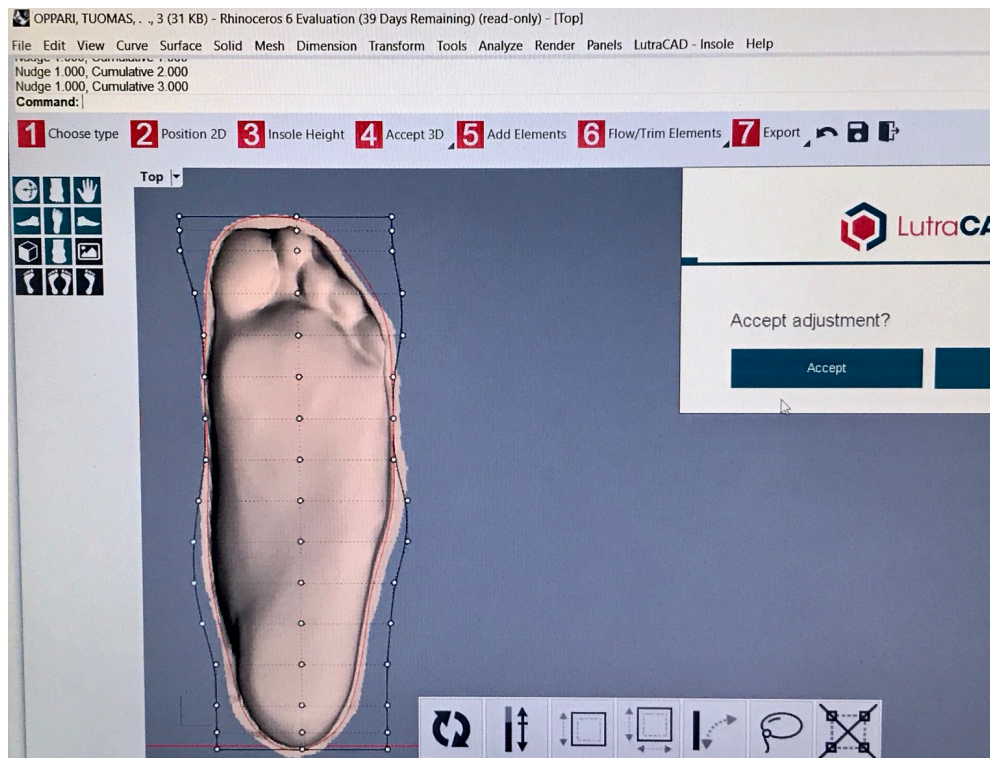
Insole Design Software ohjelmaan tuodaan ylimääräisistä muodoista siistitty skannaustiedosto, josta mallinnusohjelma saa mallin yksilölliset mittatiedot. Tämän jälkeen ohjelman avulla määritellään halutut parametrit eli ominaisuudet. Ohjelmalla on mahdollista lisätä esimerkiksi jalkaterän asentovirheitä korjaavia kiiloja tai yleisesti käytetty poikkitaikaarentuki. Erilaisten ominaisuuksien lisääminen on tehty helpoksi ja käyttäjäystävälliseksi. Tarvittavat tukipohjallisominaisuudet voikin valita valmiiden mallien joukos-

ta. Mallinnusohjelma opastaa käyttäjää askel kerrallaan valmiiseen tulostettavaan 3D-pohjallistiedostoon saakka (kuvio 4).



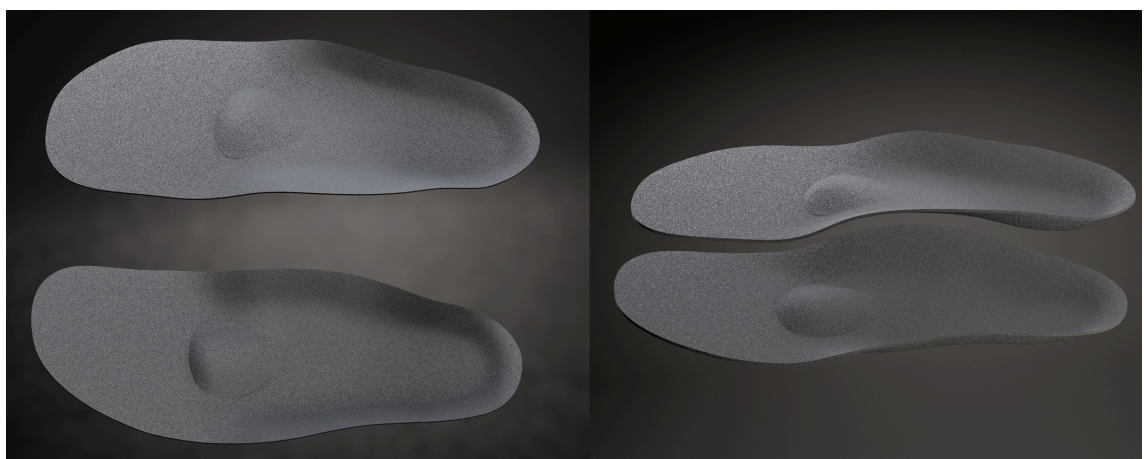
Kuvio 4. Skannattua tiedostoa sovitetaan LutraCadin Insole Design Software mallinnusohjelmassa ennalta valittuun pohjatiedostoon.

Opinnäytetyömme keskiössä olevista yksilöllisistä tukipohjallisista päätettiin tehdä mahdollisimman neutraalit, ilman jalkaterien asentokorjauksia. Tukipohjallisia päätettiin pidentää hieman, jotta mahdolliselle hiomiselle jäisi mahdollisuus pohjallisia sovitettaessa (kuvio 5.). Päkiän alue mallinnettiin tasaiseksi ja pitkittäiskaarta madallettiin hiukan. Muita tukipohjallistiedostoon tehtyjä muokkauksia ja lisäominaisuuksia olivat muun muassa poikittaiskaarentuki sekä kantakupin reunojen luonti. Tällä pyrittiin tasaamaan normaalista kävelystä syntyvää painetta. Tämän jälkeen tukipohjallisten reunat mallinnettiin ja materiaalipaksuudeksi yleisesti asetettiin 2 millimetriä. Pitkittäiskaaren mediaalipuolen tukea ja kantakupin reunoja ohennettiin n. 1.4 mm:iin. Lopuksi tiedostot muunnettiin stl-tiedostoiksi. Stl-muodossa olevia 3D-tiedostoja pystytään lukemaan ja muokkaamaan eri 3D-ohjelmien välillä.



Kuvio 5. Pohjallisen reunoja suurennetaan LutraCad Insole Design Software mallinnusohjelmalla.

Tukipohjallisiin suunniteltu päkiän alueen taivutuksen keventäminen luotiin Modo ohjelmalla. Kyseisellä 3D-ohjelmalla mallinnettiin metatarsaalin distaalipään nivelten linjaa mukailevat urat (4 kappaletta). Urasyvyydeksi valittiin 1 millimetri tukipohjallisen 2 millimetrin kokonaispaksuudesta. Modo-ohjelmalla tehtiin lopulliset tulostustiedostot, jotka lopulta siirrettiin HP:n tulostimeen 3D-tulostusta varten (kuvio 6).



Kuvio 6. Modo-ohjelmassa mallinnetut ja renderoidut kuvat tulostettavista tukipohjallisista.



Kuvio 7. Valmistuneet tukipohjalliset päkiän alueelle mallinnetuilla taivutusurilla.

Tulostetut tukipohjalliset vastasivat täsmälleen mallinnettuja 3D-tiedostoja. Tukipohjalliset istuivat jalkoihin hyvin ja tukivat kävelyä. Liiallisten muokkausten välttämiseksi pyrimme minimoimaan kuormitusalueiden vääristymisen sekä jalkaterän neutraaliasennon muuttumisen. Tavoitteenamme oli saada kolmelle henkilölle yksilölliset ja neutraalit parit 3D-tulostettuja tukipohjallisia käyttöjaksoksi silmällä pitäen. 3D-tulostetut tukipohjalliset saapuivat viimeistelyä vaille valmiina heinäkuussa 2019 (kuvio 7).

5.3 Kappaleiden hionta ja sovitus

Tukipohjalliset tulostettiin hieman suuremmiksi, kuin skannatut jalkaterämme. Jätimme pohjallisiin viimeistelyä varten varaa, jotta pohjalliset voidaan sovittaa sopiviksi kenkien mukaan. Tukipohjallisten valmistuttua hioimme ne omiin kenkiimme sopiviksi (kuvio 10). Samalla saimme ensikosketuksen AM-tekniikalla tulostettujen tukipohjallisten käsin muokkaamiseen.

Tukipohjalliset saatuaamme HP:ltä havaitsimme yhden kappaleista olevan vahingoittunut kuljetuksessa. Tämä tulostuskappale oli murtunut päkiän alueelta ja varvasosa irronnut mallintamastamme kohdasta. Tästä vastoinkäymisestä huolimatta jatkoimme opinnäytetyömme työstämistä eteenpäin ja hioimme tukipohjalliset käyttövalmiiksi. Materiaalin hionta osoittautui hankalammaksi kuin esimerkiksi etyylivinyyliasetaatin (EVA) hiominen. EVA:sta tehdyt tukipohjalliset ovat yleinen valmistusmateriaali pohjallisten valmistuksessa.

Ennen käyttövalmiiden pohjallisten (kuvio 8.) käyttöönottoa tarvittiin viimeistelyä. Molemmat polyamidiseokset sulivat helposti hiomakoneen pyöriessä suurilla kierroksilla. Sulaneet hiomakohtat jämähtivät materiaalin viilentyessä hiomisen jälkeen kivikoviksi paakuiksi, jotka piti saksien ja käsisahan avulla irrottaa tukipohjalliskappaleista (kuvio 9). Mallikappaleiden reunoihin jäi alustavan hiomisen jälkeen teräviä muovitikkuja. Reunojen huolellinen viimeistely hiomapaperilla oli pakollinen toimenpide käyttömukavuuden takaamiseksi. Terävät ja epäsiistit tukipohjallisen reunat voivat pahimmillaan hangata jalan ihoa tai kengän sisäreunoja.



Kuvio 8. Hiotut 3D-tukipohjalliset, joissa mallinnettu päkiän alueen poikittaisurat.



Kuvio 9. Viimeistelyä vailla oleva tukipohjallinen (vas.). Sulanutta muovimateriaalia (oik.).

6 Aineiston kerääminen

Ennen testijakson aloittamista kuvasimme tukipohjallisten lähtötilanteet erilaisin menetelmin. Tarkoituksenamme oli kuukauden käyttöjakson jälkeen arvioida, mitä tukipohjallisen valmistusmateriaaleille oli käynyt ja vertailla sitä lähtötilanteeseen. Tukipohjallisten käyttöjakson suorittivat opinnäytetyön tekijät Tuomas Mannio, Jaan Seitsara sekä Tarmo Tossavainen. (Liite 1.)

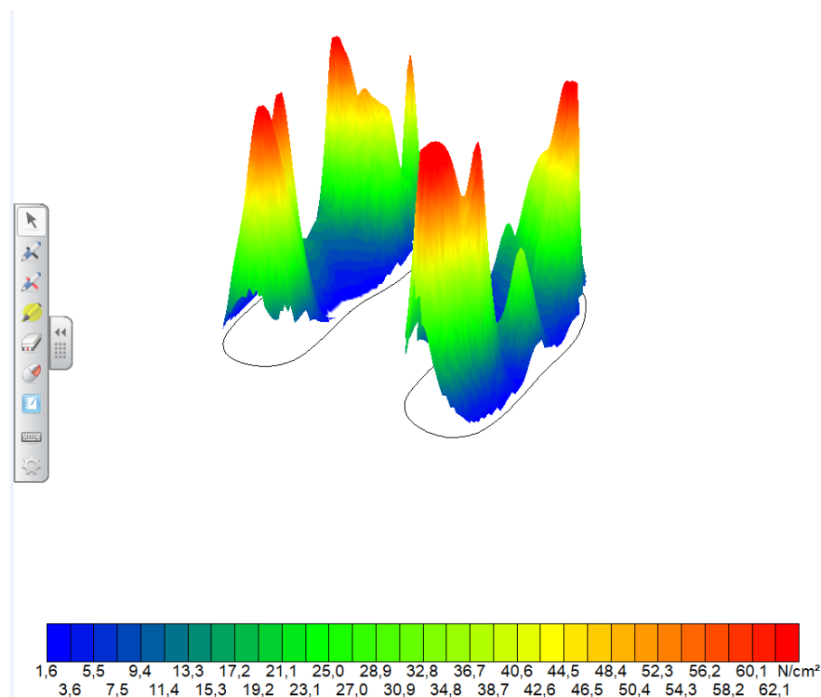
Materiaalien käyttäytymistä ja kulutuskestävyyttä havainnoitiin seurantajakson aikana käyttäjäkohtaisesti erilaisilla testeillä. Tarkemmat muutokset tukipohjallisissa arvioitiin Metropolian Myyrmäen kampuksen materiaalilaboratoriossa ja apuvälinetekniikan työskentelytiloissa Vanhalla viertotiellä. Testijakson jälkeen teimme lopulliset arviot tukipohjallisten kunnosta ja siitä, onko polyamidimateriaaleissa tapahtunut muutoksia.

6.1 Tukipohjallisten arviointiin valitut menetelmät

Keskiverto aktiivinen henkilö ottaa päivän aikana askeleita välillä 7500—10 000. Yli 10000 askelta kävelevä henkilö on jo liikunnallisesti hyvinkin aktiivinen. (Mustajoki 2011.) Keskivertohenkilön päivittäisten askelmäärien huomioiminen ja sen yhdistäminen tukipohjallisten testijakson kestoon antoi meille arvioksi noin 250 000 askelta kuukauden mittaiselle testijaksollemme. 250 000 askeleen aikaansaava rasitus antaa jo tietoa tukipohjallisten polyamidimateriaalien ja 3D-mallinnuksessa tekemiemme muotojen kestävydestä arkipäiväisessä käytössä.

Mittasimme 3D-tulostettujen tukipohjallisten paksuuden ennalta määritellyistä kohdista 18.9.2019, ennen käytön aloittamista. Mittauskohdiksi valikoituivat kantakupin keski-kohta sekä ensimmäisen ja viidennen metatarsaaliluun distaalipäiden alle jäävät jalkaterän anatomiset merkittävät kuormitusalueet. Mittauskohtien määrittämiseen käytimme biomekaniikan taitojamme sekä kirjallisuuteen perustuvaa tietoa jalkapohjan yleisimmistä paine- ja kuormitusalueista. Liukkosen mukaan (2004) seistäessä tasaisella alustalla kehon paino jakaantuu ensimmäisen ja viidennen päkiänivelen päälle 50 prosenttisesti ja kantapäälle toiset 50 prosenttia (Liukkonen 2004:239). Varmistaaksemme kävelyssä kovan rasituksen alla olevat jalkaterän anatomiset maamerkit, mittasimme Medilogic-laitteistolla yhden koehenkilön plantaariset paineet kävelyn aikana. Mittaus suoritettiin ilman 3D-tulostettuja tukipohjallisia Metropolian Vanhan Viertotien kampuksella. Laitteiston käyttämät paineanturit sijoitettiin kengän ja jalkapohjan väliin.

Laite tallentaa ja siirtää kävelystä syntyvää pintapainedataa suoraan siihen yhdistettyinä olevaan tietokoneeseen. (Medilogic 2018:11). Pintapaineiden jakaumaa kuvaavasta kuvasta (kuvio 10.) käy ilmi, että kantapäälle jakautuu selkein paineipiikki, päkiän alueen ollen myös paineen alla.



Kuvio 10. Pintapaineiden jakauma käveltäessä kenkien kanssa.

6.2 Tukipohjallisten tulostusmateriaalin kulumisen mittaaminen

Tukipohjallisten tulostuspaksuus mitattiin Mitutoyo-merkkisellä mikrometrillä (kuvio 11.), joka oli mittauksia varten kalibroitu. Valitut mittauskohdat vahvistettiin arvioitaviin tukipohjallisiin permanenttitussilla, jotta mittauskohdat pysyisivät samana ennen käyttöjakson aloittamista ja tämän päätyttyä. Mikrometri valittiin mittausvälineeksi sen suuren tarkkuuden vuoksi. Mikrometriä hyödyntämällä pystytään havainnoida pienetkin paksuuden muutokset mitattavissa kappaleissa. Yleinen standarditarkkuus mikrometreillä on jopa 4 mikronia (ESSKA.de 2019). 1 millimetri vastaa 1000 mikrometriä.



Kuvio 11. Tukipohjallisten mittaamisessa käytetty Mitutoyo-mikrometri.

Mikäli tukipohjallisissa ilmenee käytöstä johtuvaa kulumista testijakson aikana, olemme sen näkyvän ennalta määritellyissä plantaaripaineiden mittauspisteissä kantapäässä sekä päkiän alueella.

6.3 Röntgenmikroskoopin hyödyntäminen tukipohjallisten kuvaamisessa

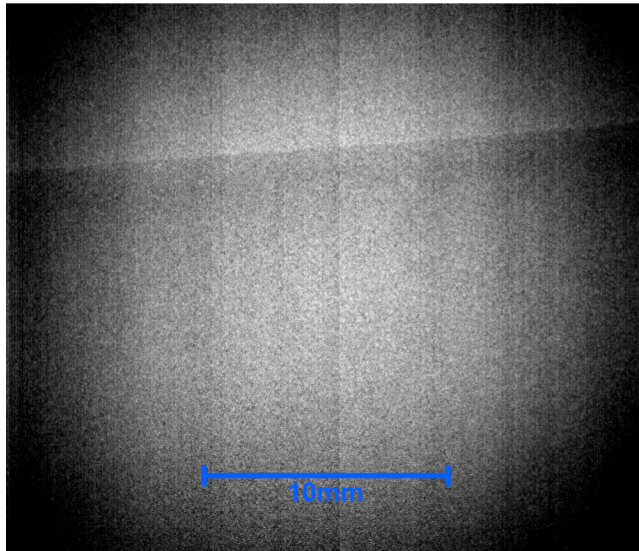
Tarkoituksemme oli yrittää nähdä 3D-tulostettujen tukipohjallisten muovimateriaalin sisälle. Olimme toiveikkaita, että pystyisimme näkemään mahdolliset rasituksen aiheuttamat muutokset tukipohjallisten polyamidiseoksessa ja dokumentoimaan tapahtuneet muutokset selkeästi esitettäväksi ennen ja jälkeen kuviksi. Tässä ideassa saimme apua Metropolian Myyrmäen kampuksen tuotantoteknikolta, joka auttoi kampukselta löytyvän Phoenix Nanomex röntgenmikroskoopin (kuvio 12.) käytössä ja tukipohjallisten tulosmateriaalien tutkimisessa läpivalaisussa. Phoenix Nanomex on suuriresoluutioinen röntgensäteitä käyttävä mikroskooppi, jota käytetään erityisesti pienelektronikaan läpivalaisuun. Laitetta käytetään esimerkiksi silloin, kun halutaan tutkia erilaisten komponenttien liitännöjä ja kuntoa. Mikroskoopilla pystytään erottelemaan yksityiskohtia 200 nanometrin tarkkuudella. (Baker & Hughes 2019.)



Kuvio 12. Phoenix Nanomex röntgenmikroskooppi

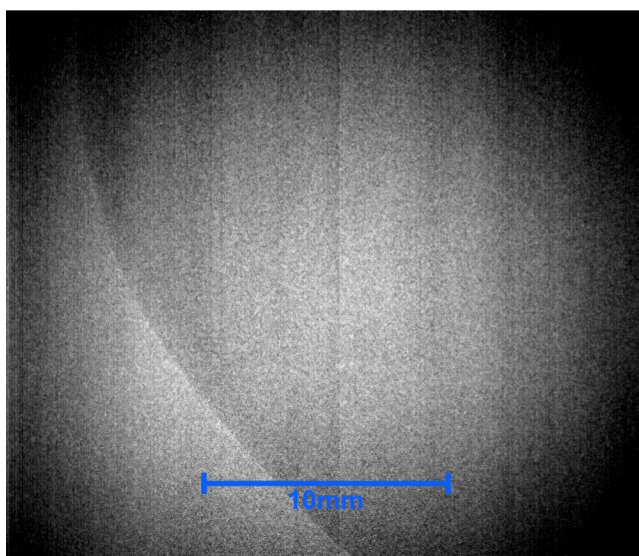
Pyrimme havaitsemaan tukipohjallisten sisällä mahdollisesti tapahtuvat muutokset röntgenmikroskoopilla. Muutoksia voivat olla esimerkiksi halkeamat tai materiaalin väsymisestä johtuvat muutokset. Röntgenmikroskoopilla pyrimme keräämään tietoa 3D-tulostettujen tukipohjallisten rasituksesta aiheutuvasta materiaalien kestosta sekä kulumisesta niiltä alueilta, joiden uskoimme joutuvan kovimman rasituksen alle. Otimme röntgenmikroskoopilla kuvia tukipohjallisten ennalta määritellyistä paikosta, joiden uskomme joutuvan suuren rasituksen alle ja näin ollen olevan potentiaalisia kohteita muutoksen havainnointiin materiaalissa. Kuvat on otettu ennen ja jälkeen testijakson.

Suuren rasituksen alle joutuvat alueet ovat jalkaterän ortoosin pitkittäiskaaren tukialue, päkiän alue, sekä kantakupin reuna-alueet ja kannan keskipiste, mitkä ottavat kantaiskussa koko kehon painon vastaan. Jalan sisäreunalla sijaitseva pitkittäiskaari on jalan holveista sekä pisin, että korkein. Pitkittäinen kaari ottaa kävelyn tukivaiheessa koko kehon painon vastaan joutuen ja madaltuen pronaatioon. (Pohjolainen 2009:215.) Jalkaterän ortoosien tehtävänä on juuri tukea jalan oikeaa asentoa esimerkiksi ottamalla vastaan pitkittäiskaarelle kohdistuvaa rasitusta ja vähentämällä pronaatiota. Tästä syystä olemme valinneet pitkittäiskaaren (kuvio 13.) yhdeksi tarkastelun kohteeksi rasituksen ja kulumisen arvioinnissa.



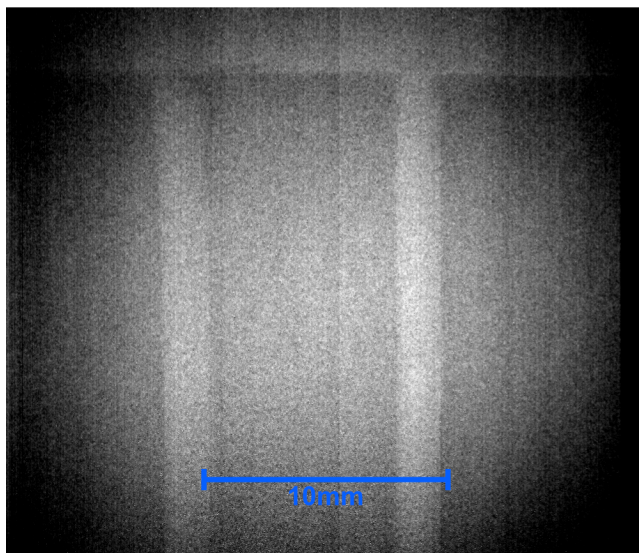
Kuvio 13. Lähikuva tukipohjallisen pitkittäiskaarentuesta. Röntgenmikroskoopilla saatu kuva, jossa koko alapuolen peittävä tummempi alue on pitkittäiskaarentukea. Kuvasta ilmenee, että materiaali on yhtenäistä.

Kantapäähän kohdistuu kävelyn tukivaiheessa kova kuormitus ja paine. (Pohjolainen 2009:215). Kantaisku aiheuttaa kantapäähän kovan hetkellisen paineen, sillä koko kehon paino kohdistuu yhdelle jalalle. Tukipohjallinen pyrkii tukemaan kantapäälle kohdistuvaa painetta tarjoamalla tukipinta-alaa kantakupin reunoista. Tukipohjallisen kantakuppi tarjoaa tukea jalan liialliselle supinaatiolle kantaiskuvaiheessa. Tästä syystä pohjallisen kantakupin reunojen sekä kantapään keskikohtan tutkiminen on perusteltua materiaalin kulumisen kuten myös kestävyuden näkökulmasta (kuvio 14.). Uskomme, että kantapään alue tulee kulumaan eniten tukipohjallisten kuukauden pituisen käyttöjakson aikana.



Kuvio 14. Tukipohjallisen kantakupin reunan röntgenkuva.

Kävelyn päätöstukivaiheessa kantapää kohoaa ja päkiän alue käynnistää askeleen ponnistamisen, jolloin askel ja koko keho samalla rullaavat eteenpäin taipuneen päkiän yli. (Ahonen 2004:146). Tästä johtuen päkiän alueelle kohdistuu kova rasitus tukipohjallisen etuosan ollessa taipuneena dorsiflexioon, toisin sanoen varvastyöntöön. Mallinimme pohjallisiin joustavuutta lisääviä ominaisuuksia, joita tässä tapauksessa ovat poikittaiset viivat tukipohjallisen päkiäalueella. Nämä toimivat ”haitarimaisesti” keventäen materiaalin taipumiseen vaadittavaa venytystä. Päkiä tulee olemaan alue, jossa jalkaterän ortoosin materiaalin taipuisuus joutuu eniten koetukselle. Tästä syystä valitsimme sen yhdeksi ennalta määritellyksi alueeksi materiaalin kestävyuden ja kulumisen arvioinnissa (kuvio 15.).



Kuvio 15. Röntgenmikroskooppilla otettu kuva päkiän alueesta, jossa näkyy tukipohjallisiin mallinnetut taipuisuutta lisäävät poikittaisviivat.

6.4 Optinen mikroskopia

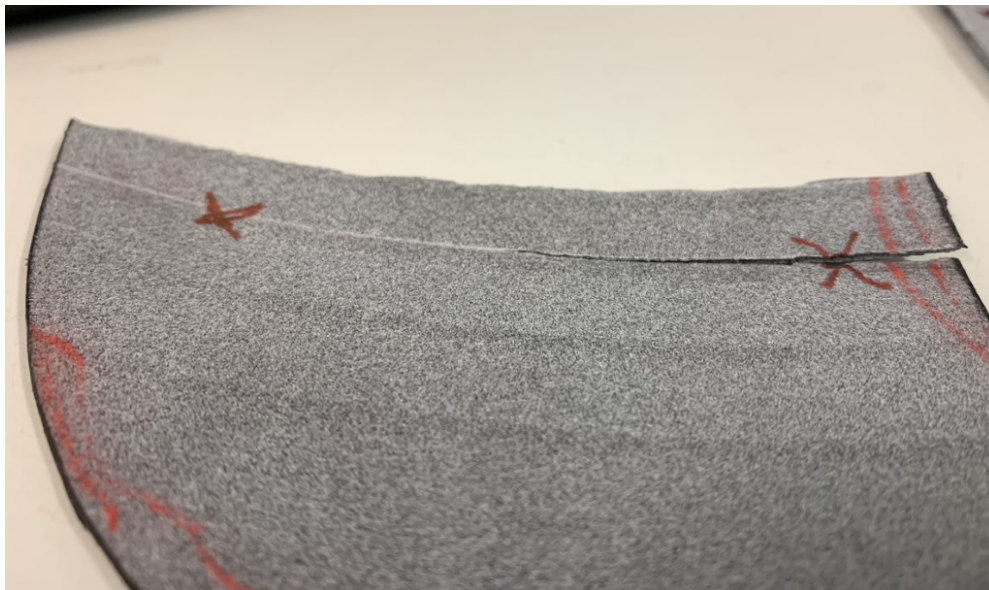
Optisella mikroskopiolla voidaan selvittää materiaaleissa ilmeneviä rakennevirheitä ja materiaalihiukkasten jakaumia. Sitä käytetään analysoidessa erilaisten materiaalien pintaominaisuuksia. Läpivalaisulla nähdään ohuiden muovikappaleiden läpi, jolloin partikkeleiden muodot tulevat selkeämmin esiin (Seppälä 2008: 114—115.). Tukipohjallisten valmistusmateriaalien mahdollisista eroista pyrittiin saamaan selvää optisen mikroskopian avulla.

7 Tulokset

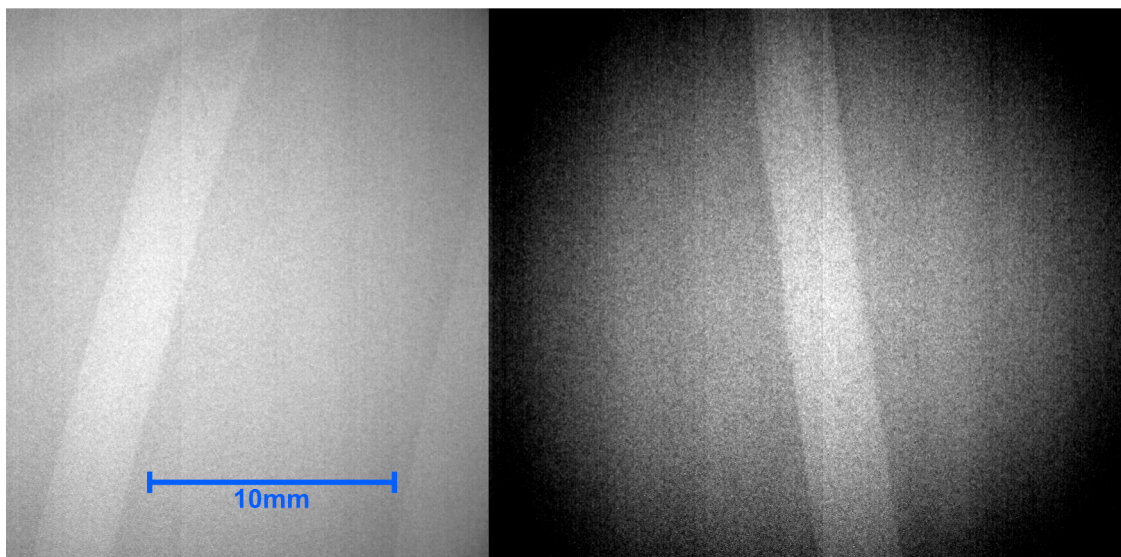
Tukipohjallisten testijakso alkoi syyskuun 18. päivä ja käytimme niitä lokakuun 18. päivään asti. Näin saavutimme kuukauden mittaisen käyttöjakson. Lutracadin Insole Design Software ohjelmalla mallintamamme pohjalliset saapuivat tulostettui-
na HP:ltä heinäkuussa. Saatuaamme tukipohjalliset huomasimme heti malliemme yhden heikkouden. Päkiän alue, jolle olimme mallintaneet taipuisuutta lisääviä poikkiviivoja, oli tulostunut todella ohueksi. Olimme mallintaneet kyseisen alueen hieman liian ohueksi ja teimmekin heti hypoteesin, että päkiän alue on luultavimmin se alue, jossa mahdollisia murtumia tulee esiintymään.

7.1 Röntgenmikroskoopin tulokset

Myyrmäen kampuksen röntgenmikroskoopin kuvien tulkitseminen ja hyödyntäminen osoittautui vaikeaksi tukipohjallisen materiaalien arvioinnissa. Röntgenmikroskoopin tuottamat kuvat eivät kertoneet meille kovinkaan paljoa PA 11 ja PA 12- materiaalien kestosta taikka rakenteesta. Merkittävin ero oli se, että vaaleampi muovi, PA 11 näkyi mikroskoopissa hieman paremmin verrattuna PA 12- tulostettuun tukipohjalliseen. Itse materiaalien koostumuksesta emme saaneet selvitettyä suurempaa tietoa röntgenmikroskoopin avulla. Noin viikon käytön jälkeen yhdestä PA 11-muovimateriaalin tukipohjallisparista katkesi päkiän alueen taipuisuutta lisäävän poikkiviivan mukaisesti pohjallisen etuosa (kuvio 16.). Katkenneessa kärjessä näkee jo silmämääräisesti, että halkeama on syntynyt toiseen reunaan (oikealla sijaitsevan merkin alla). Toisessa reunassa on taas ilmentynyt rasituksesta johtuva materiaalin taipuisuuden kuoleentuminen (vaalea viiva vasemman puoleisen merkin alla). Röntgenmikroskoopilla katsottaessa materiaali esiintyi kuitenkin hyvin yhtenäisenä jopa alkavissa murtumakohdissa, joita tarkastelimme lähemmin (kuvio 17.).



Kuvio 16. PA 11-muovimateriaalista valmistetun tukipohjallisen etuosan halkeama, johon merkattuna alueet röntgenmikroskoopin kohdennusta varten.



Kuvio 17. Röntgenmikroskoopilla otettu kuva (vas.) alkavasta murtumasta, kuvassa ei näy materiaalissa tapahtunutta muutosta. Röntgenmikroskoopilla otettu kuva (oik.) poikkiviivan mukaisesta halkeamasta, kuvassa ei näy materiaalissa tapahtunutta muutosta.

7.2 Mikrometrimittaukset tukipohjallisten käyttöjakson päätyttyä

Kuluminen määritellään tukipohjallismateriaalissa tapahtuneena materiaalin häviämisenä. Tukipohjallisen materiaalin kulumisen on johtunut pinnan kulumisesta sekä pohjallisen pinnan painumisesta kehon painon alla. Tukipohjallisissa on tapahtunut kuu-kauden käyttöjakson aikana liukuvana kulumisena (*sliding wear*) tunnettua materiaalin

kulumista. Liukuvaa kulumista tapahtuu kahden kiinteän kappaleen välillä paineen kohdistuessa niihin. Tämän kaltainen kulumisen voi syntyä monella erilaisella menetelmällä. Esimerkiksi pintamateriaaliin kohdistuva hankaava liike sekä materiaalissa esiintyvä pito aiheuttavat kulumista. (Karl-Heinz Zum Gahr. 1987.)

Käyttöjakson aikana tapahtunut jalkaterän hankaus polyamidiseoksista tulostetun tukipohjallisen pintaa vasten aiheutti kitkaa. Kävelystä aiheutunut kitka yhdistettynä kenkässä vallitsevaan kosteuteen aikaan saattoi 3D-tulostettujen tukipohjallisten polyamidiseosten kulumisen, eli paksuuden vähenemisen. Kulumista eli paksuuden muutosta selvennetään alla olevilla taulukoilla sekä kuvioilla.

Ennen käyttöjakson aloittamista tukipohjallisten paksuudet mitattiin ja kirjattiin ylös. Mitattuumme lähtötilanteen 18.9.2019 (taulukko 1.) pystyimme aloittamaan tukipohjallistemme kuukauden pituisen käyttöjakson.

Taulukko 1. Tukipohjallisten mittauspisteiden paksuudet 18.9 ennen käyttöjakson aloittamista.

	Kantapää (mm)	1. Metatarsaali (mm)	5. Metatarsaali (mm)
PA 11&PA 12			
PA11 (oik.)	2,075	1,926	1,955
PA12 (vas.)	2,059	1,945	1,967
PA 11			
Oikea	2,145	1,951	1,944
Vasen	1,855	1,981	1,966
PA 12			
Oikea	2,206	2,087	2,12
Vasen	2,533	2,166	2,08

Kuukauden pituisen käyttöjakson tuottamat muutokset pohjallisten paksuudessa mitattiin uudestaan 18.10.2019 mikrometrillä tukipohjallisten loppumittauksissa (taulukko 2.). Taulukosta käy ilmi, että muutosta paksuuteen oli tapahtunut kuukauden mittaisen käyttöjakson aikana.

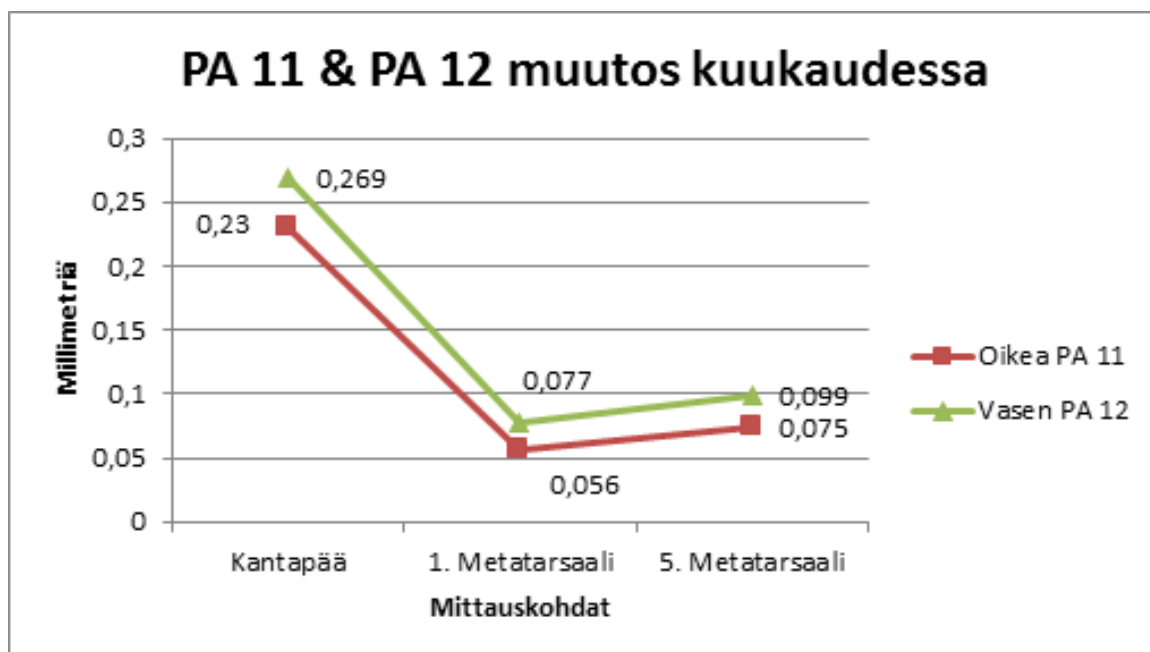
Taulukko 2. Tukipohjallisten mittauspisteiden paksuudet 18.10 käyttöjakson jälkeen.

	Kantapää (mm)	1. Metatarsaali (mm)	5. Metatarsaali (mm)
PA 11 & PA 12			
PA 11 (oik.)	1,845	1,87	1,88
PA 12 (vas.)	1,79	1,868	1,868
PA 11			
Oikea	1,79	1,905	1,86
Vasen	1,69	1,814	1,869
PA 12			
Oikea	1,79	2,025	1,94
Vasen	1,665	2,027	1,98

Tukipohjallisten paksuudessa mitatut muutokset kuukauden käyttöjakson jälkeen osoittavat, että kulumista on tapahtunut jokaisessa kolmessa mittauskohdassa. Kulumista on tapahtunut eniten kantapään alueella. Ensimmäisen ja viidennen metatarsaali-alueen kulumisen jäädessä vähäisemmäksi kantapäähän verrattaessa. Kahden eri polyamidiseoksen, PA 11 ja PA 12 kulumisnopeudesta sekä materiaalin kestosta saatiin myös tuloksia. Huolimatta tukipohjallisten käyttöjakson ollessa vain kuukauden pituinen, huomasimme PA 11- materiaalin kuluvan hieman hitaammin eli toisin sanoen vähemmän verrattaessa PA 12- materiaalin. Kulumista havaittiin kaikilla tukipohjallisilla sekä kummallakin polyamidiseoksella. Kuukauden pituisen käyttöjakson aikana tapahtunutta muutosta eli kokonaiskulumista havainnoidaan alla olevilla taulukoilla. Kokonaiskuluminen on ilmoitettu alla olevissa taulukoissa (taulukot 3, 4, 5) millimetreissä.

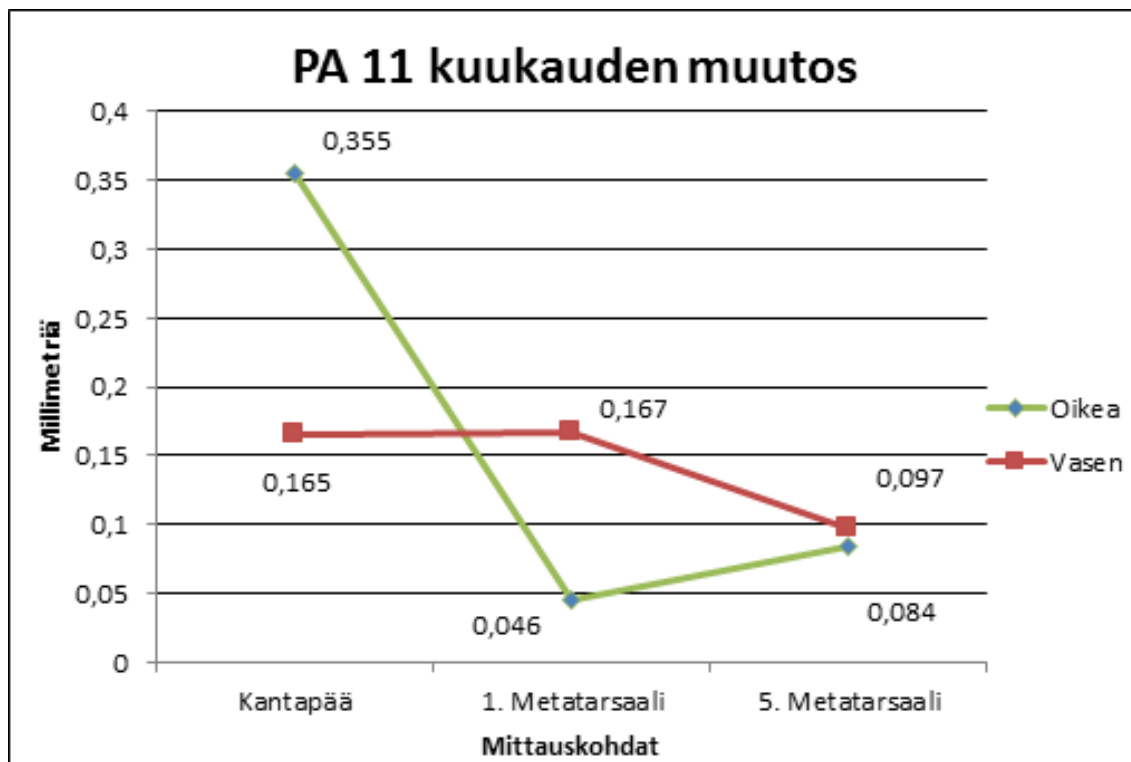
Taulukoissa esiintyvä vaaka-akseli (x) esittää kutakin valittua mittauskohtaa tukipohjallisissa. Pystysuunnan akseli (y) taas kuvaa kokonaiskulumista kuukauden käyttöjakson aikana millimetreissä mitattuna. Yksi millimetri vastaa 1000 mikrometriä.

Taulukko 3. Ensimmäisen tukipohjallisparin kokonaiskuluma kuukauden mittaisen käyttöjakson aikana kummankin tukipohjallisen (PA 11 ja PA 12) kohdalla.



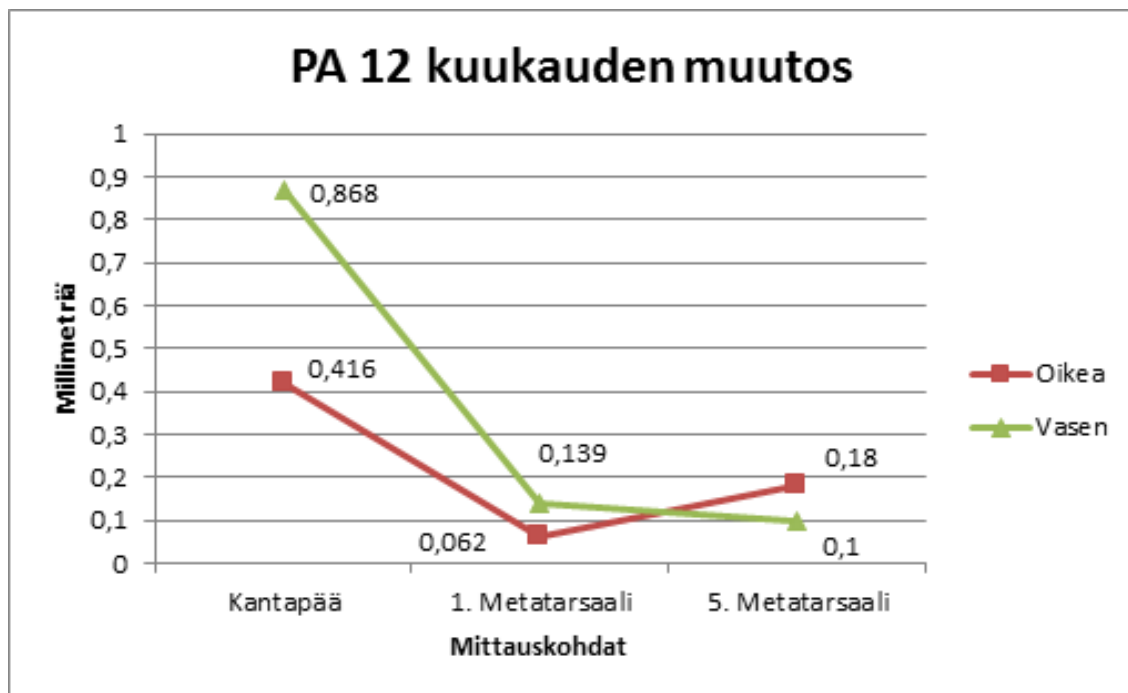
Ensimmäisessä taulukossa (taulukko 3.) ilmenee, että PA 11 materiaalista valmistettu tukipohjallinen on kulunut kuukauden mittaisen käyttöjakson aikana jokaisen mittauspaikan osalta vähemmän verrattaessa PA 12 materiaalista valmistettuun tukipohjalliseen. Kuluminen on ollut suurimmillaan noin 0,27 millimetriä. Luku ei kuulosta suurelta yksinään mutta suhteutettuna alkuperäiseen 2 millimetrin materiaalipaksuuteen saatu tulos asettuu mittakaavaan.

Taulukko 4. Toisen tukipohjallisparin kokonaiskulumaa kuukauden mittaisen käyttöjakson aikana kummankin tukipohjallisen (PA 11) kohdalla.



Toisessa taulukossa (taulukko 4.) huomataan, että toisella PA 11- materiaalista valmistetulla tukipohjallisella kulumista oli tapahtunut poikkeuksellisesti eniten ensimmäisen metatarsaalin alueella. Tämä muista tuloksista eriävä havainto voi johtua esimerkiksi yksilöllisestä kävelytyylistä, tässä tapauksessa lievistä ylipronaatiosta, jota kyseisellä tukipohjalliskäyttäjällä esiintyy luonnostaan.

Taulukko 5. Kolmannen tukipohjallisparin kokonaiskuluma kuukauden mittaisen käyttöjakson aikana kummankin tukipohjallisen (PA 12) kohdalla.



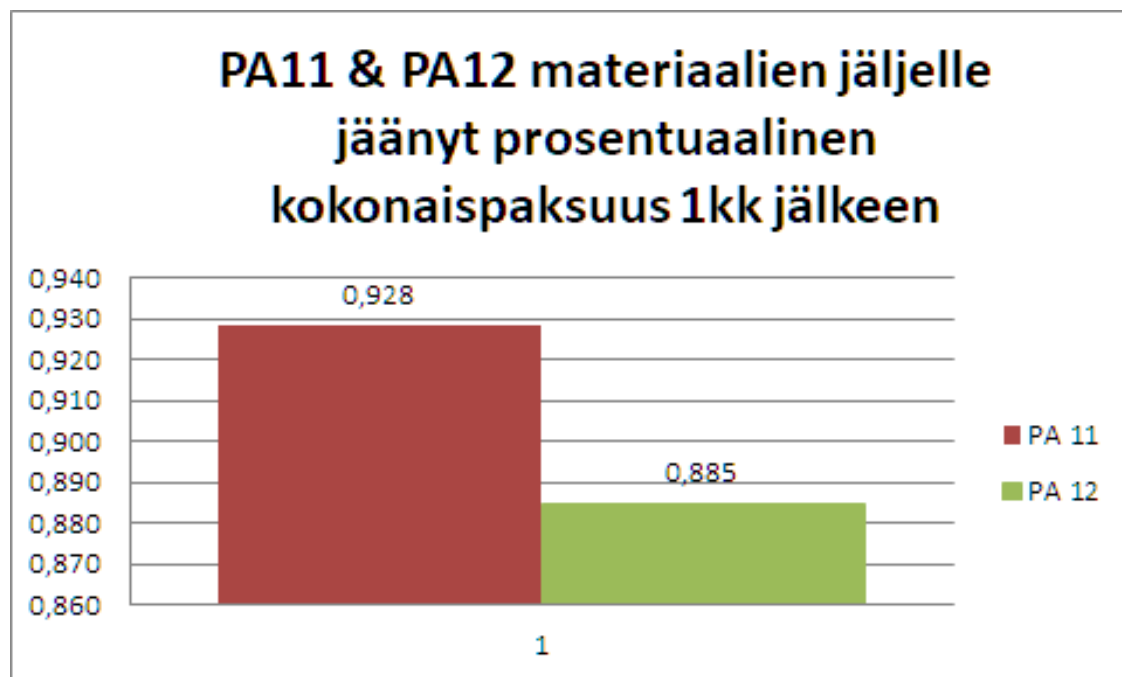
Kolmannessa taulukossa (taulukko 5.) havaitaan suurin yksittäinen kuluminen kuukauden pituisen käyttöjakson ajalta. Toisen PA 12 materiaalista valmistetun tukipohjallisen kantapään alue on kulunut noin 0,87 millimetriä alkuperäisestä tulostuspaksuudesta.

Kokonaiskuluminen tukipohjallisilla oli tukipohjallisparista riippuen välillä 0,9 – 0,04 millimetriä. Tukipohjallisten tulostuspaksuus oli ennen kuukauden käyttöjakson aloittamista noin 2 millimetriä per mittauskohta, joten kuluminen havainnointi oli helposti arvioitavissa mikrometrin tarjoamista mittaustuloksista. Alla olevasta taulukosta (taulukko 6) selviää opinnäytetyössä arvioitujen kahden eri polyamidiseoksen lopullinen kuluminen kuukauden testijakson ajalta. Taulukossa kuvataan tapahtunutta muutosta alkuperäisestä tulostuspaksuudesta kuukauden käytön jälkeisiin mittaustuloksiin ja se ilmoitetaan jäljelle jäävänä prosentuaalisena paksuutena.

Taulukosta selviää, että PA 11 polyamidiseoksesta valmistettujen tukipohjallisten kolmen eri mittauskohdan kuluminen keskiarvo alkuperäiseen mittaustulokseen verrattessa on 7,2 prosenttiyksikköä ($1 - 0,928 = 0,072$). PA 12- polyamidiseoksesta valmistettujen tukipohjallisten kuluminen keskiarvo kolmen eri mittauspisteen välillä ennen ja jäl-

keen kuukauden mittaisen käyttöjakson jälkeen on taas 11,5 prosenttiyksikköä ($1 - 0,885 = 0,115$).

Taulukko 6. PA 11 ja PA 12 materiaalien jäljelle jäänyt prosentuaalinen kokonaispaksuus kuukauden mittaisen käyttöjakson jälkeen.

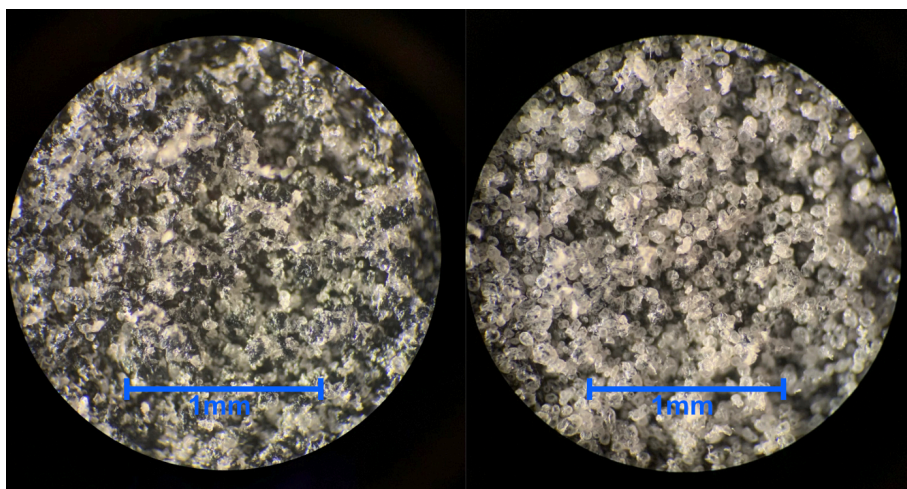


PA 11 materiaalin kohdalla alkuperäisestä paksuudesta on jäljellä 92,8 prosenttia. Enemmän kuluneen PA 12 materiaalin kohdalla alkuperäisestä paksuudesta on jäljellä 88,5 prosenttia. Saatu tulos tukipohjallisten polyamidiseosten kulumisesta on yhtenäisen aikaisemmin mainitun tutkimuksen (Salazar ym. 2014.) kanssa, jossa todetaan PA 11- materiaalin olevan kulutuskestävämpi polyamidiseos vaihtoehtona verrattuna PA 12- materiaaliin. PA 12 polyamidiseos kului 38 prosenttiyksikköä enemmän kuukauden aikana verrattaessa PA 11 polyamidiseokseen.

7.3 Optinen mikroskopiakuvaus testijakson jälkeen

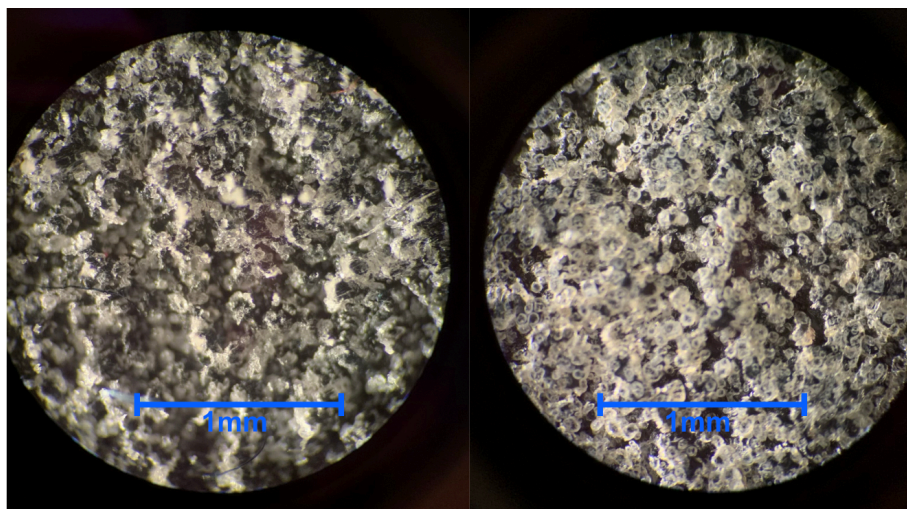
Käytimme opinnäytetyössämme optista mikroskopiaa kuvantamaan materiaalin pinnan muotoa ennen tukipohjallisten käyttöönottoa ja testijakson jälkeen (kuvio 18.). Tavoitteena oli havaita mahdollista kulumista materiaalin pintatasolla. Mikrokooppikuvat otettiin pintavalaistuna, koska polyamidiseos ei läpäise valoa. Mikrokooppikuvan suurennus on kymmenenkertainen. Mikroskopian avulla nähdään tarkasti, miltä esimerkiksi

mahdollisten kuluma- ja murtumakohtien partikkelit näyttävät. Tutkittaessa tukipohjallisten pintaa optisella mikroskoopilla todettiin pientä eroavaisuutta PA 11 ja PA 12 materiaalien rakenteessa. PA 12-muovimateriaali on kristallisoituneempaa partikkelien osalta, mikä viittaisi heikompaan materiaalikestävyyteen (Salazar ym. 2014:43). PA 11-muoviseos on taas partikkeleiltaan selkeämmin eroteltavissa. Hiukkasten muoto on säännöllisempää, sillä partikkelit ovat pyöreämpiä ja erillään toisistaan. PA 11-materiaalin raekoko on myös kuvissa silmämääräisesti suurempi kuin PA 12-materiaalissa esiintyvät partikkelit.



Kuvio 18. Alkutilanne: PA 12:sta valmistetun tukipohjallisen pinnan mikroskooppikuva (vas.). Alkutilanne: PA 11:sta valmistetun tukipohjallisen pinnan mikroskooppikuva (oik.).

Pohjallisten pinnassa havaittiin hienoisia kulumisen jälkiä käyttöjakson päätyttyä. Kohdentaessa optisen mikroskoopin kuluneelta näyttäviin alueisiin pystyttiin tukipohjallisten materiaalissa havaita paikoittain kuluneisuutta. Pinta ei ollut yhtä kiiltävä paikoista, joissa kulumista havaittiin silmämääräisesti katsomalla. Tulkitsemme materiaalin pinnan muuttumisen kulumiseksi (kuvio 19.). Materiaalin pinnalla havaittiin myös jonkinlaisia kuituja, mitä luultavimmin käyttäjien sukista taikka kengistä irtautuneita. Mikroskoopilla nähtyjä muutoksia kahden eri polyamidiseoksen yksilöllisessä kulumisessa on haastavaa arvioida. Saaduista tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että pintamateriaalin kulumista havaittiin sekä PA 11 että PA 12 polyamidiseoksissa. Polyamidiseosten kulumisnopeuden suuruudesta emme kuitenkaan pystyneet optisen mikroskopian avulla saamaan selvää tulosta. Tästä syystä optinen mikroskopia ei tarjonnut polyamidiseosten kulumisesta merkittävää taikka luotettavaa tietoa tällä testijaksolla.



Kuvio 19. PA 12:sta valmistetun tukipohjallisen pinta kuukauden mittaisen käyttöjakson jälkeen (vas.). PA 11:sta valmistetun tukipohjallisen pinta kuukauden mittaisen käyttöjakson jälkeen (oik.).

Kiinnostavin sekä merkittävin löydös, jonka optisen mikroskoopin läpi katsominen tarjosi, olikin kahden eri polyamidiseoksen erilaisen koostumuksen erottaminen toisistaan. Tarkasteltaessa materiaaleja pystyttiin havaita selkeä ero polyamidiseosten 11 sekä 12 välillä. PA 12 näytti visuaalisesti yhteneväisemmältä ja terävämuotoisemmalta, kun taas PA11 irtonaisemmalta ja sen rakeisuus pyöreämmältä.

8 Johtopäätökset ja pohdinta

Opinnäytetyömme oli toiminnallinen työ, jossa perusideana oli hankkia aineistoa kvantitatiivisella menetelmällä. Aineiston hankinta piti sisällään myös kvalitatiivisia elementtejä. Kvantitatiivisen, eli määrällisen tutkimustyyppin piirteinä esiintyi tukipohjallisten tulosmateriaalin kulumisen arviointi numeraalistesti ja saatujen tulosten arviointi sekä vertailu toisiinsa. Koimme kuitenkin myös hyödyntäneemme kvalitatiivista, eli laadullista tutkimustyyppiä opinnäytetyömme toteutuksessa. Kvalitatiivista menetelmää käytimme tukipohjallisten 3D-mallitamisen innovoinnissa sekä kehittämissä, sekä toimimalla itse aineiston keräämisen kohderyhmänä. Kvalitatiivista tutkimussuuntausta puolsi myös, ettei opinnäytetyössä esitetty kvantitatiiviselle tutkimukselle ominaisia hypoteeseja. Kvantitatiivisen ja kvalitatiivisen tutkimussuuntauksen välisiä eroavaisuuksia onkin tapana korostaa, vaikka molempia suuntauksia hyödyntämällä voidaan selittää tai arvioida tutkittavia kohteita kokonaisvaltaisemmin kuin pelkästään yhtä tutkimussuuntausta hyödyntämällä (Jyväskylän yliopisto 2015).

Opinnäytetyön toteuttamisessa vaikeinta oli polyamidiseosten testausmenetelmien valitseminen, sillä PA 11 ja PA 12- seokset eivät olleet entuudestaan tuttuja. Kirjallisuudesta löytyi tukipohjallistutkimuksia, jotka usein keskittyivät biomekaniikan tutkimiseen ja ortoosihoidon vaikuttavuuteen erilaisissa indikaatioissa. Täten tutkimusmenetelmien valinta oli jo itsessään hyvä oppimisprosessi.

Testimenetelmien valintaan vaikuttivat käytössä olevat resurssit. Yksi alkuperäisistä ideoista olisi ollut varvastyöntöä tukipohjalliselle mallintavan laitteen hyödyntäminen, jotta toistomääriä taivutukselle olisi saatu moninkertainen määrä nykyiseen verrattuna. Toisaalta mittaaminen normaalissa käytössä kengässä vastaa todenmukaista tilannetta paremmin, joten tulevaisuudessa mahdollisesti toteutettavien tutkimusten testijakson pituus olisi oltava pidempi. Testijakson pituudeksi suunnittelimme aluksi neljää kuukautta, jolloin jokainen tulostettu pohjallispari olisi saanut laskelmiemme mukaan noin miljoona askelta alleen. Pitkä tulostusjono HP:n puolella sekä kesä kuitenkin muuttivat projektin suunniteltua aikataulutusta niin suuresti, että siirsimme testijakson syyskuulle. Tästä johtuen lopullinen testijakso kutistui neljästä kuukaudesta kuukauden mittaiseksi.

Arviontimenetelmien osalta optinen mikroskopia tuotti visuaalisesti havaittavia eroavaisuuksia polyamidiseosten pintapartikkeleissa koejakson päätyttyä. Röntgenmikroskoopi osoittautui kuitenkin pettymykseksi, sillä emme saaneet kyseisellä laitteella

merkittävää tietoa tukipohjallisten rakenteesta tai materiaalien kulutuskestävyydestä. Tämä tieto voi osoittautua hyödylliseksi tulevia tutkimuksia suunniteltaessa sekä opinnäytetyötä tekeville opiskelijoille, jotka miettivät röntgenmikroskoopin hyödyntämistä 3D-tulostuksessa käytettävien polyamidiseosten rakenteen ja kestävyuden tutkimisessa.

Vaikeuksista huolimatta koimme, että tämä opinnäytetyö oli hyvä aloitus 3D-tulostettujen tukipohjallisten käyttöön ja materiaaleihin liittyen apuvälinealalla. Tulostaminen on jo läsnä apuvälineiden valmistuksessa, mutta tukipohjallisten osalta se on Suomessa vielä hyvin vähäistä. Käytännönläheisellä informaatiolla on täten arvoa, sillä monet toimijat joutuvat tulevaisuudessa miettimään toimintamallejaan 3D-tekniikan yleistyessä, kysynnän noustessa ja valmistuskulujen laskiessa.

Totesimme prosessin aikana, että 3D-tulostettujen tukipohjallisten etuna on niiden

- Tarkka yksilöllinen sopivuus.
- Haluttujen muokkauksien tekeminen nopeasti.
- Keveys, muoto ja vähäinen valmiin pohjallisen muokkaamisen tarve.
- Materiaalien säästyminen.
- Mahdollisesti kustannustehokkaampi ratkaisu tulevaisuudessa.

Perinteisillä menetelmillä valmistetut tukipohjalliset ovat usein liian paksuja eivätkä istu kenkään optimaalisella tavalla. Halutusta tulostuspaksuudesta riippuen 3D-tulostetun tukipohjallisen paksuus olisi pehmusteineenkin asiakkaan kenkiin hyvin sopiva. 3D-tulostetuille pohjallisille saavutetaan hyvä tuki ja rakenne jo 2 millimetrin tulostuspaksuudella. Materiaalin jäämäkkyys takaa ohuempanakin tukipohjallisiin tarvittavan tuen. Ympäristökysymyksiin tultaessa hukkamateriaalia syntyy vähemmän 3D-tulostuksesta, sillä materiaalia syntyy vain tulostettavan kappaleen verran. Tämä ei välttämättä yhden tukipohjallisparin kohdalla ole vielä merkittävä säästö, mutta mahdollisen massatuotannon alkaessa hyvinkin varteenotettava näkökulma. Kustannustehokkuutta on vielä hankala laskea 3D-tulostuksen ollessa menetelmänä vähäinen tukipohjallisten valmistuksessa. Uskomme kuitenkin, että prosessin yleistyessä ja helpottuessa tukipohjallisprosessiin kuluu vähemmän työtunteja, kuin esimerkiksi kipsinegatiivin mu-

kaan valmistetuissa tukipohjallisissa. Kustannustehokkuuteen vaikuttaa toki moni muukin asia, joten sitä voisi tulevaisuudessa opinnäytetyöissä kartoittaa tarkemminkin.

3D-tulostuksen suurimpina ongelmina tukipohjallisten valmistuksessa pidimme

- 3D-mallinnuksen ja erilaisten tietokoneohjelmien oppimiseen varattavan ajan
- Uusien materiaalien ja 3D työkalujen käyttöönoton ilman aikaisempaa kokemusta
- Tulostuksen ulkoistamisesta johtuvia ongelmia, jolloin koko valmistusprosessi ei ole enää omassa käsissä
- Tutkimusnäytön ja käyttökokemusten puutetta.

Mallinnuksen osaaminen on tärkeä osa onnistunutta 3D-tukipohjallisprosessia. Perehdytys vaatii aikaa ja resursseja yrityksiltä, joten se voisi jo olla ensimmäinen kompastuskivi 3D-tekniikan käyttöönotossa. Toisaalta LutraCadin Insole Design Software on juuri pohjallisten tekoön räätälöity ohjelma, joten sillä voidaan mallintaa skannattuja tiedostoja suhteellisen lyhyellä opiskelulla. Näin ollen ohjelma sopii pohjallisten 3D-tulostuksen mallintamistyökaluksi hyvin. Ohjelmassa voidaan lisätä pohjallisiin muun muassa asennonkorjaus, iskunvaimennus ja muita tukielementtejä. Haittana Insole Design Software:ssa on, että se toimii RhinoCeros ohjelman päällä. Käyttääkseen kumpaakin ohjelmaa, joutuu hankkimaan molempiin omat lisenssit. Lisenssien hankinta ja voimassa pitäminen on merkittävä kustannus 3D-tulostamisen mahdollistamisessa.

Tulostettujen pohjallisten ainevahvuus oli päkiän osalta noin 2 millimetriä. Työelämästä saadun tiedon perusteella oletimme, että päkiän alue vaatii taipuakseen ja materiaalin kestävyden takia kevennyksiä. Toteutimme tämän poikittaisurittamalla päkiän alueen. Käytössä kaikki murtumiset tapahtuivat näiden urien kohdassa. Urien kohdilta paksuus oli noin 1 mm tai alle sen. Jos pohjallisten reunoja päkiän osalta ei nosteta ts. pinta on tasainen ja mahdollistaa taipumisen, tällaisia urituksia ei välttämättä tarvita. 2 mm ainevahvuus taipuu jalkapohjassa hyvin näillä materiaaleilla ja voisi ajatella, että paksumpi pohja synnyttäisi jousivaikutuksen, joka voisi olla jopa kävelyä keventävää. Lisäksi paksumpi materiaali voisi olla kestävämpää käytössä.

Kulutuskestävyys on määritelty opinnäytetyössämme tukipohjallisten kykyinä sietää erilaisten fysikaalisten ja mekaanisten vuorovaikutussuhteiden ja tapahtumasarjojen

merkityksiä. Hyväksi kulutuskestävyydeksi määrittelimme kappaleiden rakenteiden rikkoontumattomuuden ja merkittävän kulumattomuuden testijakson aikana. Kulutuskestävyys on siis tukipohjallisten normaalissa arkisessa käytössä havainnointua kestävyttä. Testijakson aikana voimakkaan varvastyöntövaiheen seurauksena osa arvioitavista tukipohjallisista rikkoutui päkiän alueelta mallinnuksien kohdalta. Nämä mallinnetut urat olivat alun perin tarkoitettu lisäämään tukipohjallisen jousto-ominaisuuksia, mutta ne osoittautuivatkin heti testijakson alussa riskialueiksi kulutuskestävyyden kannalta. (Axén & Hogmark & Jacobson 2001.)

Urituksien kaareutuminen heikensi materiaalin kestoja. Kaareutuneet urat pakottivat päkiän ja metatarsaalialueen pullistumaan hieman varvastyöntövaiheessa ja rasitti urien reunoja. Todellinen liikeakseli kulkee sinisen viivan mukaisesti (kuvio 20. vas.). Parempi ratkaisu olisi ollut tehdä suorat urat metatarsaalinivelten distaalipuolen mukaisesti, jolloin päkiän taipuminen ei rasittaisi mallinnettujen urien reunoja (kuvio 20. oik.).



Kuvio 20. (vas.) kaareutuvat urat rasittavat päkiän taipuessa urien reunoja. (oik.) kuvamanipulaatiolla suoristettut urat. Kuvamanipulaation ratkaisu olisi voinut osoittautua kestävämmäksi.

Kuten aikaisemmin totesimmekin, päkiän rasiherkkä alue yhdistettynä liian ohueen mallinnukseen aiheutti tukipohjallisten murtumisia. Ensimmäinen testijakson havainto tukipohjallisiemme käytöstä johtuvasta materiaalien kestoista ilmeni noin viikon jälkeen. Yhden pohjallisparin PA 11-muovimateriaalista tulostettu pohjallinen lohkesi koko päkiän alueelta noudattaen mallintamaamme poikittaisviivaa. Päkiän alueen lohkeamisen aiheutti lyhytkestoinen juoksu, jonka tuottama rasitus oli liikaa päkiän alueen liian ohueksi mallintamallemme alueelle. PA 12 materiaalista valmistettujen tukipohjallisten tulostusmateriaali väsyi myös ja kuoleentui hiljalleen käyttöjakson aikana, joka johti PA 12 valmistettujen tukipohjallisten halkeamiseen. Pitkittäiskaaren ja kanta-

pään alue kesti hyvin testijakson rasituksen ja kulumisen molemmilla materiaaleilla. PA 11 materiaali osoittautui testijaksomme ja kirjallisuuden perusteella kestävämmäksi materiaaliksi 3D tulostetuille pohjallisille.

Opinnäytetyön tulostetut pohjalliset tulostettiin HP Multi Jet Fusion teollisuustulostimella, jonka hankintahinta on satojatuhansia euroja. Monet tulostuspalvelut tarjoavat tätä tulostinta palveluissaan ja yhden pohjallisen kappalehinta opinnäytetyötä tehdessämme vaihteli eri palveluntarjoajilla 60 eurosta 140 euroon. Eri valmistajat kehittävät koko ajan uusia tulostusmateriaaleja ja tulostimia.

Vaadittavan tulostimen hankinta ei kustannussyistä ole monille yrityksille mahdollista, joten tuotantoprosessi pitäisi ulkoistaa tulostuksia tekeväälle yritykselle. Tästä saattaisi koitua mahdollisia logistisia tai tuotannollisia haasteita, kun valmistettavan tuotteen tuotantoprosessi on eri paikoissa. Materiaalin ja käytön osalta näyttöä 3D-tukipohjallisten toimivuudesta käytössä on kovin vähäisesti, sillä menetelmä on uusi ja pitkäaikaistutkimuksia ei ole tehty.

Erilaisten mallinnuksien ja materiaaliyhdistelmien kokeileminen pidemmällä seuranta-jaksolla voisi olla oivallinen jatkokehitysidea tälle opinnäytetyölle. Mahdollinen jatkotutkimus olisi hyvä suorittaa niin, että tutkimukseen osallistujat olisivat tukipohjallisia tarvitsevia henkilöitä. Näin käyttökokemusta saataisiin monipuolisesti erilaisista näkökulmista ja käyttäjistä.

Mikäli 3D-tulostus kehittyy siihen pisteeseen, että kappale pystytään tulostamaan monella eri materiaalilla samalla tulostuskerralla, uskomme tämän olevan lopullinen läpimurto tukipohjallisbisneksessä. Näin saataisiin kaikki tarvittavat kevennykset, pehmusteet ja kiilaukset yhdellä kerralla valmiiksi.

Käyttöjakson lyhyt kesto ja rajallinen osallistujamäärä vähensi saatujen tulosten luotettavuutta sekä toistettavuutta. Tästä syystä laajemmille lisätutkimuksille on tarvetta tukipohjallisten eri tulostusmateriaalien valintaa pohtiessa. Saimme kuitenkin samankaltaisia tuloksia polyamidiseoksien materiaalin käyttäytymisestä, kuin viittaamassamme tutkimuksessa. Samansuuntaisten tulosten saaminen taas lisää luotettavuutta opinnäytetyöhön.

Lähteet

Ahonen, Jarmo & Kantola, Matti & Liukkonen, Irmeli 2004. Jalat ja terveys. Teoksessa Liukkonen, Irmeli & Saarikoski, Riitta (toim.) 1. painos. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. 400—406.

Ahonen, Jarmo 2004. Jalat ja terveys. Kävely. Teoksessa Liukkonen, Irmeli & Saarikoski, Riitta (toim.) 1. painos. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. 137—152.

Axén, Niklas & Hogmark, Sture & Jacobson, Staffan 2001. Friction and Wear Measurement Techniques. Modern Tribology Handbook: Materials, Coatings and Industrial Applications. 2. painos. Crc Press. 493—510. Saatavana myös verkossa osoitteessa: <https://www.researchgate.net/publication/256692245_Friction_and_Wear_Measurement_Techniques>. Luettu 13.11.2019.

Baker & Hughes 2019. X-ray inspection devices. Verkkodokumentti. Saatavana osoitteessa: <<https://www.industrial.ai/phoenix-nanomex>>. Luettu 8.5.2019.

Bruder, Ulf 2016. Osa-4 tekniset muovit. Muoviyhdistys. Verkkodokumentti. Saatavana osoitteessa <<http://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/15/osa-4-tekniset-muovit/>>. Luettu 28.9.2019

Carneiro O.S. & Lopes L.R. & Silva A.F 2018. Multi-material 3D printing: The relevance of materials affinity on the T boundary interface performance. Verkkodokumentti. Additive Manufacturing. Saatavana osoitteessa: <https://www.researchgate.net/publication/326339719_Multi-Material_3D_Printing_the_Relevance_of_Materials_Affinity_on_the_Boundary_Interface_Performance>. Luettu 18.3.2019.

Davia-Aracila, Miguel & Hinojo-Pérez, Juan-José & Jimeno-Morenilla, Antonio & Mora-Mora, Higinio 2017. 3D printing of functional anatomical insoles. Computers in Industry. Volume 95, February 2018, pages 38-53. Saatavilla myös sähköisesti osoitteessa: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361517300908>>. Luettu 16.9.2019.

Dombroski, Colin E & Froats, Adam Balsdon & Megan ER 2014. The use of a low cost 3D scanning and printing tool in the manufacture of custom-made foot orthoses: a preliminary study. Verkkojulkaisu. Dombroski et al.; licensee BioMed Central Ltd. Saatavana osoitteessa: <<https://bmccresnotes.biomedcentral.com/articles/10.1186/1756-0500-7-443#Bib1>>. Luettu 11.2.2019.

ESSKA.de GmbH 2019. Mittaustekniikka. Verkkodokumentti. Saatavana osoitteessa <<https://www.esska-fi.com/shop/Mittaustekniikka--710>>. Luettu 8.5.2019

HP Development Company L, P. 2019. HP. Verkkodokumentti. Saatavana osoitteessa: <<https://www8.hp.com/us/en/hp-information/index.html>>. Luettu 11.3.2019.

- HP Development Company L, P. 2019. HP. Verkkodokumentti. Saatavana osoitteessa <<https://www8.hp.com/fi/fi/printers/3d-printers/materials.html>>. Luettu 15.5.2019
- HP Multi Jet Fusion technology 2019. Technical white paper. Saatavilla osoitteesta: <<https://enable.hp.com/us-en-3dprint-wp-technical>>. Luettu 16.10.2019.
- Jyväskylän yliopisto 2015. Määrällinen tutkimus. Saatavana osoitteessa: <<https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategia/t/maarallinen-tutkimus>>. Luettu 2.11.2019.
- Kantola, Matti & Liukkonen, Irmeli 2004. Jalat ja terveys. Teoksessa Liukkonen, Irmeli & Saarikoski, Riitta [toim.] 1. painos. Helsinki : Kustannus Oy Duodecim. 407—414.
- Lehtinen, Kati. 2015. Fabrication additive ou Impression 3D. Aperçus sur une variation terminographique. Materiaalia lisäävä valmistus vai 3D tulostus. Muuttuva termistö. Turun yliopisto. Saatavana osoitteessa <<http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201501211224>>. Luettu 12.3.2019
- Liukkonen, Irmeli 2004. Jalat ja terveys. Jalkapohjien kuormittuminen. Teoksessa Liukkonen, Irmeli & Saarikoski, Riitta (toim.) 1. painos. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. 237—244.
- Liukkonen, Irmeli & Saarikoski, Riitta 2004. Jalat ja terveys. Jalkaterien perustutkimukset. Teoksessa Liukkonen, Irmeli & Saarikoski, Riitta [toim.] 1. painos. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. 186—194.
- Lopes L.R., Silva A.F., Carneiro O.S. 2018. Multi-material 3D printing: The relevance of materials affinity on the T boundary interface performance. Saatavana osoitteessa: <<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.metropolia.fi/science/article/pii/S2214860418301544>>. Luettu 12.3.2019
- Loughborough University 2019. About Additive Manufacturing. Verkkodokumentti. Saatavana osoitteessa: <<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing>>. Luettu 15.10.2019.
- Medilogic GmbH 2018. Manual, medilogic pressure measurement. Ohjekirja 3.2018. Saatavana osoitteessa <https://medilogic.com/wp-content/uploads/2018/05/medilogic_Manual.pdf>. Luettu 23.9.2019. 11.
- Pertti Mustajoki 2011. Laihduttaminen ja painonhallinta - liikunta. Duodecim terveyskirjasto. Saatavana osoitteessa: <https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=pah00006#s7>. Luettu 11.3.2019. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim.
- Saaranen-Kauppinen, Anita & Puusniekka, Anna. 2006. KvaliMOTV. Mitä laadullinen tutkimus on: lyhyt oppimäärä. Kvalitatiivinen I. laadullinen tutkimus. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Saatavana osoitteessa: <https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/L1_2.html>. Luettu 25.9.2019.

Saaranen-Kauppinen, Anita & Puusniekka, Anna. 2006. KvaliMOTV. Triangulaatio. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Saatavana osoitteessa: <https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/L2_3_2_4.html>. Luettu 25.9.2019.

Salazar, A. & Rico, A. & Rodríguez, J. & Segurado, J. & Seltzer, R. & Martin de la Escalera Cutillas, F. 2014. European Polymer Journal. Monotonic loading and fatigue response of a bio-based polyamide PA11 and a petrol-based polyamide PA12 manufactured by selective laser sintering. Elsevier. 36-45. Saatavana myös osoitteessa: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305714002407#!>>. Luettu 30.9.2019.

Seppälä, Jukka. 2005. Polymeeriteknologian perusteet. Termoplastiset polymeerit - Polyamidit. 5. painos. Helsinki: Otatieto. 211—215.

Shaw, Kathryn & Charlton, Jesse M. & Perry, Christina K. L. & De Vries, Courtney M. & Redekopp, Matthew J. & White, Jordan A. & Hunt, Michael A. 2018. The effects of shoe-worn insoles on gait biomechanics in people with knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. Tieteellinen julkaisu. Br J Sports Med 2018; 52:238-253. Saatavana osoitteessa: <<https://bjsm.bmj.com/content/52/4/238>>. Luettu 4.9.2019

Sung Yong Hong, Ye Chan Kim, Mei Wang, Hyung-Ick Kim, Do-Young Byun, Jae-Do Nam, Tsu-Wei Chou, Pulickel M. Ajayan, Lijie Ci, Jonghwan Suhr. 2018. Experimental investigation of mechanical properties of UV-Curable 3D printing materials. Saatavana osoitteessa <https://ac-els-cdn-com.ezproxy.metropolia.fi/S0032386118303732/1-s2.0-S0032386118303732-main.pdf?_tid=eb38fe37-07c7-4f68-9c94-d83a9b5ddbed&acdnat=1552491085_dc1c154f8c30a4720d9072229adb81ff>. Luettu 12.3.2019

Takatalo, Jani 2019. Fysioterapia ja kuntoutus. Nilkan ja jalkaterän sairaudet - Anamneesi ja kliininen tutkimus. Teoksessa Arokoski, Jari & Karppinen, Jaro & Laimi, Katri (toim.) Videoluento. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. Saatavilla osoitteessa: <<https://www.oppiporssi.fi/op/okk00008/avaa>>. Luettu 3.9.2019.

Telfer S. & Woodburn J. & Collier A. & Cavanagh P.R. 2017. Virtually optimized insoles for offloading the diabetic foot: A randomized crossover study. Tieteellinen julkaisu. Journal of Biomechanics - volume 60, July 2017. 157-161. Saatavana osoitteessa: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021929017303287?via%3Dihub>>. Luettu 11.3.2019.

Tukes 2018. Kysymyksiä ja vastauksia 3D-tulostuksesta. Verkkodokumentti. Saatavana osoitteessa: <<https://tukes.fi/documents/5470659/8579343/Kysymyksi%C3%A4+ja+vastauksia+3D-tulostamisesta/abf321b9-bbd0-41ab-adba-4a640cbac159/Kysymyksi%C3%A4+ja+vastauksia+3D-tulostamisesta.pdf>>. Luettu 16.9.2019.

Virrantaus, Otso & Saarikoski, Riitta 2004. Jalat ja terveys - Biomekaaninen tutkimus. Teoksessa Liukkonen, Irmeli & Saarikoski, Riitta [toim.] 1. painos. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. 223—244.

Zum Gahr, Karl-Heinz 1987. Microstructure and wear of materials. Chapter 6, sliding wear. Teoksessa Zum Gahr, Karl-Heinz [toim.] 1. painos. North Holland: Elsevier. 351—495. Saatavana myös verkossa osoitteessa:
<www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167892208707247>. Luettu 3.11.2019

9 Liitteet

Liite 1.

Tutkimussuostumuksen myöntäminen

Annan suostumukseni Metropolia ammattikorkeakoulun opiskelijoille käyttää tietojani opinnäytetyöhön. Kerättyjä tietoja tullaan käyttämään opinnäytetyössä kunnioittavasti sekä paljastamatta osallistujan identiteettiä. Opinnäytetyö tullaan julkaisemaan loppuvuodesta 2019 Theseus tietokannassa.

Paikka & päivämäärä: _____

Allekirjoitus: _____

Opinnäytetyön tekijät: _____

Liite 2.

Tervehdys!

Olemme kolmen apuvälineteknikko-opiskelijan ryhmä Metropolia ammattikorkeakoulusta ja olemme tekemässä opinnäytetyötä pohjallisten materiaalien kestävydestä. Tulomme arvioimaan tukipohjallisia ennen ja jälkeen kuukauden pituisen käyttöjakson loputtua. Arvostaisimme suuresti, jos haluaisitte osallistua opinnäytetyöhömmme pohjallisten testaajana. Opinnäytetyö tullaan julkaisemaan loppuvuodesta 2019 Theseus tietokannassa.

Ystävällisin terveisin Tuomas Mannio, Jaan Seitsara & Tarmo Tossavainen!

Annan suostumukseni ja haluan osallistua opinnäytetyössä tarvittavaan pohjallisten testaamiseen käyttämällä ja kävelemällä niillä ennalta määritellyn käyttöjakson ajan:

Päivämäärä & paikka: _____

Allekirjoitus: _____

Opinnäytetyön tekijät: _____