



3D-skannauksen muuntaminen CAD-malliksi

Olli Niemetmaa

Opinnäytetyö, AMK
marraskuu 2022
Tekniikan ala
Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Olli Niemetmaa

3D-skannauksen muuntaminen CAD-malliksi

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Marraskuu 2022, 73 sivua.

Tekniikan ala, konetekniikan tutkinto-ohjelma, opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

2020-luvulla koskettamattomiin menetelmiin perustuvat 3D-skannaukset ovat arkipäivää teollisen tason laadunvalvonnassa, huollossa ja takaisinmallinnuksessa. Oikein hyödynnettynä 3D-skannaus digitointiteknikkana on ylivoimainen käytettävyydeltään, nopeudeltaan ja havainnollistavuudeltaan. Uutena rintamana 3D-skannauksessa ovat kuluttajille tarjotut puhelinsovellukset, jotka lisäävät tekniikan saavutettavuutta. Joissain uusissa älypuhelimissa on jopa sisäänrakennettu laserkenno, joka lisää älypuhelimien skannausmenetelmien kirjoa ja suorituskykyä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, mikä on paras työnkulku skannausdatan muuntamiseen piirrepohjaiseksi CAD-malliksi toimeksiantajan, ProSolve Oy:n, käytössä olevilla ohjelmistoilla ja menetelmillä. Aluksi tutkittiin aiheen teoriaa perehtymällä 3D-skannausteknologiaan, takaisinmallinnusmenetelmiin, olemassa oleviin työohjeisiin ja työohjeen laatimisen käytäntöihin. Käytännön toteutuksessa selvitystä varten valittiin vertailtavat työmenetelmät ja suunniteltiin niille käyttäjättestit, jotka sisälsivät useiden skannattujen kappaleiden muuntamista CAD-malleiksi. Käyttäjätestien jälkeen vertailtavat menetelmät pisteytettiin painottaen tämän tyyppisten projektien kannalta merkittäviä näkökohtia, kuten geometrista tarkkuutta, työaikaa ja valmiin CAD-mallin toiminallisuutta sekä laatua.

Työn tuloksena saatiin selville paras työnkulku tämän kaltaiseen tehtävään toimeksiantajan tapauksessa. Selvitystyöstä saadun aineiston perusteella työnkululle tehtiin työohje toimeksiantajan käyttöön. Lisäksi saatiin selville mahdollisia parannuskohteita 3D-skannauspalvelun mahdollista kehittämistä varten.

Työn toteutuksen aikana 3D-skannaus tekniikkana osoitti vahvuutensa nopean digitoinnin työkaluna. Saman aikaisesti sen suorituskyky ja saavutettavuus paranee jatkuvasti. Tekniikalla on kumminkin rajoitteensa, ja vielä vuonna 2022 se vaatii joissain tapauksissa tuekseen perinteisiä mittausvälineitä.

Avainsanat (asiasanat)

3D-skannaus, takaisinmallinnus, tuotekehitys, mittaustekniikka

Muut tiedot

Litteenä työohje, 24 sivua.

Niemetmaa Olli

Title and possible subtitle

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, November 2022, 73 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Mechanical Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

In 2022, non-touching 3D-scanning methods have become a familiar part of industrial grade quality control, maintenance, and reverse engineering. When used right, 3D-scanning as a digitization technique is superior to traditional measurement methods for its usability, speed, and visualization characteristics. A new front in 3D-scanning world is the smartphone-based 3D-scanning with consumer targeted applications. Some new smartphones even include a laser emitter in their hardware, which boosts scanning performance and adds a new way to digitize surrounding environment.

The purpose of the thesis was to find out, what is the best workflow to convert 3D-scanning data into a feature-based CAD-model with programs and tools available for the client.

Firstly the theory of the subject was studied by delving into 3D-scanning technology, reverse engineering, available work instructions and the making of such instructions.

Practical implementation was completed by choosing two competing work methods and designing a user test around scanning different objects and converting them into CAD-models. After that these work methods were graded based on their performance, including aspects such as geometrical accuracy, work time and quality of feature-based model.

As a result, the best workflow for the client's instance was found. Work instructions for the workflow were made by using research materials. Also, some points of improvement were found if it's chosen to develop client's 3D-scanning services further.

During the making of the thesis 3D-scanning has proved its strength as a powerful digitizing tool. Meanwhile the 3D-scanning field is improving. Technology still has its limits, and in 2022 it sometimes requires the help of some traditional measuring methods.

Keywords/tags

3D-scanning, reverse engineering, product development, measuring technology

Miscellaneous

Attachment which includes work instructions, 24 pages.

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Opinnäytetyön tausta, tavoitteet ja rajaukset	4
1.2	ProSolve Oy	5
2	Käsitteistö	5
3	Teoria	7
3.1	Takaisinmallinnus	7
3.2	3D-skannaaminen	7
3.2.1	3D-skannaamisen historiaa	7
3.2.2	Käyttökohteet	8
3.2.3	3D-skannauksen toimintaperiaatteita	8
3.2.4	Skannauksen tarkkuus ja resoluutio	10
3.3	Käsiteltävät 3D-grafiikan tyypit	11
3.4	Fyysisestä kappaleesta CAD-malliksi	14
3.5	Työohjeen laatimisen seikat	15
3.6	Laatu	15
4	Kehittämistyön tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset	16
5	Toteutus	17
5.1	Tiedonhaku	17
5.2	Käytetyt ohjelmistot ja laitteisto	17
5.2.1	Creaform Go!SCAN 3D G2	17
5.2.2	VXelements ja VXmodel	18
5.2.3	Geomagic Studio 2014	19
5.2.4	SolidWorks	19
5.2.5	3D Live scanner	19
5.3	Vertailtavat takaisinmallinnusmenetelmät	19
5.4	Tulosten arviointi ja mittakappaleet	20
5.5	Suunniteltu työnkulku	21
5.5.1	Kappaleen ja skannerin valmistelu	21
5.5.2	Skannaaminen	22
5.5.3	Pintamallin jälkikäsittely	22
5.5.4	Takaisinmallinnus	23
5.6	Työohje	24
5.7	Toimet	24

6 Tulokset	40
6.1 Päätulokset.....	40
6.2 Muut havainnot.....	43
6.3 Työohje.....	43
7 Pohdinta	43
7.1 Tavoitteet, tulokset ja haasteet niiden välissä.....	43
7.2 Luotettavuus ja eettisyys	45
7.2.1 Tulosten luotettavuus.....	45
7.2.2 Hyvä tieteellinen käytäntö.....	45
7.2.3 Tietoperustan lähteet	46
7.3 Tulosten tarkastelu suhteessa teoreettiseen viitekehykseen	46
7.4 Johtopäätökset ja kehittämissuhteet.....	46
Lähteet	47
Liitteet	49
Liite 1. Työohje	49
Kuviot	
Kuvio 1. Valorasteri	10
Kuvio 2. Tarkkuus ja resoluutio havainnollistettuna (How to Choose the Best 3D Scanner to Use with Your 3D Printer 2019.)	11
Kuvio 3. Polygonimallin rakenne. (Mesh overview 2009.)	12
Kuvio 4. NURBS-pinnoista tehty malli ja polygoniverkosta muodostettu malli.	13
Kuvio 5. Takaisinmallinnuksen työnkulku	14
Kuvio 6. Tähyksillä päällystetty mitattava kappale.....	18
Kuvio 7. Alkuperäinen, tyhjä pistematriisi. Tästä puuttuu traktorin nostokoukku.	21
Kuvio 8. Skannerin kalibrointinäyttö.....	25
Kuvio 9. Skannerin kalibrointilevy	26
Kuvio 10. Skannattavan kappaleen valmistelu	26
Kuvio 11. Traktorin koukun puuttuva sisusta	27
Kuvio 12. Traktorin koukun piirteiden tunnistusta (VXelements)	28
Kuvio 13. SolidWorksiin tuodut koukun piirteet.....	28
Kuvio 14. Valmiiksi mallinnettu traktorin nostokoukku	29
Kuvio 15. Nostokoukun uudelleen mallinnettu sisäpuoli	29
Kuvio 16. 3D-tulostetun kappaleen piirteet tuotuna SolidWorks-ohjelmaan	30
Kuvio 17. Sama kappale, viimeistä silausta vaille valmiina.....	30

Kuvio 18. Sorvatus kappaleen skannausdata	31
Kuvio 19. Sorvattu kappale mallinnettuna VXmodel+SW menetelmällä	31
Kuvio 20. Pursotetun kappaleen skannausdata.....	32
Kuvio 21 VXmodel:sta tuodut piirteet SolidWorks:iin	32
Kuvio 22 Pursotettu kappale mallinnettuna VXmodel+SW menetelmällä.....	33
Kuvio 23. VXmodelista tuodut tuolin piirteet SolidWorksissa	33
Kuvio 24. Takaisinmallinnettu tuolin istuinosa SW:ssä.....	34
Kuvio 25. Puuttuva pinta traktorin nostokoukussa, kun Geomagicissa luotua STEP-mallia tarkastellaan SW:ssä	35
Kuvio 26. 3D-tulostettu kappale mallinnettuna Geomagic:issa. Huom. epäyhdensuuntaiset kappaleen reunat.	36
Kuvio 27 pursotettu kappale mallinnettuna Geomagic Studioissa	37
Kuvio 28 risteävät pinnat pursotetun kappaleen alapinnassa.....	37
Kuvio 29. Geomagicissa mallinnettu tuolin istuinosa	38
Kuvio 30. Mallin muotovertailua (Geomagic Studio 2014).....	38
Kuvio 31. Mallin muotovertailua (VXmodel).....	39
Kuvio 32. Puhelimella skannattu kappale (GMS 2014).....	39
Kuvio 33. Puhelimella skannattu kappale (VXmodel)	40
Kuvio 34. Käyttäjätestauksen lopulliset tulokset.....	41
Kuvio 35. Työvaiheiden määrä menetelmän mukaan	42
Kuvio 36. Vertailtujen ohjelmien tiedostojen tuontiformaatit.....	42

Taulukot

Taulukko 1. Tehtävien suorittamiseen käytetty aika.....	42
---	----

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta, tavoitteet ja rajaukset

2020-luvulla 3D-skannaukset ovat arkipäivää teollisen tason laadunvalvonnassa, huollossa ja takaisinmallinnuksessa. Oikein hyödynnettynä 3D-skannaus digitointitekniikkana on ylivoimainen käytettävyydeltään, nopeudeltaan ja havainnollistavuudeltaan. Uutena rintamana 3D-skannauksessa ovat kuluttajille tarjotut puhelinsovellukset, jotka lisäävät tekniikan saavutettavuutta. Joissain uusissa älypuhelimissa on jopa sisäänrakennettu laserkenno, joka lisää älypuhelimien skannausmenetelmien kirjoa ja suorituskykyä.

Idea opinnäytetyöhön tuli 3D-skannaamisen parissa työskentelystä toimeksiantajayrityksessä, ProSolve Oy:ssä. Aihetta pidettiin tarpeellisena. Opinnäytetyön alkaessa minulla oli noin puolen vuoden työkokemus toimeksiantajalla 3D-skannaamisesta ja laserkeilauksesta, sekä näillä tekniikoilla tuotetun datan jälkikäsitteystä.

Usein 3D-skannauspalvelun asiakkaalla on ollut toiveena skannausdatan muuntaminen solidimalliksi siten, että sitä voisi muokata ja hyödyntää CAD-ohjelmistoissa. Skannerin tuottaman pintamallin tarkka muuntaminen piirrepohjaiseksi malliksi on haastavaa, joten haluttiin selvittää tehokkain työnkulku siihen. Aihe rajattiin seuraavasti:

- muuntaminen pyritään tekemään piirrepohjaiseksi solidimalliksi
- muuntaminen suoritetaan yrityksessä jo olemassa olevilla ohjelmistoilla ja kalustolla.
- tutkitaan, ovatko muuntamisen tulokset tarpeeksi laadukkaita
- työnkulusta laaditaan työohje.

Kiteytettynä opinnäytetyön aiheena on 3D-skannauksen muuntaminen CAD-malliksi. Opinnäytetyön aikatauluna oli koko vuosi 2022. Työn aihe on merkittävä, koska se parantaa ProSolve Oy:n asiakkaiden tarjontaa takaisinmallinnukseen liittyvissä palveluissa. Toteutustavaksi valittiin tutkimuksellinen kehittämistyö. Opinnäytetyö toteutettiin perehtymällä olemassa oleviin resursseihin ja työohjeisiin, jotta ymmärretään, miten työ suoritetaan oikein. Sen jälkeen vertailtiin yrityksestä löytyviä vaihtoehtoisia työnkulkuja, jotta löydettiin paras tapa toteuttaa muunnostyö toimeksiantajan tapauksessa.

1.2 ProSolve Oy

Prosolve Oy on jyväskyläläinen insinööritoimisto. Yritys tarjoaa palveluita koneensuunnittelussa, 3D-skannauspalveluissa, rakennesuunnittelussa ja projektitoimituksessa. Suunnittelutoimisto perustettiin ProLine -nimisenä vuonna 2004. Yritysmuoto vaihtui osakeyhtiöksi vuonna 2005. Toimintaa laajennettiin kiinteistö- ja skannauspalveluihin vuonna 2007. Yritys koki vuonna 2011 organisaatiomuutoksen, jonka yhteydessä yrityksen nimeksi tuli ProSolve Oy. (Historia n.d.)

ProSolven Oy:n 3D-skannauspalvelut koostuvat laserkeilauksesta, kappaleiden skannauksesta ja muotovertailusta. Laserkeilausta hyödynnetään ympäristön digitoinnissa, esimerkiksi inventointimallin tekoa varten. Kappaleiden skannauksessa voidaan hyödyntää sekä laserkeilausta että kädessä pidettävää 3D-skanneria. 3D-skannausten avulla voidaan suorittaa muotovertailuja muihin skannauksiin tai alkuperäiseen suunniteltuun 3D-malliin, jotta päästään vertailemaan kappaleiden kulumaa tai tarkastamaan valmistettujen kappaleiden mittoja suunniteltuun malliin.

2 Käsitteistö

3D-skannaus:	fyysisen todellisuuden digitointi 3D-malliksi
approksimaatio:	epätäsmällinen esitys jostain asiasta niin, että se on lähellä oikeaa
CAD:	lyhenne sanoista <i>Computer Aided Design</i> , tarkoittaa tietokoneavusteista suunnittelua
digitointi:	informaation muuttaminen tietoteknisesti käsiteltävään muotoon
fotogrammetria:	3D-skannauksen muoto, jossa 3D-malli luodaan yhdistämällä valokuvia
IGS, IGES:	universaali 3D-mallin tiedostomuoto, pintamalli
joukko-oppi:	matemaattisten alkioden muodostamien joukkojen ominaisuuksiin perehtyvä osa-alue

kalibrointi:	mittalaitteen vertaaminen mittanormaaliin ja sen viritys vastaamaan sitä
kartesinen:	joukko, kokoelma
käyrä:	3D-grafiikan yhteydessä tarkoittaa matemaattisesti määritettyä käyrää viivaa
natiivi:	tämän opinnäytetyön yhteydessä CAD-ohjelman omat tiedostomuodot
PDM:	lyhenne sanoista <i>Product Data Managment</i> , tarkoittaa tuotetiedon hallintajärjestelmää
piirrepohjainen malli:	käännös englannin kielen ilmaisusta <i>feature based model</i> , käytetään työssä ilmaisemaan mallia, joka koostuu piirteistä ja niiden rakennepuusta. Jotkut lähteistä käyttävät tästä ilmaisua parametrinen malli.
pintamalli:	3D-malli, jolla esitetään vain mallinnettavan kappaleen pinta
rasterikuvio:	säännönmukainen kuvio, esimerkiksi ristikko tai ruudukko
rasterimalli:	3D-malli, joka muodostuu kauttaaltaan pisteistä
skannausdata:	raaka 3D-skannerin tuottamien mittapisteiden muodostama rasterimalli
solidi:	3D-malli, joka on pinnaltaan umpinainen tilavuudellinen
STEP, STP:	universaali 3D-mallin tiedostoluoto, solidimalli
STL:	3D-mallin tiedostomuoto, polygoniverkkona esitetty pintamalli

strukturoitu valo: ennalta tunnetun kuvion, esimerkiksi ruudukon, heijastaminen valon avulla

tähys: referenssipiste, jota laite käyttää asennon paikan muutoksen seuraamiseen

3 Teoria

Tässä osuudessa käsitellään työn kannalta olennaisten takaisinmallinnuksen, 3D-skannaamisen ja 3D-grafiikan menetelmien perusteita ja taustaa.

3.1 Takaisinmallinnus

Takaisinmallinnus tarkoittaa sitä, että olemassa olevaa tuotetta purkamalla ja tarkastelemalla selvitetään sen toiminnallisuutta. Toinen vakiintunut termi tällaiselle toiminnalle on käänteinen suunnittelu (Englanniksi reverse engineering). (Reverse engineer, n.d.) Konetekniikan näkökulmasta takaisinmallinnusta hyödynnetään, jos halutaan suunnitella alkuperäisen tarvikkeen valmistajan, eli OEM-valmistajan, tuotteen kanssa yhteensopivia tuotteita, tai sen osia. Sitä voidaan hyödyntää myös, kun halutaan luoda valmistukseen vaadittava aineisto osalle tai tuotteelle, jolle sitä ei syystä tai toisesta löydy ennestään tai se on kadotettu. (Wang, 2010, 1–10.) 3D-skannaus on tehokas tapa toteuttaa takaisinmallinnuksen vaatimia mittauksia, koska se tallentaa mittatietoa nopeasti ja tarkasti helposti käsiteltävään muotoon. Perinteisillä menetelmillä samanlaisten mittausten tekeminen vie runsaasti aikaa ja sitoo resursseja. (Edl M, Mizerak M & Trojan J 2018, 3).

3.2 3D-skannaaminen

3.2.1 3D-skannaamisen historiaa

3D-skannauksen perusteet ovat kolmiomittauksessa. Ensimmäinen varsinainen 3D-skannausteknologia kehitettiin 1960-luvulla. Sen toiminta perustui fotogrammetriaan ja se oli aikanaan työläs menetelmä. (Edl M, Mizerak M, Trojan J 2018, 2.) Kun uusia, tehokkaampia 3D-skannausteknologioita alettiin kehittämään 1980-luvulla, 3D-mittalaitteet perustuivat vielä koskettavaan mittaukseen (Chougule V, Gosavi H, Dharwadkar M, Gaiind A 2018, 41). 80-luvulla kehitettiin strukturoituun valoon ja laseriin perustuvat ei-koskettavat skannausmenetelmät. Virstanpylväitä kaupallisen

3D-skannauksen kehittämisessä olivat vuonna 1994 julkaistu 3D Scanners REPLICA ja saman yrityksen vuonna 1996 julkaistu ModelMaker. Jälkimmäisellä pystyttiin luomaan värillisiä 3D-malleja jopa minuuteissa. (Edl M, Mizerak M & Trojan J 2018, 2.) Sittemmin skannereiden valmistajia on tullut markkinoille paljon ja laitteiden valikoima on valtava. Myös laitteiden mittatarkkuus, resoluutio sekä mittaussnopeus ovat parantuneet. Kun verrataan erään skannereiden valmistajan laitteita, 15 vuodessa tarkkuus kaksinkertaistunut ja suurin mahdollinen mittaussnopeus on jopa 70-kertainen (First Generation Handyscan 3D / Zscanner 700 n.d.; HandySCAN 3D | BLACK Series: Technical Specifications n.d.).

3.2.2 Käyttökohteet

3D-skannausten dataa voidaan hyödyntää lukemattomilla tavoilla, mutta teollisuudessa sitä käytetään eniten laadunvalvontaan ja takaisinmallinnukseen. Ei-koskettavilla järjestelmillä laadunvalvonta toteutetaan muotovertailulla, missä skannausta verrataan osan alkuperäiseen CAD-malliin tai toiseen skannaukseen. Muotovertailuun tarkoitettut ohjelmistot asemoivat vertailtavat mallit päällekkäin approksimaatiolla tai ennalta määrättyjen koordinaattipisteiden avulla ja tuottavat mittojen poikkeamista raporttina lämpökartan. Takaisinmallinnuksessa hyödynnetään skannausdatasta tunnistettavia peruspiirteitä ja NURBS-grafiikkaa. (Lundell J 2022.) Teollisuuden ohella 3D-skannaamista käytetään apuna muun muassa rakennustekniikassa, lääketieteessä, rikospaikkatutkinnassa ja arkeologiassa. (Edl M, Mizerak M & Trojan J 2018, 2–4.)

3.2.3 3D-skannauksen toimintaperiaatteita

3D-skannaus luokitellaan koskettaviin ja ei-koskettaviin menetelmiin. Ei-koskettavia menetelmiä on laserkolmiomittaus, fotogrammetria, strukturoitu valo ja laserpulssi. Alkuperäiset skannerit perustuivat koskettaviin menetelmiin ja tällaisia laitteita käytetään vielä nykyään laajasti tarkkuuden takia. Näitä laitteita kutsutaan koordinaattimittauskoneiksi. (3D scanning technologies and the 3D scanning process 2021.)

Laserkolmiomittaus perustuu laservaloon, joka heijastetaan mitattavaan kappaleeseen. Skannausjärjestelmän sensori havainnoi laserin heijastuksen. Tästä saadaan selville heijastuksen kulma. Koska laserin kulma sekä sijainti suhteessa sensoriin on tunnettu, voidaan laskea tarkka etäisyys

kappaleeseen. Kun mitattavasta kohteesta on kerätty tarpeeksi mittapisteitä, voidaan niistä luoda rasterimalli. (3D scanning technologies and the 3D scanning process 2021.)

Pulssilaseriin perustuva 3D-skannaus käyttää etäisyyden mittaamiseen aikaa, joka valolla kestää osua kohteeseen ja heijastua takaisin. Koska tällainen laite mittaa ainoastaan yhden mittatiedon, laserin kulkeman matkan, käytetään laserin ohjaamiseen peiliä, jonka asennosta voidaan johtaa yksittäisen mittaustapahtuman suunta. Niin kutsutut laserkeilaimet perustuvat tähän teknologiaan. Ne soveltuvat suurien alueiden mittaamiseen, koska niiden mittausetäisyys ei riipu valonlähteen ja sensoreiden asennosta suhteessa toisiinsa. Monilla muilla mittaumenetelmillä laite voi olla tarkennettuna kerrallaan vain suppealle mittausetäisyysvälille, koska ne perustuvat projekto-reihin ja antureihin, jotka ”näkevät” toisensa. (3D scanning technologies and the 3D scanning process 2021.)

Strukturoituun valoon perustuva 3D-skannaus käyttää mitattavan kappaleen muotojen tunnistamiseen kirkasta näkyvää valoa, joka piirtää rasterikuvion kappaleen pintaan (ks. kuvio. Kun projektorin tuottaman kuvion muodot ja mittasuhteet tunnetaan, mitattavan kappaleen etäisyyden ja pinnan muodon aiheuttamat kuvion muutokset voidaan muuntaa 3D-koordinaattidataksi. Tähän tekniikkaan perustuvissa skannereissa on yleensä kaksi kameraa, jotka näkevät saman projektion eri suunnista. Tähänkin hyödynnetään niin ikään kolmiomittausta. Tekniikan hyötynä on se, että mittapisteitä voidaan tallentaa yhdessä kuvassa enemmän, koko projektion alueelta. Tämä nopeuttaa skannaamista. Strukturoitu valo voidaan tuottaa laserilla tai LED-valoilla. Ennen käytetyt LED-valot olivat yleensä valkoisia, mutta nykyään käytetään myös sinistä valoa, sillä sitä käyttävät järjestelmät ovat vähemmän herkkiä ympäristön valohäiriöille. (Lundell J 2022.)



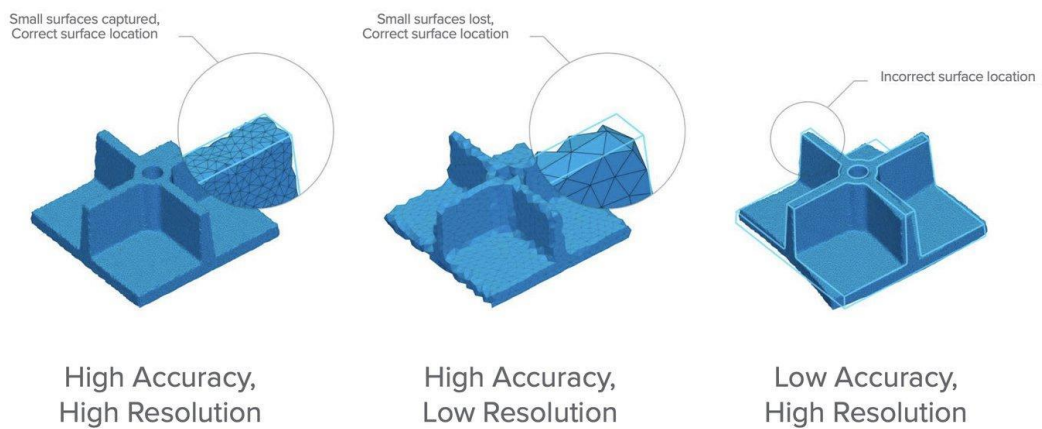
Kuvio 1. Valorasteri

Fotogrammetria perustuu usean valokuvan muodostamaan stereoskooppiseen kuvaan. Valokuvat yhdistetään samaan avaruuteen kuvien sisältämien muotojen, värien ja varjojen perusteella. Menetelmän hyötynä on sen korkea saavutettavuus, koska se ei vaadi mitään erikoislaitteistoa, ainoastaan normaalin digitaalikameran ja tietokoneen tai älypuhelimien kameran. (Bernier S, Reinhard T, Lyut B 2015, 26–29.)

3.2.4 Skannauksen tarkkuus ja resoluutio.

3D-skannauksen data tulee skannauslaitteen ohjelmistoon *pistepilvenä*. Pistepilvi on koordinaattipisteiden joukko (What are Point Clouds? 2018). Näistä pisteiden välille muodostetaan verkko, pintamalli. Skannauksen tarkkuudella tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin näiden koordinaattipisteiden paikkatieto vastaa oikeaa mittaa. Skannauksen resoluutiolla tarkoitetaan sitä, kuinka monta mittapistettä tietyltä matkalta tai alueelta tallennetaan. (Cherdo 2022.) Esimerkiksi Go!SCAN 3D G2 skannerissa valmistajan mukaan mittaresoluutio on maksimissaan 0,5 mm, eli tallennettujen pisteiden välimatka on vähimmillään sen verran. Yksittäisen skannauksen mittatarkkuus parhaimmillaan 0,1 mm ja volymetrinen tarkkuus on 0,3 mm/m. Kokonaistarkkuus lasketaan yksittäisen skannauksen tarkkuuden ja volymetrisen tarkkuuden summana. Esimerkiksi 2 metriä suuren kappaleen mittatarkkuus on silloin parhaimmillaan $0,1 \text{ mm} + (2 \text{ m} * 0,3 \text{ mm/m}) = 0,7 \text{ mm}$. (Go!SCAN 3D G2 SCANNER n.d.) Täytyy myös ottaa huomioon, että mittausolosuhteet vaikuttavat tarkkuuteen. Esimerkiksi lämpötila, kalibroinnin laatu ja strukturoidun valon tapauksessa valaistus. Eri valmistajien

tarkkuuden mittausstandardit voivat vaihdella, eli jos halutaan varmistua mittausdatan laadusta, täytyy mittalaitella olla jokin kolmannen osapuolen todistus mittatarkkuudesta. (Cherdo 2022.)



Kuvio 2. Tarkkuus ja resoluutio havainnollistettuna (How to Choose the Best 3D Scanner to Use with Your 3D Printer 2019.)

3.3 Käsiteltävät 3D-grafiikan tyypit

Tässä luvussa eritellään opinnäytetyön aiheelle olennaisia 3D-grafiikan muotoja. On tärkeää ymmärtää tavat, miten 3D-malli muodostuu skannauksen ja takaisinmallinnuksen prosessin eri vaiheissa.

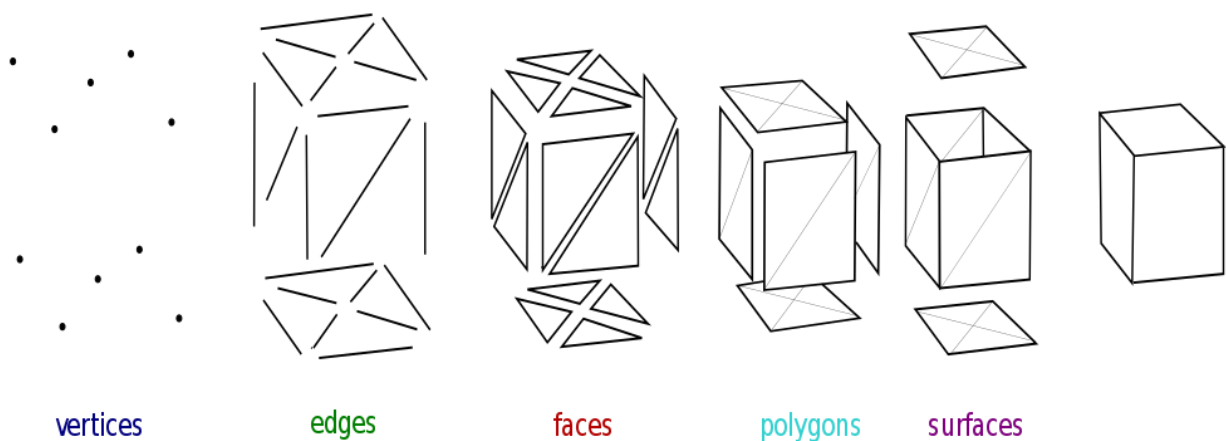
Pistepilvi

Pistepilvi on koordinaattipisteiden joukko, joka muodostaa tietokonemallin. Malli näkyy pisteiden eli *vertiiseiden* (ks. kuvio 3) ”sumuna”. Pisteiden paikkatieto tallennetaan yleensä etäisyytenä X, Y ja Z akseleilla suhteessa määritettyyn nollapisteeseen, karteesisena koordinaatistona. (What are Point Clouds? 2018; Puhakka 2008, 29–31.)

Pintamallit

3D-skannereiden ohjelmistot yleensä tuottavat pistepilvestä pintamallin polygonimallina. Polygonimallit koostuvat *vertekseistä*, *reunoista* ja *pinnoista* (Joensuu, 2016, 4–6). Puhakka (2008, 49) käyttää polygonimallista termiä monikulmioverkko, joka kuvaa sen rakennetta hyvin. Skannauksen tuottamasta pistepilvestä valitaan mallin muodostamiseen tarvittavat pisteet algoritmien avulla ja ne toimivat mallin vertekseinä eli kulmapisteinä. Kaikkia pisteitä ei käytetä, koska osa

niistä poikkeaa pinnasta niin paljon, että se pilaisi mallin. Lisäksi sillä säästetään tietokoneen prosessointitehoa. Esimerkiksi Creaform (N.d.) ilmoittaa joihinkin skannerimalleihinsa skannausresoluution ja monikulmioverkon resoluution erikseen. Kulmapisteiden paikkatieto säilyy samaan tapaan kuin pistepilvitiedostoissa. Tietyn pintamallin kaikista kulmapisteistä koostetaan lista osoittimien alle. Kulmapisteet ovat reunojen solmukohtia, ja reunat ovat kahden kulmapisteen yhdistäviä viivoja. Reunojen tieto tallennetaan liittämällä käytettyjen kulmapisteiden paikkatiedot osoittimen alle yhteen. Näistä reunojen tunnisteista koostetaan lista. Reunojen avulla voidaan muodostaa pintoja, joiden tieto pysyy tallessa niin ikään reunaviivalistalla. Pinnat yhdistetään toisiinsa ja ne muodostavat 3D-pintamallin. (Polygon mesh n.d.; Puhakka 2008, 49–52.)



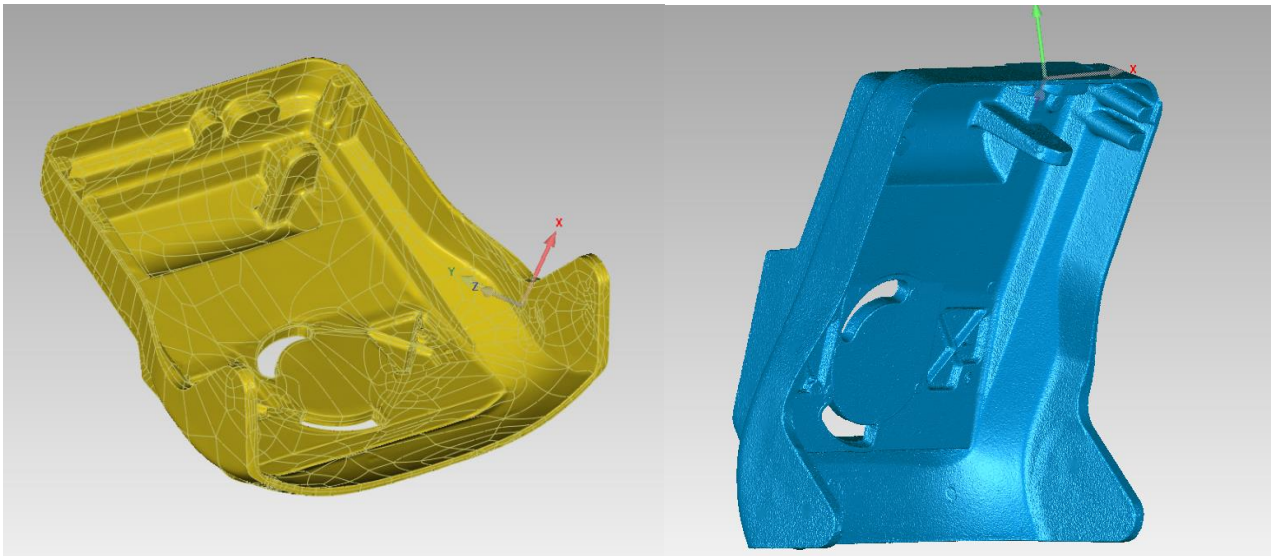
Kuvio 3. Polygonimallin rakenne. (Mesh overview 2009.)

NURBS-käyrät ja pinnat

Polygonimallien lisäksi käsitellään NURBS-pintoja. NURBS on lyhenne sanoista Non-Uniform Rational Basis Spline. Spline-käyrät ovat käyriä, jotka koostuvat polynomifunktioilla määritetyistä osakäyristä. Ei-uniformisuus tarkoittaa sitä, että NURBS-käyrän osakäyrät voivat olla eri mittaisia keskenään. NURBS-käyrän parametrin ovat käyrän aste tai luokka (Degree), hallintapisteet (control point) ja solmut (knot). Luokka esitetään kokonaislukuna ja se määrittelee käyrän tyyppin sen mukaan, miten osakäyrien jatkuvuus on määritelty. Esimerkiksi ovatko käyrät tangentiaalisia toisiinsa nähden vai eivät. Hallintapisteiden määrä käyrällä on aina vähintään luokan numero + 1. Liikuttelemalla hallintapisteitä voidaan muuttaa käyrän muotoa. Hallintapisteillä on painokerroin (weight). Kun kaikilla käyrän hallintapisteillä on sama painoarvo, kyseessä on ei-rationaalinen käyrä. Jos

käyrän hallintapisteiden painoarvot vaihtelevat, kyseessä on rationaalinen käyrä. NURBS-käyrät voivat olla molempien tyyppisiä. Painoarvo vaikuttaa siihen, miten paljon kyseinen hallintapiste vaikuttaa käyrän muotoon verrattuna muihin hallintapisteisiin. Solmuja NURBS-käyrässä on (luokan numero) + (N määrä hallintapisteitä) -1 kappaletta. Solmut ovat sarja numeroita, jotka määrittävät käyrän käyttäytymisen, kun hallintapisteitä liikutellaan.

NURBS-pinta saadaan ottamalla kaksi eri parametriä, jotka muodostavat keskenään ristikon. Kun yksittäisellä NURBS-käyrällä on kontrollipisteitä, jotka määrittelevät sen muodon, on NURBS-pinnalla hallintapisteiden ruudukko, jolla pinnan muotoa manipuloidaan. NURBS-pinta on ikään kuin loputon määrä NURBS-käyriä ristikkäin aseteltuna muodostaen sulavan pinnan. NURBS-pinnoilla voidaan esittää lähes mikä tahansa muoto (ks. kuvio 4). (What are NURBS, n.d.; Puhakka 2008, 61–74.)



Kuvio 4. NURBS-pinnoista tehty malli ja polygoniverkosta muodostettu malli.

Pyyhkäisykappaleet ja CSG-tekniikka

Pyyhkäisykappaleet muodostuvat liikuttamalla niin sanottua piirtokappaletta 3d-avaruudessa tiettyä rataa pitkin. Piirtokappale voi olla yksi- kaksi- tai kolmiulotteinen. Piirtokappaleen koskettamat avaruuden pisteet tällä matkalla muodostavat kappaleen. Yksittäiset pisteet muodostavat avaruuden käyriä. Käyrät muodostavat pintoja ja pinnat 3D-kappaleita. Piirtokappaletta voidaan myös kääntää tai sen kokoa muuttaa matkan aikana. Kappaletta voidaan myös kiertää paikallaan

määritetyn akselin ympäri.

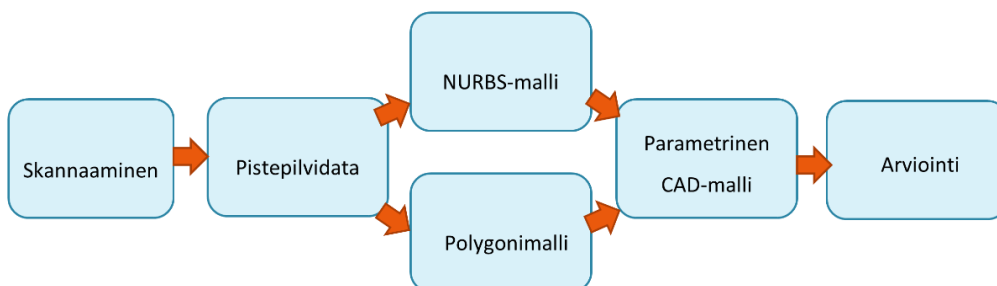
Solidimallit ovat 3D-malleja, jotka on luotu CSG-tekniikalla. Lyhenne CSG tulee sanoista *Constructive Solid Geometry*. Mallinnusohjelmistossa avaruus tai työtila muodostuu avaruuden pisteistä. Se, että kuuluuko tietyt avaruuden pisteet kappaleeseen, perustuu joukko-oppiin. Nämä pisteet joko kuuluvat tai eivät kuulu mallinnettavaan kappaleeseen. Kappaleella on geometrinen rajapinta, jolle on määritetty ulko- ja sisäpuoli. Rajapinnan sisäpuolella kaikki pisteet kuuluvat malliin ja näin muodostavat kappaleelle tilavuuden. Tämä erottaa solidimallit pintamalleista. Solidimallit ovat ”tiivitä”, eli niiden pinnoissa ei ole aukkoja ja niissä ei voi olla yhdistämättömiä pintoja. Koska menetelmällä luodulla mallilla on tilavuus, sille voidaan määrittää ominaisuuksia, kuten tiheys tai painopiste. Solidimallit ovat hyvin muokattavia joukko-oppiperustan takia. Kappaleita voidaan muokata joukko-operaatioilla, eli yhdistelemällä ja erottamalla avaruuteen määritettyjä pisteiden joukkoja. Joukko-operaatioista muodostuu kappaleen rakennepuu. Solidimalleja voidaan tehdä muodostamalla 2D-vektorigrafiikasta pyyhkäisy- ja pyörähdyskappaleita, geometrisista alkiosta muokkaamalla joukko-opin avulla, tai käyttäen tiiviin pintamallin, esimerkiksi NURBS-pinnan, muotoa kappaleen rajapintana.

(Solid Modeling: concepts, n.d.; Puhakka, 2008, 59–60.)

3.4 Fyysisestä kappaleesta CAD-malliksi

Kappaleen takaisinmallinnus 3D-skannausdatasta piirrepohjaiseksi solidimalliksi etenee yleensä seuraavalla tavalla:

Takaisinmallinnuksen työnkulku



Kuvio 5. Takaisinmallinnuksen työnkulku

Kappale skannataan. Skannausdata tallentuu sähköiseen muotoon pistepilvenä. Riippuen menetelmästä, pistepilvi muunnetaan joko polygoniverkoksi tai NURBS-pinnaksi. Vaihtoehtoisesti polygoniverkko voidaan tarvittaessa muuntaa edelleen NURBS-pinnaksi. Tarvittaessa tässä vaiheessa malli voidaan viedä muihin ohjelmiin universaaleissa tiedostomuodoissa, kuten IGES.

Seuraavaksi pintamallista luodaan poikkileikkauksia ja tunnistetaan piirteitä, joita käytetään parametristen piirteiden luomiseen. Näistä piirteistä muodostetaan piirrepohjainen malli. Lopuksi työn tulokset analysoidaan vertaamalla saatua solidimallia skannausdataan. (Wang, 2010, 25–28; Reverse Engineering 101: Step-by-Step Guide to Creating Parametric CAD from 3D Scan Data, n.d.)

3.5 Työohjeen laatimisen seikat

Työohjetta pystytään hyödyntämään uusien työntekijöiden perehdyttämisessä ja ne toimivat myös muistilistana. Työohjeen laatiminen myös auttaa työnkulun kehittämisessä, sillä se tuo prosessin ongelmakohdat esiin, kun yksittäisiä työvaiheita tarkastellaan. Työohjeet soveltuvat vakiintuneille työtehtäville. Hyvä työohje on selkeä, lyhyt ja samalla kaikki työn vaiheet huomioon ottava. Jotta nämä asiat toteutuisivat, on nojattava työntekijän ammatilliseen osaamiseen ja ongelmanratkaisukykyyn. Kaiken työhön liittyvän tiedon sisällyttäminen ohjeeseen voi tehdä siitä raskasta luettavaa. Työohjeen täytyy siksi olla ytimekäs. Työohjetta on myös tärkeää päivittää samalla, kun prosessi muuttuu. (Makkonen & Lavikainen, 2020).

Kun laaditaan ohjetta, kannattaa käyttää käskymuotoa. Se selkeyttää tekstiä ja erottaa työntekijän tehtävät asioista, mitä muut tekevät tai mitkä tapahtuvat automaattisesti. Ohjeeseen täytyy tunnistaa ohjeistettavalle asialle olennaiset asiat. Ohjeen laatijan täytyy avata sellaisetkin asiat ohjeeseen, mitkä ovat laatijalle itselleen itsestäänselvyksiä. Jos ohjeessa käytetään ohjeen oletetulle käyttäjälle tuntematonta termiä, se täytyy selittää. Jos ohjeessa käsitellään päivämääriä, käytetään täydellisiä päiväyksiä. Ohjeen selkeydelle on tärkeää, että sen vaiheet ovat järkevissä järjestyksessä ja siinä tarkennetaan, mitkä vaiheet ovat pakollisia ja mitkä valinnaisia. (Vinkkejä ohjetekstin tekijöille 2019.)

3.6 Laatu

3D-skannaamisen yhteydessä laatu määritellään luodun 3D-mallin geometrisena mittatarkkuutena. Nämä tarkkuuden määritelmät löytyvät ISO 10360 -standardista (ISO 10360-8:2013).

Takaisinmallinnustyön laatu ilmenee siinä, että kaikki työn vaiheet sekä suunnitteluvalinnat on dokumentoitu ja jäljitettävissä (Salmela 2022).

Kun mallinnetaan piirrepohjaista CAD-mallia, täytyy noudattaa hyvän mallintamisen ohjeita. Tehdessä 2D-sketsejä, kappaleet asemoidaan järkevästi origoon nähden. Sketsit ovat täysin määritellyjä. Sketsit eivät saa olla liian monimutkaisia. Mitoituksen sijaan käytetään relaatioita, kun se on mahdollista. Mallin mittojen muokkaaminen tai piirteiden poistaminen ei saa ”rikkoa” mallia. Osa CAD-mallin laadukkuutta on myös sen selkeys muille kuin alkuperäiselle mallintajalle. Mallintaminen täytyy suorittaa siten, että rakennepuu rakentuu järkevästi alkaen pääpiirteistä loppuen pyöristyksiin. Jatkokäyttöä varten mallin piirteet kannattaa nimetä kuvaavasti rakennepuussa. Mallintajan täytyy itse testata mallin toimivuus kokeilemalla mittojen muutoksia ja suppressoimalla sen piirteitä, kun malli on valmis. (CadWorks n.d.; Laaksonen n.d.)

4 Kehittämistyön tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Kehittämistyön tarkoituksena oli luoda työnkulku 3D-skannausdatan muuntamiseksi CAD-malliksi toimeksiantajan olemassa olevilla laitteilla sekä ohjelmistoilla ja laatia sen perusteella työohje. Tällainen työ on tarpeellinen toimeksiantajalle, koska tällä hetkellä yrityksessä ei ole tietotaitoa tällaisen palvelun tuottamiselle, vaikka sille on kysyntää. Tutkimustyön aikana voi myös selvittää, mihin olemassa olevalla laitteistolla pystytään tai ei. Työ onnistuessaan parantaa 3D-skannaus- ja takaisinmallinnuspalveluiden tarjontaa ProSolve Oy:n toimialueella. Tavoitteiksi työlle määritettiin seuraavat asiat:

- Muunnetaan 3D-skannaus piirrepohjaiseksi solidimalliksi
- selvitetään mikä mahdollisista olemassa olevista työnkuluista on paras
- arvioidaan kuinka laadukkaita muuntotyön tulokset ovat
- tehdään parhaasta työnkulusta työohje.

Opinnäytetyön tutkimusongelma tiivistettiin tutkimuskysymykseen: *“Mikä on paras tapa tuottaa parametrinen solidimalli skannausdatasta ProSolve Oy:stä löytyvillä työkaluilla ja onko se riittävän laadukas?”*

5 Toteutus

Opinnäytetyö toteutettiin tutkimuksellisenä kehittämistyönä. Tässä raportin osuudessa kuvaillaan sen prosessia. Käsitellään tiedonhakuja, työn käytännön toteutuksen lähtökohtia ja kerrotaan työssä tehdyt toimet.

5.1 Tiedonhaku

Opinnäytetyön alussa työlle määriteltiin keskeiset tavoitteet ja rajattiin aihe. Nämä asiat tiivistettiin tutkimuskysymykseen. Aihepiiriin liittyvistä käsitteistä valittiin olennaisia hakusanoja.

Tiedonhaku aloitettiin lukemalla aiemmin aiheesta tehtyjä suomenkielisiä opinnäytetöitä, kandidaatintutkintoja ja diplomitöitä. Aiheeseen liittyvien opinnäytetöiden etsiminen tehtiin Theseus-palvelun kautta. Suomalaisten yliopistojen työt löytyivät Google-hakukonetta käyttäen. Seuraavaksi etsittiin näissä töissä olleita alkuperäisiä lähteitä. Osasta toissijaisista lähteistä löytyi suora linkki alkuperäisiin lähteisiin, osa niistä löytyi hakukoneella ja osa löytyi JAMK:n pääkampuksen kirjastosta.

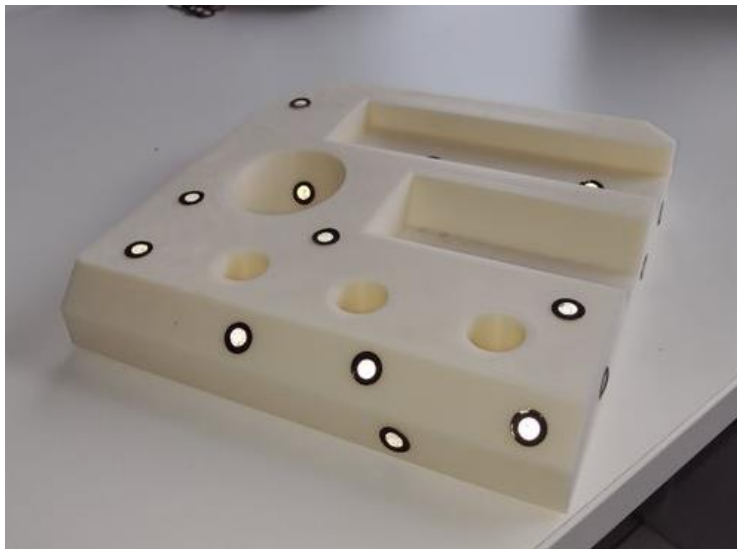
Osaan lähteistä saatiin vinkki opinnäytetyön ohjaajalta. Lähteiden hakuun käytettiin myös Google Scholar-hakukonetta.

5.2 Käytetyt ohjelmistot ja laitteisto

5.2.1 Creafom Go!SCAN 3D G2

AETEK:in omistama Creafom julkaisi Creafom Go!SCAN 3D G2 -skannerin vuonna 2014. Go!SCAN-linjan 3D-skannerit perustuvat strukturoidun valon teknologiaan, minkä etuna on nopea skannausdatan tallennus ja tarvittaessa kappaleen pinnan tekstuurin tallennus kuvamuodossa. Jos mitatarkkuus on olennainen seikka skannauksen tavoitteissa, täytyy kiinnittää erityistä huomiota valaistukseen ja skannattavan esineen valmisteluun, kun käytetään tätä skannausteknologiaa.

Creaformin käsiskannerit kuten Go!SCAN asettavat skannauksen nollapisteen ensimmäisen skannauksen perusteella skannauslaitteen asemaan sekä asentoon ja pistepilven koordinaatit tallentuvat suhteessa siihen. Pistepilven nollapistettä eli origoa voidaan siirtää jälkikäteen jälkikäsitteilyn kannalta suotuisampaan paikkaan. Jotta datapisteet muodostuisivat oikeaan paikkaan myös sen jälkeen, kun skanneria siirretään, skannerin täytyy seurata liikettään skannattavaan kappaleeseen tai sen ympäristöön asetetuilla tähyksillä (ks. Kuvio 6), tai tunnistamalla geometriset piirteet kappaleen pinnasta. Jos mallin tarkkuus on ensisijaista, täytyy tähyksiä käyttää. Lisäksi, jos mallin tekstuurin tallentaminen on käytössä, on mahdollisuus käyttää tekstuurin ominaisia piirteitä luonnollisina tähyksinä *Natural feature targets* -toiminnon avulla.



Kuvio 6. Tähyksillä päällystetty mitattava kappale.

5.2.2 VXelements ja VXmodel

VXelements on Creaformin julkaisema 3D-skannausohjelma. VXelements:iin on saatavilla useita laajennuksia, joilla lisätään ohjelmiston toiminnallisuutta. Näistä VXmodel on tarkoitettu takaisinmallinnukseen. Sen toiminnallisuus koostuu mm. yksinkertaisesta muotovertailutyökalusta, erilaisen alkeispiirteiden, kuten sylinterien, pintojen tai viivojen tunnistamisesta, poikkileikkaussiluetien tekemisestä ja näiden piirteiden viennistä suoraan CAD-ympäristöön. Tuettuja CAD-ohjelmistoja ovat SolidWorks, AutoCAD Inventor ja Solid Edge.

5.2.3 Geomagic Studio 2014

Geomagic Studio 2014 on 3D systems:in vuonna 2013 julkaisema takaisinmallinnusohjelma. Ohjelma tarjoaa laajan työkaluvalikoiman pistepilvimallien käsittelyyn, polygonimallien korjaamiseen, muokkaamiseen ja jalostamiseen ja takaisinmallinnukseen.

5.2.4 SolidWorks

SolidWorks on Dassault Systèmes:in julkaisema CAD-ohjelma. Se on maailmanlaajuisesti tunnettu ja yleinen alan ohjelmisto. Tämä ohjelma valittiin käytettäväksi työssä muiden CAD-ohjelmien joukosta, koska VXmodelin versio oli yhteensopiva sen kanssa. Lisäksi sen käytöstä oli aiempaa kokemusta ja se oli todettu intuitiiviseksi käyttää.

5.2.5 3D Live scanner

Yhtenä arviointikriteerinä ohjelmistoille oli ulkopuolisen datan yhteensopivuus ja työssä haluttiin tutkia myös älypuhelimien skannerisovelluksia. Tätä varten tutkittiin vapaasti Google play-kaupasta löytyviä sovelluksia ja käyttöön valikoitui 3D Live scanner -niminen sovellus. Sovelluksen toiminta perustuu fotogrammetriaan, joten se toimii kaikissa nykyaikaisissa älypuhelimissa. Sovelluksesta voidaan tuoda 3D-pintamalleja OBJ tiedostomuodossa.

5.3 Vertailtavat takaisinmallinnusmenetelmät

Takaisinmallinnukseen valittiin kaksi vertailtavaa menetelmää, yksi, jossa käytettäisiin apuna VXelementsin VXmodel-laajennusta ja toinen, jossa hyödynnettäisiin Geomagic studio 2014-ohjelmaa.

VXmodel + SW

Ensimmäinen menetelmä perustui mallin skannausdatan jalostamiseen, yksittäisten piirteiden ja kappaleen ääriviivojen tunnistamiseen VXmodel:issa, ja näiden vientiin SolidWorksiin, jossa uusi malli mallinnettaisiin näitä piirteitä referenssinä käyttäen manuaalisesti. Viitataan tähän menetelmään VXmodel + SW-nimellä

Geomagic Studio 2014

Toinen menetelmä eteni viemällä skannausdata STL-polygonimallina VXelements-ohjelmasta Geomagic Studio 2014 -ohjelmaan (GM), missä polygonimalli siivottiin ja korjattiin umpinaiseksi. Tämän jälkeen malli vietiin ohjelman *Parametric Surfaces* -työtilaan, jossa pinnoista tunnistettiin parametriset piirteet automaattisesti. Tästä eteenpäin olisi käytetty *Parametric exchange* -toimintoa, joka olisi mahdollistanut mallintamisen piirteiden pohjalta suoraan CAD-ympäristössä. Tämä ei kuitenkaan onnistunut, joten malli muunnettiin GM:ssa STEP-tiedostomuotoon ja tuotiin SolidWorks-ohjelmaan sellaisenaan.

Nämä menetelmät valittiin vertailtavaksi, koska molemmissa nähtiin olevan hyvät puolensa.

VXmodel + SW-menetelmä tuntui virtaviivaisemmalta ja helpommalta ymmärtää. Geomagic toi pöytään vapaamuotoisten NURBS-pintojen manuaalisen määrittämisen, sekä ohjatut ja automatisoidut toiminnot parametristen piirteiden luomiseen.

5.4 Tulosten arviointi ja mittakappaleet

3D-skannattavat kappaleet valittiin siten, jotta vertailtavien ohjelmien vahvuuksia erityyppisten kappaleiden digitoinnissa pystyttäisiin tutkimaan. Kappaleiksi pyrittiin ottamaan sellaisia kappaleita, jotka olisivat kohtuullisen helppoja skannattavia, jotta skannausdata olisi riittävän eheää ja laadukasta mallin muuntamista varten. Näin meneteltiin siksi, että työssä pystyttäisiin keskittymään tutkimusaiheeseen eikä työn fokus siirtyisi skannaustapahtuman onnistumiseen. Lopulliset mittakappaleet olivat seuraavat:

- Traktorin nostokoukku
- sorvattu kappale
- alumiinista pursotettu kappale
- 3D-tulostettu kappale
- tuoli.

Jotta työn tulosten vertailu onnistuisi objektiivisesti, sitä varten laadittiin painotettu pisteytys tehtävän kannalta merkityksellisten aspektien perusteella. Pääosa vertailusta koostui ohjelmien käyttäjätestauksesta. Käyttäjätestauksessa suoritettavat tehtävät päätettiin ajastaa ja tallentaa ruutu-kaappauksina, jotta tehtäviin pystyttiin keskittymään ja määritettyjä Aspekteja voitiin arvioida jälkikäteen. Lisäksi vertailtiin ohjelmien yhteensopivuutta, ominaisuuksien määrää ja käyttöliittymän selkeyttä. Ohjelmistojen kulukysymyksiä ei otettu huomioon, koska molempien ohjelmien

lisenssit on aikanaan ostettu kertamaksulla toistaiseksi pysyviksi. SolidWorks on muissakin työtehtävissä tarpeellinen, joten sen lisenssimaksut olivat yhdentekeviä.

Työvaiheiden määrä -aspekti määriteltiin siten, kuinka monessa eri ”työtilassa” malleja joudutaan käsittelemään.

PISTEYTYSMATRIISI MUUNTAMISTYÖN VERTAILUUN					
Tyyppi	Skannattu kappale	Arvioitava aspekti	Painotus	Geomagic 2014	Vxmodel
Tehtävät	Tuoli	Solidimallin teko onnistuu	100,00 %		
		Malli voidaan mitoittaa CAD-ohjelmassa	100,00 %		
		Käytetty aika	100,00 %		
		Työvaiheiden määrä	50,00 %		
	Holkki	Solidimallin teko onnistuu	100,00 %		
		Malli voidaan mitoittaa CAD-ohjelmassa	100,00 %		
		Käytetty aika	100,00 %		
		Työvaiheiden määrä	50,00 %		
	Pursotettu kappale	Solidimallin teko onnistuu	100,00 %		
		Malli voidaan mitoittaa CAD-ohjelmassa	100,00 %		
		Käytetty aika	100,00 %		
		Työvaiheiden määrä	50,00 %		
	3D-tuloste	Solidimallin teko onnistuu	100,00 %		
		Malli voidaan mitoittaa CAD-ohjelmassa	100,00 %		
		Käytetty aika	100,00 %		
		Työvaiheiden määrä	50,00 %		
Mallin vastaavuus fyysiseen kappaleeseen		100,00 %			
Yleiset		Yhteensopivuus ulkopuoliseen dataan	50,00 %		
		Ohjelmiston käyttöliittymä	50,00 %		
		Ohjelmiston ominaisuudet	50,00 %		
				Lopulliset pisteet	Lopulliset pisteet
				0	0

Kuvio 7. Alkuperäinen, tyhjä pistematriisi. Tästä puuttuu traktorin nostokoukku.

Vertailun pisteytys toteutetaan antamalla yksi piste sille ohjelmalle, joka suoriutuu kyseessä olevasta aspektista paremmin. Jos suorituskyky on tietyn aspektin kohdalla ohjelmissa sama, kumpikin ohjelma saa pisteen. Pisteet painotetaan aspektin keskeisyyden mukaan ja ne lasketaan yhteen. Maksimipistemäärä vertailussa on 21 pistettä.

5.5 Suunniteltu työnkulku

Tässä osiossa käydään läpi, miten käyttäjätestaus toteutetaan aloittaen fyysisestä kappaleesta päättyen valmiiseen CAD-malliin.

5.5.1 Kappaleen ja skannerin valmistelu

Käytännössä työnkulku alkaa sillä, että selvitetään työn tavoitteen kannalta oleelliset skannattavat pinnat, mahdolliset täydentävät mittausmenetelmät ja valmistellaan mitattava kappale, jos tilanne

vaatii. Kappale valmistellaan kiinnittämällä siihen riittävästi tähyksiä. Riittävä määrä riippuu kappaleen muodosta ja koosta. Mitä enemmän kappaleessa on tähystarroja, sitä paremmin skanneri pysyy kohdennettuna kappaleeseen, mutta ne peittävät skannattavaa pintaa ja tarrojen paikoilleen laittaminen sekä irrottaminen skannauksen jälkeen vievät aikaa. Lisäksi käytetyt tarrat ovat kuluera. Tämän lisäksi, jos kappaleen pinta on tumma tai kiiltävä, voidaan se pinnoittaa valkoisella jauhesuihkeella tai talkilla. Tämä parantaa mittaustarkkuutta ja nopeuttaa datan tallennusnopeutta. Skannaustapahtumalle määritetään optimaaliset asetukset datankeruun onnistumiselle olosuhteiden mukaan. Lisäksi skanneri kalibroidaan näissä olosuhteissa mahdollisimman hyvän mittatarkkuuden saavuttamiseksi. Creaform Go!SCAN 3D toimii strukturoidun valkoisen valon periaatteella, joten valaisulla on suurin merkitys tähän (Go!SCAN 3D: Technical specifications, n.d.).

5.5.2 Skannaaminen

Sen jälkeen kappale skannataan. Yleensä kappaleista joutuu ottamaan useampia erillisiä skannauksia eri suunnista, mutta mittatarkkuuteen pyrkiessä täytyy erillisten skannausten määrä pitää mahdollisimman vähissä, mielellään yhdessä, koska erillisten skannausten yhdistäminen voi aiheuttaa virheitä mallin geometriaan. Lisäksi erillisten skannausten yhdistäminen pidentää työn tekoon menevää aikaa. Kun kappale on skannattu, skannausohjelma verkottaa sen automaattisesti polygonimalliksi.

5.5.3 Pintamallin jälkikäsittely

Seuraava vaihe työnkulussa on ”siivota” skannausdata käyttökelpoiseksi. Mallista poistetaan kappaleeseen kuulumattomat ja turhat pinnat. Pinnassa olevat reiät täytetään. Pintamallista poistetaan epänormaalit piikit, joita kappaleessa ei oikeasti ole. Nämä piikit johtuvat yleensä heijastavan pinnan aiheuttamasta saturaatiosta. Pintamallia optimoidaan ja polygonimallin kolmioiden lukumäärää voidaan vähentää suorituskyvyn parantamiseksi. Tarkoituksena on saavuttaa mahdollisimman eheä malli mittausdatan muokkaamisen kustannuksella, jotta piirteiden tunnistaminen onnistuisi mahdollisimman hyvin. Wang (2010) kuvaa, että takaisinmallinnuksessa tarkoituksena ei ole luoda täydellistä kopiota, vaan saada aikaiseksi toiminnallisesti vastaava tuote. Pintamallin jälkikäsittelyn jälkeen malli asetetaan uudestaan koordinaatistoon loogiseen asentoon.

5.5.4 Takaisinmallinnus

Sen jälkeen määritellään ajatuksen tasolla tavat, miten kappale luodaan uudestaan CAD-ympäristössä. Mietitään siis, millä tekniikalla kappaleen piirteet saadaan tehtyä. Esimerkiksi pyyhkäisy- ja pyörähdyskappaleiden kohdalla mallista tehdään 2D-kuvanto halutusta kohdasta poikkileikkauksen ääriviivojen avulla. Pintamallista tunnistetaan ohjelmiston avulla tasopinnat, reiät ja muut geometriset alkio. Nämä tunnistetut piirteet ja poikkileikkaukset viedään CAD-ohjelmaan ja niiden avulla mallinnetaan CAD-ohjelmistolle natiivi piirrepohjainen solidimalli. Kun malli on valmis, sitä voidaan verrata skannausdataan tekemällä lämpökartta mittapoikkeamista, josta voidaan tehdä johtopäätöksiä työn onnistuneisuudesta.

Skannausdataa voidaan muuntaa eri asteisesti käyttötarkoituksen mukaan. Yksinkertaisin tapa on muodostaa siitä ehjä pintamalli, joka ”täytetään” tilavuudelliseksi tai sille luodaan paksuus pyyhkäisemällä tai pursottamalla pintaa avaruudessa. Tällaisen mallin käyttö rajoittuu visualisointiin tai esimerkiksi tilanvaraukseen kokoonpanossa tai layoutissa. Polygonimalli on nopein tehdä mutta se on epäkäytännöllinen tiedostokoon ja sen visualisoinnin vaatiman prosessointitehon takia, ja se aiheuttaa usein ongelmia itsensä leikkaavien pintojen kanssa. Parempi tapa tämän tyyppisen mallin tekoon on muuntaa polygonimallin pinnat NURBS-pinnoiksi ja käyttää niitä. Toinen tapa on muuntaa skannatun kappaleen muodot parametrisiksi piirteiksi, jolloin mallille syntyy rakennepuu. Koska tämä menetelmä hyödyntää varsinaisia CAD-ohjelmia, se mahdollistaa myös työpiirustusten tekemisen ja malliin liittyvän tuote- ja materiaalitiedon tallentamisen mahdollisesti CAD-ohjelmaan integroidun PDM-järjestelmän avulla.

Näistä lähestymistavoista voidaan myös tehdä niin sanottuja hybridimalleja, missä yhdistellään molempia tekniikoita. Esimerkiksi Holocreators (n.d.) jaottelee takaisinmallinnuspalvelunsa tällä tavalla. Tarve mallin toiminnallisuudelle täytyy määrittää ja mallin muuntajalla täytyy olla ymmärrys mallinnettavan kappaleen suunnitteluvalinnoista. CAD-mallista jätetään skannatun kappaleen virheet pois, koska ne eivät ole suunnitellun kappaleen mukaisia. (Reverse Engineering 101: Step-by-Step Guide to Creating Parametric CAD from 3D Scan Data, n.d.) Täytyy ottaa myös huomioon kappaleen kuluma tai jos kappale taipuu paineen alaisena. Jos kappaleesta tunnistetaan esimerkiksi standardimittaisia liitännöitä tai siinä on vaikkapa tunnettu sovitementti, niitä hyödynnetään mallinnustyössä. Tässä on haasteena, että yleensä takaisinmallinnettavan kappaleen sallittuja toleransseja ei tunneta. (Wang 2010, 42–44; 49–50.)

5.6 Työohje

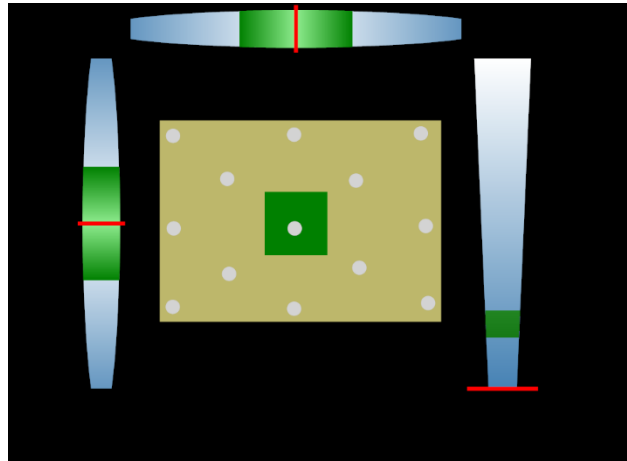
Työohje pätee käytettyjen ohjelmien senhetkiseen versioon. Jos versio muuttuu, täytyy ohjeen oikeellisuus tarkistaa ja päivittää. Työohjetta laatiessa oletuksena oli, että käyttäjä hallitsee Creaformin 3D-skannerin käytön, VXelementsin perustoiminnallisuuden ja CAD-ohjelmiston käytön.

5.7 Toimet

Opinnäytetyön käytännön toteutus aloitettiin suunnittelemalla testit ohjelmien vertailua varten. Tästä lisää kappaleessa 5.2. 3D-tulostettu kappale mallinnettiin itse ja se käytiin tulostamassa JAMK:n ns. protopajassa. Sorvattu kappale (holkki) ja alumiininen pursotettu kappale (jäähdytysiili), saatiin niin ikään lainaan protopajalta. Tuoli otettiin käyttöön ProSolvein toimistolta.

Kaikki testikappaleet skannattiin osana käytännön toteutusta, lukuun ottamatta traktorin nostokoukkuja, jonka skannausdata oli olemassa ennestään. Traktorin koukku päätettiin lisätä työhön, koska siitä oli saatu aikanaan hyvälaatuinen skannaus ja siinä oli paljon haastavia piirteitä, millä vertailla ohjelmien suorituskykyä.

Kappaleet valmisteltiin lisäämällä niiden pintoihin tähystarrat, ja tarvittaessa suihkuttamalla niiden pintaan valkoista jauhetta estämään pinnan heijastuksia tuomaan pinnan muodot paremmin esiin, jos kappaleen pinta oli tumma. 3D-skanneri kalibroitiin vallitsevissa olosuhteissa aina ennen skannaamista. Kappaleita käännettiin, jotta kaikki niiden pinnat saadaan skannattua. Tarvittaessa kappaleista otettiin useampia skannauksia, jos skanneri ei pysynyt kartalla kappaleen suunnasta. Skannausten projektitiedostoista otettiin varmuuskopiot erilliselle kiintolevyille. Skannaukset olivat valmiina 2022 toukokuussa.



Kuvio 8. Skannerin kalibroitinäyttö



Kuvio 9. Skannerin kalibrointilevy



Kuvio 10. Skannattavan kappaleen valmistelu

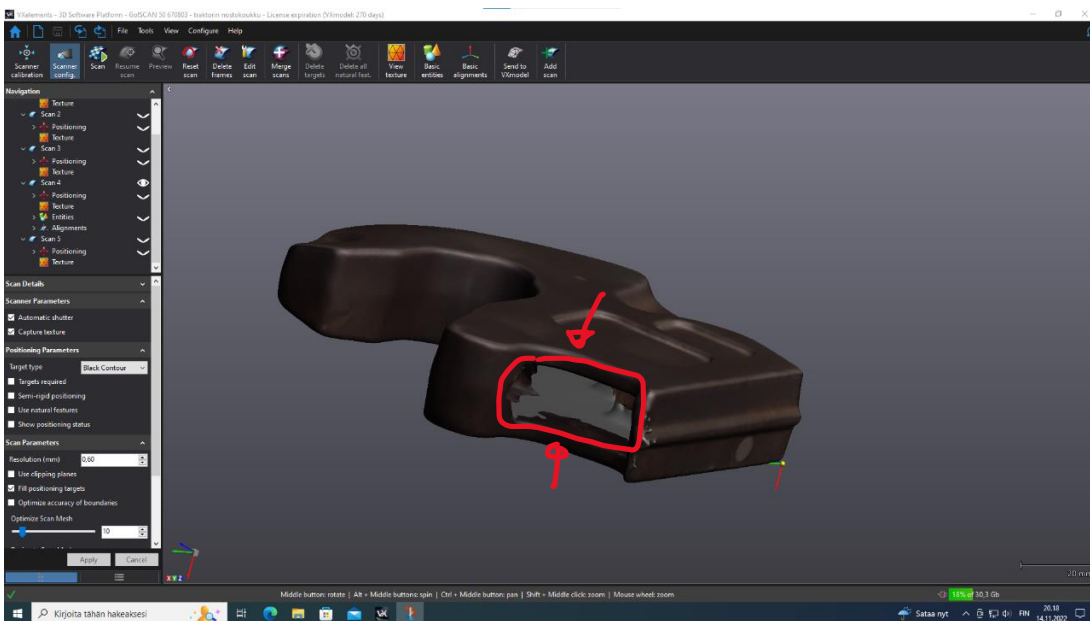
Takaisinmallinnukseen ryhdyttiin 2022 lokakuussa. Ennen varsinaista vertailtavaa työn osuutta skannausmateriaalista poistettiin epäolennainen data ja mallit aseteltiin pääkoordinaatistoon, jotta eri tavoin tuotetut mallit olisivat vertailukelpoisia. Ensiksi kappaleet mallinnettiin viemällä ne VXmodel-moduuliin VXelements-ohjelman sisällä, missä kappaleesta tunnistettiin tarvittavat piirteet, jotka vietiin SolidWorks:iin *transfer* -toiminnolla. SolidWorksissa piirteitä käytettiin mallintamisen pohjana, mutta mittoja ei sidottu tuotuihin piirteisiin, jotta mallin rakennepuu ja piirreperojaisuus toteutuisi. Työn teko ajastettiin lähtien raa’asti siivotusta skannausdatasta siihen, että valmis CAD-malli on tallennettu.

Ensimmäisenä mallinnuksen kohteena oli traktorin nostokoukku. Koukun pääpiirteet ja yksityiskohdat saatiin parhaiten jäljennettyä tekemällä kappaleesta poikkileikkauksia. Mallinnuksen tueksi kappaleesta tunnistettiin tasaisia pintoja ja sylintereitä, joita käytettiin mittojen tarkastamiseen. Esimerkiksi kun kappaleen molempiin tasaisiin kylkiin luotiin samansuuntaiset tasopinnat, jotka sovitettiin approksimaatiolla skannatun pinnan tasoon, voitiin tarkastaa kappaleen paksuus tarkemmin kuin pelkästään poikkileikkauksen ääriviivoista arvioimalla.

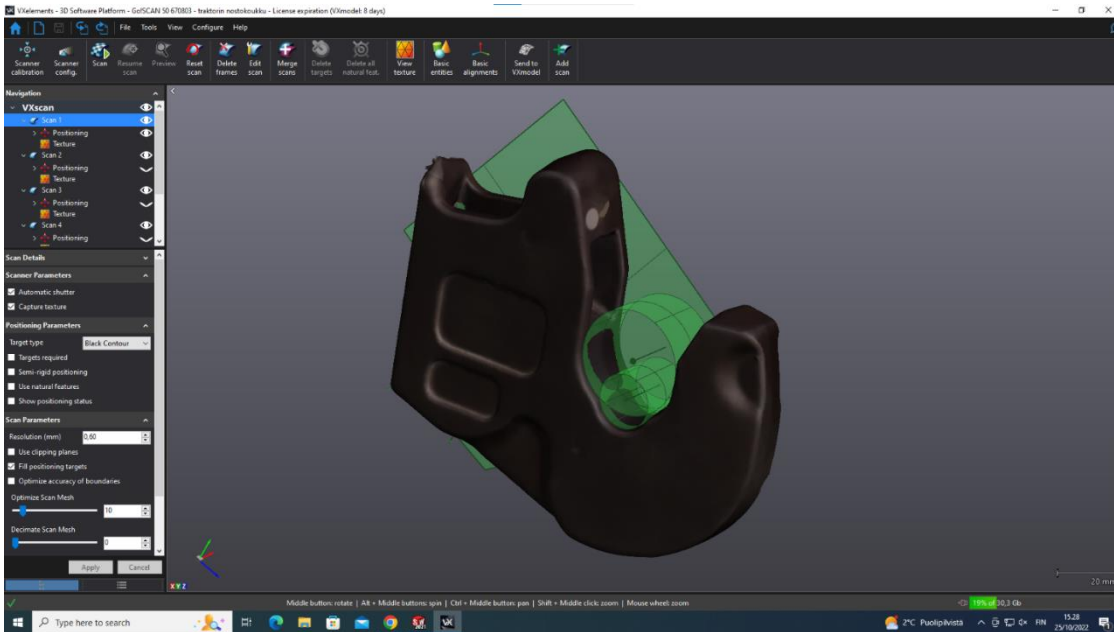
Kun kaikki tarvittavat ääriviivat ja muotoalkiot oli luotu, vietiin ne SolidWorks:iin. CAD-ympäristössä halutut piirteet jäljennettiin poikkileikkauksista 2D-tasossa ja malli luotiin pusottamalla,

kiertämällä ja vetämällä näitä 2D-piirroksia. Tärkeää oli, että *snapping*, asetus, jolla hiiren osoitin saadaan tarttumaan automaattisesti loogisiin pisteisiin, laitettiin pois päältä ei-haluttujen relaatioiden estämiseksi. Piirrosten rajoitteet ja relaatiot tehtiin poikkileikkauksista riippumattomiksi, jotta mallia voitaisiin muokata jälkepäin riippumatta alkuperäisen skannauksen muodosta.

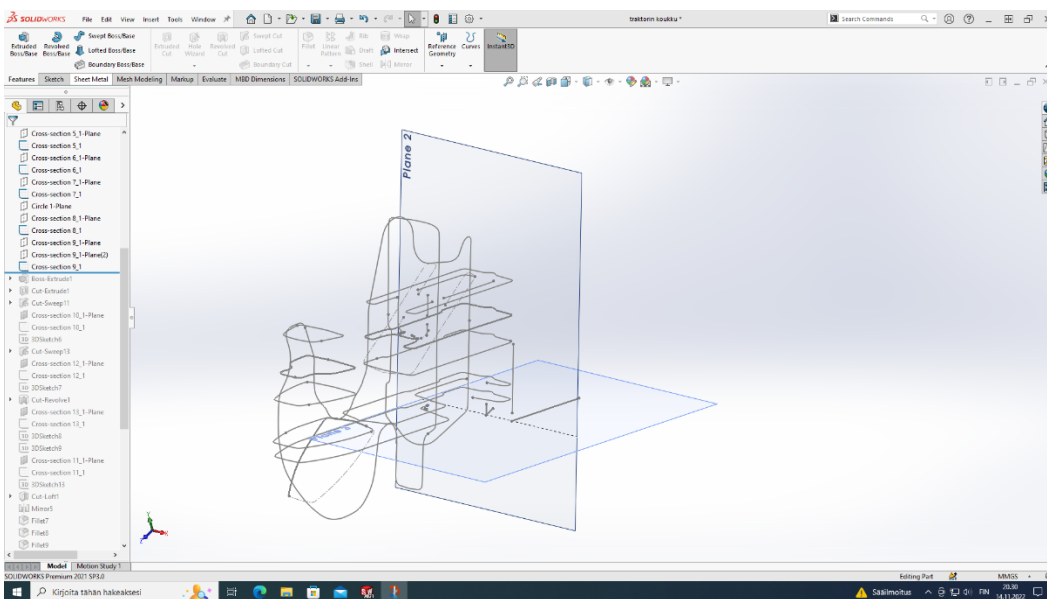
Traktorin koukussa oli myös ontto rakenne (ks. kuvio 11), jota ei ollut saatu skannattua kokonaan skannausmenetelmän teknisten rajoitusten takia. Koska fyysinen koukku ei ollut enää työtä varten saatavilla, puuttuvat pinnat arvioitiin malliin (ks. kuvio 15). Jos kappale olisi ollut saatavilla, onkalo olisi mitattu perinteisin menetelmin työntömitalla ja silmämääräisesti arvioimalla.



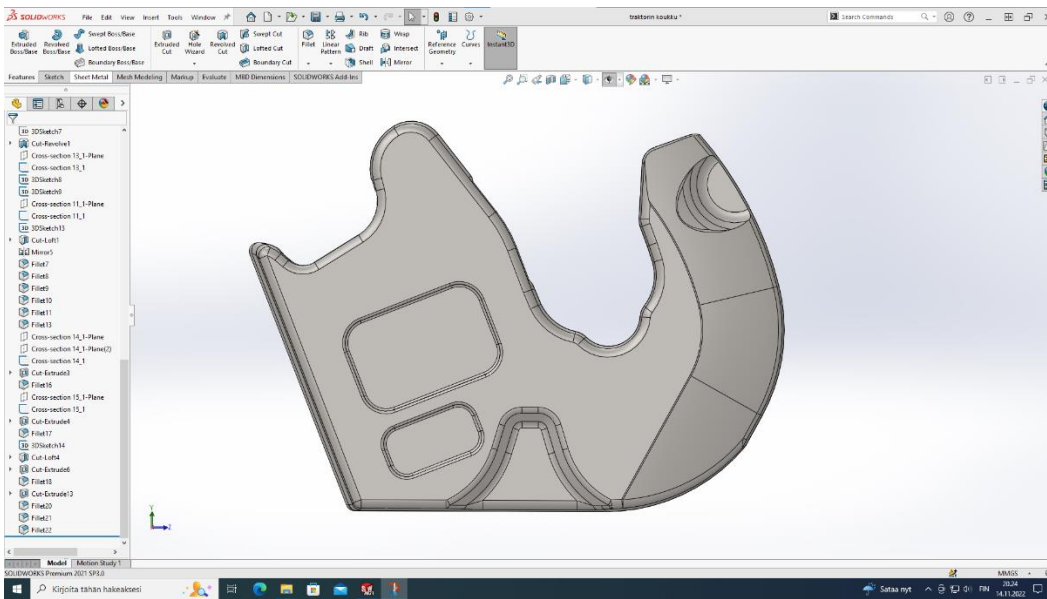
Kuvio 11. Traktorin koukun puuttuva sisusta



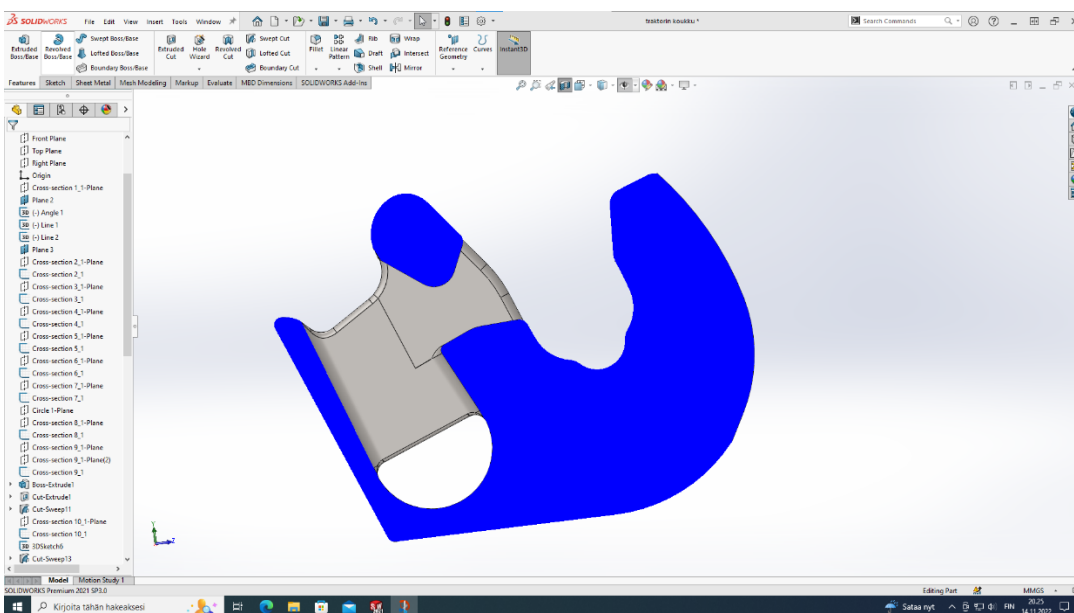
Kuvio 12. Traktorin koukun piirteiden tunnistusta (VXelements)



Kuvio 13. SolidWorksiin tuodut koukun piirteet

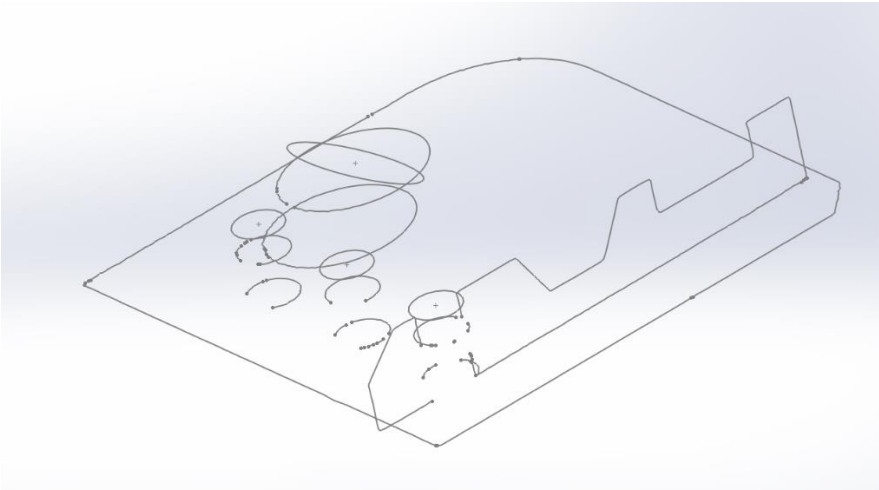


Kuvio 14. Valmiiksi mallinnettu traktorin nostokoukku

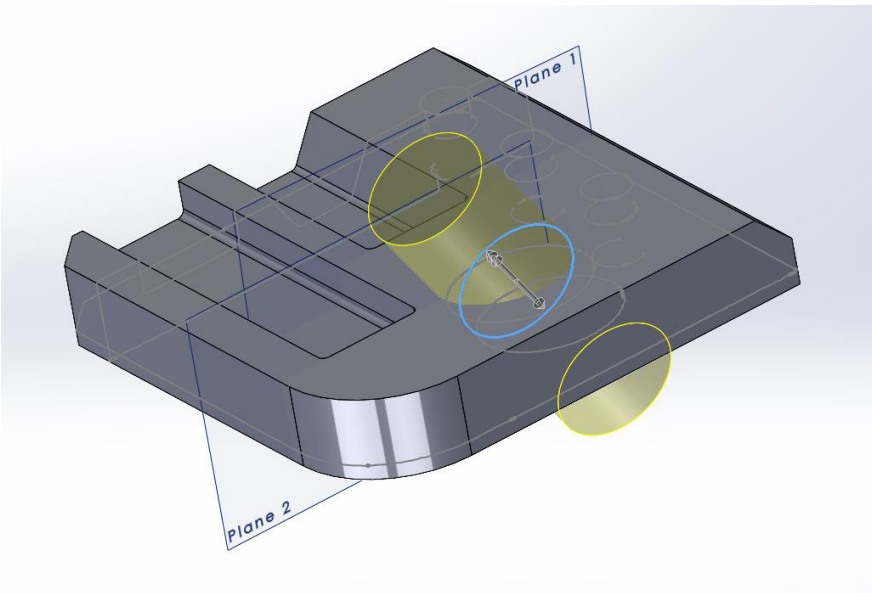


Kuvio 15. Nostokoukun uudelleen mallinnettu sisäpuoli

3D-tulostetun kappaleen mallinnus tapahtui hyvin samaan tapaan kuin traktorin koukunkin. Mallinnus oli suoraviivaisempaa, koska kappaleessa oli paljon suorakulmaisia muotoja. Erikoispiirteenä tässä mallissa oli se, että siitä oli olemassa alkuperäinen malli ja siitä tehty mittapiirros. Näiden avulla mallinnustyön ja fyysisen kappaleen vertailun lisäksi voitiin vertailla myös alkuperäisen mallin mittoja takaisinmallinnettuun malliin.

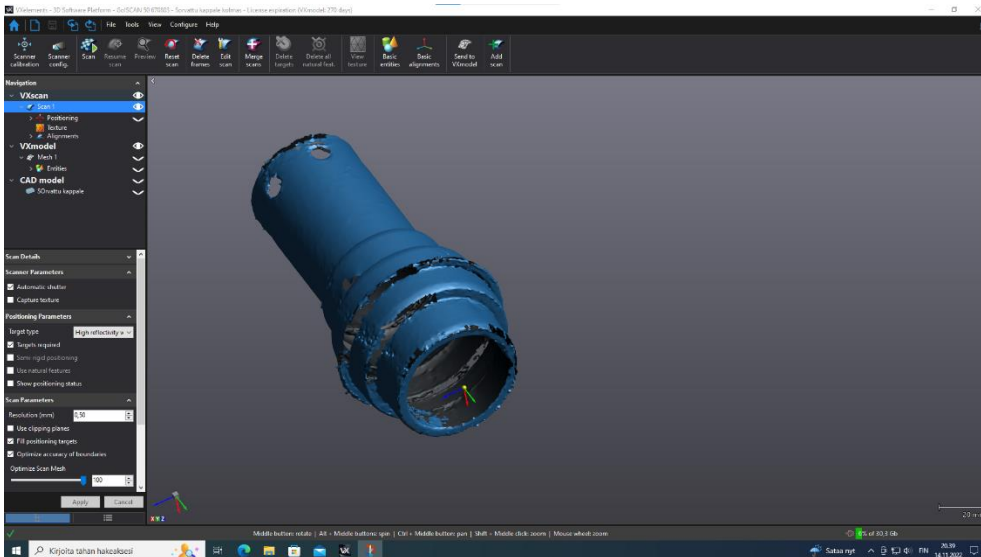


Kuvio 16. 3D-tulostetun kappaleen piirteet tuotuna SolidWorks-ohjelmaan

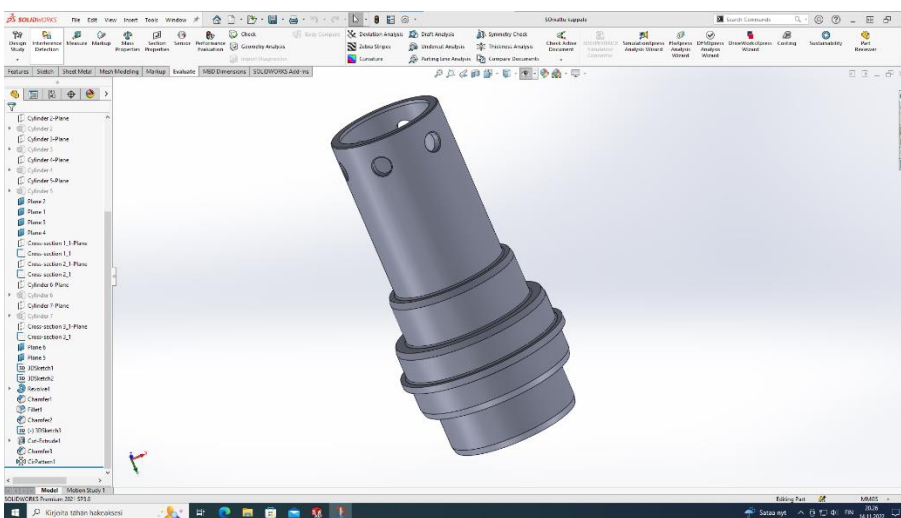


Kuvio 17. Sama kappale, viimeistä silausta vaille valmiina

Sorvattu kappale mallinnettiin ottamalla siitä poikkileikkauksia radiaalisesti keskiakselin läpi. Poikkileikkauksesta piirrettiin taas 2D-piirros, josta tehtiin pyörähdyskappale keskiakselin ympäri. 3D-skannerilla ei saatu skannattua paljoakaan kappaleen sisäpintaa, joten se mallinnettiin vain suoraksi putkeksi sisältä, vaikka tosiasiasa siellä oli lisää piirteitä, kuten uria. Jos nekin haluttaisiin mukaan malliin, täytyisi mallinnustyötä täydentää muin menetelmin. Tavallisella työntömitalla näihin piirteisiin ei päästy käsiksi tarpeeksi tarkasti.

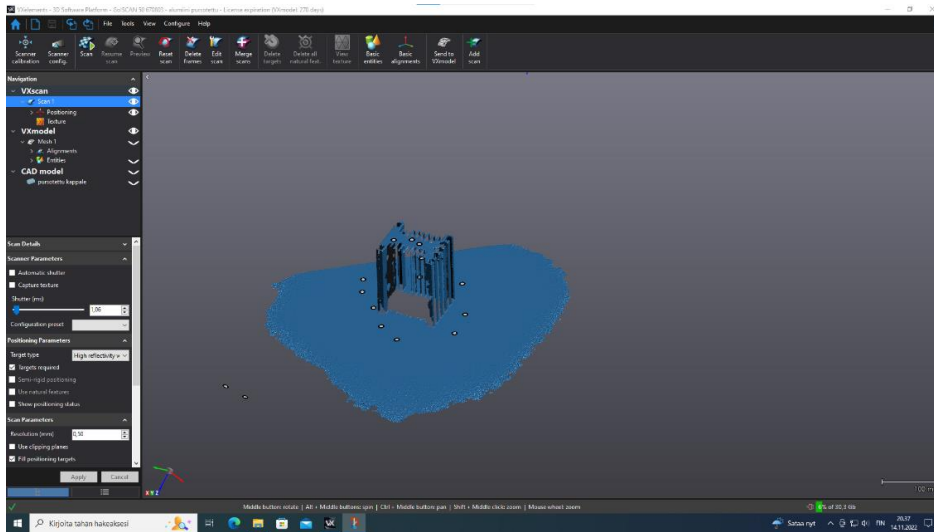


Kuvio 18. Sorvatus kappaleen skannausdata

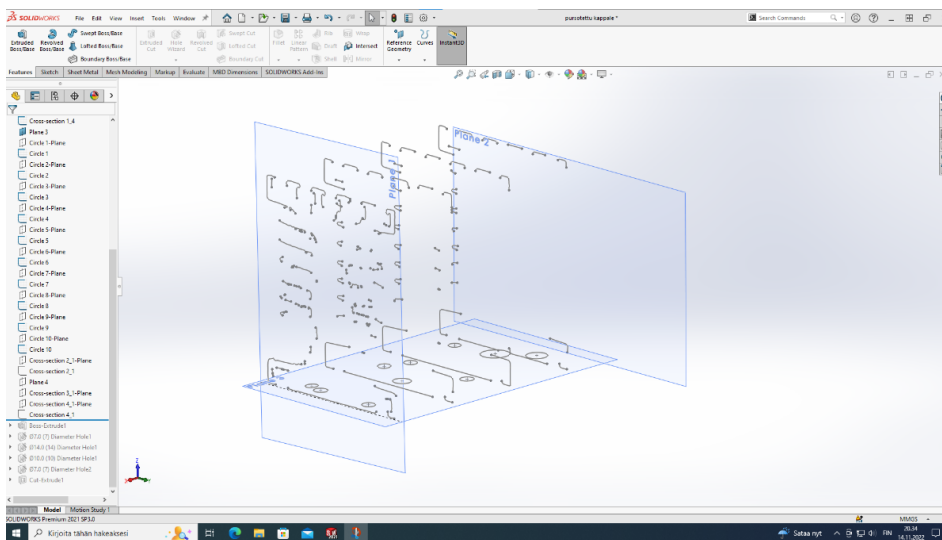


Kuvio 19. Sorvattu kappale mallinnettuna VXmodel+SW menetelmällä

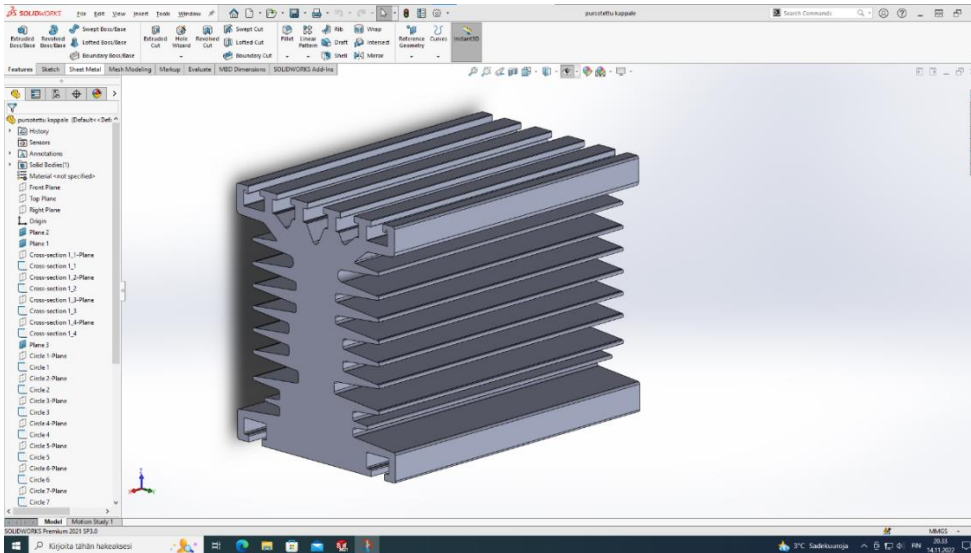
Pursotettu kappale mallinnettiin yksinkertaisesti ottamalla muutama poikkileikkaus sen profiilista ja luomalla tasopinnat sen päähän ja skannauksessa näkyvään pöydän tasoon, joista saatiin mitattua kappaleen pituus. Poikkileikkauksen ääriviivat jäljennettiin ja pursotettiin mitatun matkan verran. Haasteena olivat monimutkainen profiili ja puutteellinen skannausdata kappaleen jäähdytysriipojen juuressa



Kuvio 20. Pursotetun kappaleen skannausdata

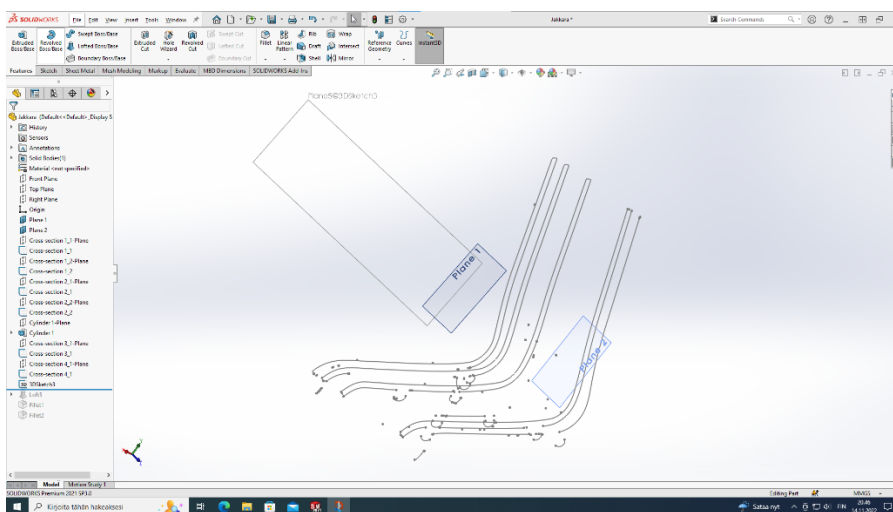


Kuvio 21 VXmodel:sta tuodut piirteet SolidWorks:iin

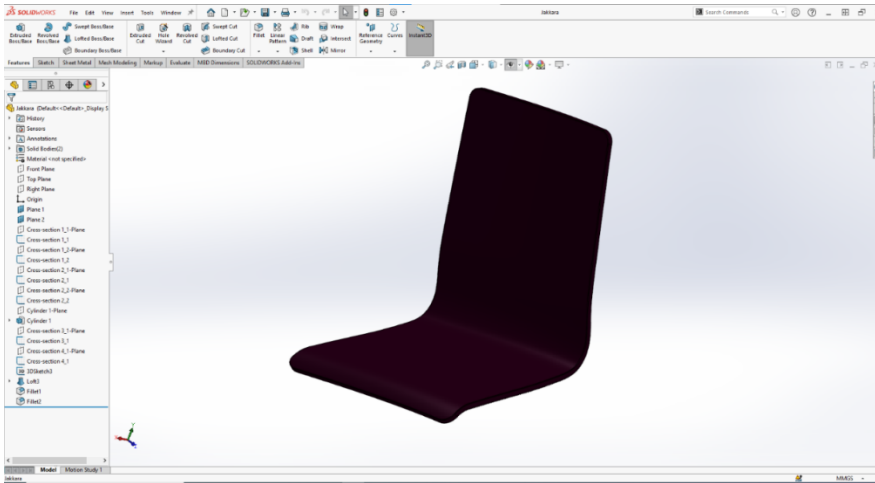


Kuvio 22 Pursotettu kappale mallinnettuna VXmodel+SW menetelmällä

Koska haluttiin testata vapaamuotoisten pintojen yhdistämistä muuhun malliin, tuolin mallinnuksessa kokeiltiin aluksi VXmodel'in *autosurface* -työkalua. Pinnan tuottaminen ei onnistunut heti, ja kun se asetusten muuttamisen jälkeen onnistui, oli muotoverkko epämääräinen. Päätettiin käyttää muuta menetelmää. Tuoli mallinnettiin ottamalla sen sivuprofiilista ja keskiosasta poikkileikkauksia. Ääriviivat mallinnettiin näiden päälle 2D-tasossa spline- ja kaarityökalujen avulla. Profiilien välille tehtiin spline-muotoinen ohjausviiva 3D-piiroksena. Kappale luotiin vetämällä luodut profiilit ohjausviivan kautta. Haasteena oli saada aikaan sellainen profiili, joka ei leikkaa itseään ja toimii muutenkin swipe-työkalussa.



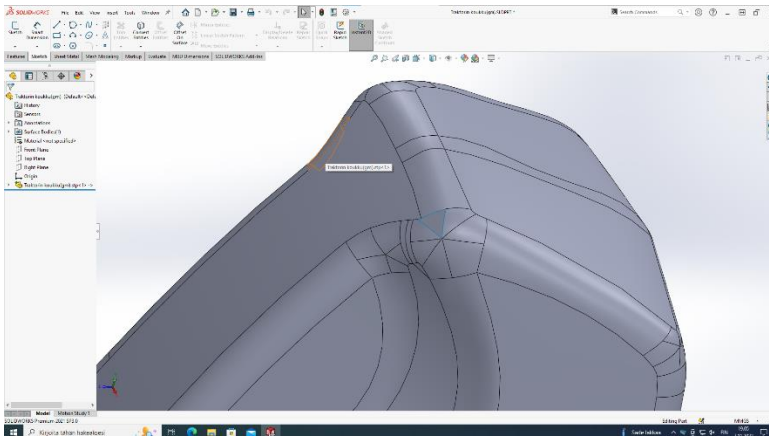
Kuvio 23. VXmodelista tuodut tuolin piirteet SolidWorksissa



Kuvio 24. Takaisinmallinnettu tuolin istuinosa SW:ssä

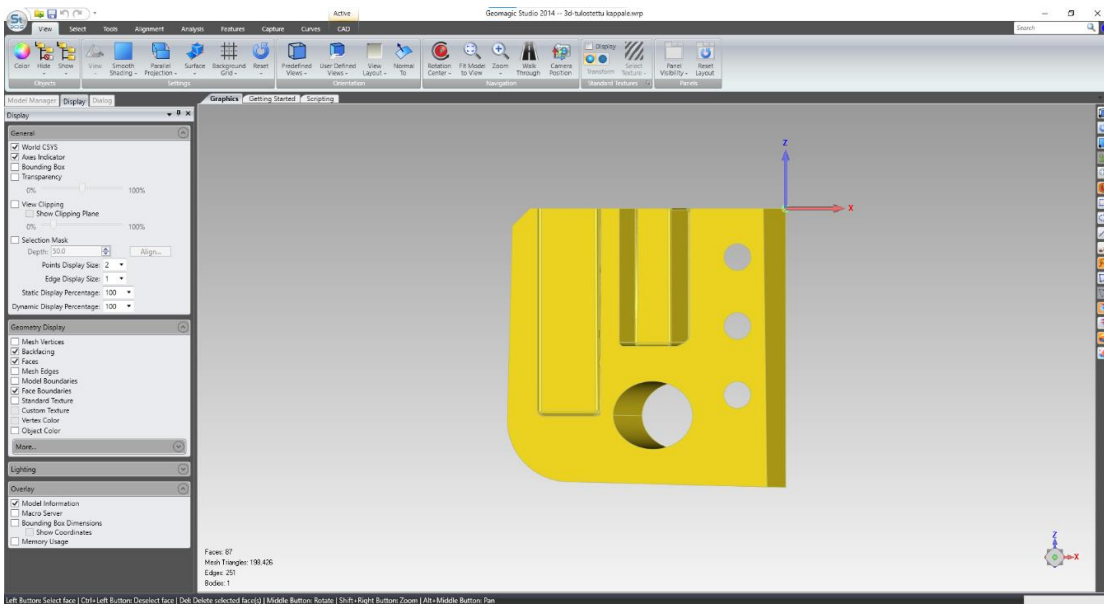
Seuraavaksi käytettiin Geomagic 2014-ohjelmaa mallinnukseen. Skannausdata tuotiin VXelementsis:istä polygoniverkkona ohjelmaan. Käytettiin Geomagicin polygoniverkon edistyneitä siivous- ja korjaustyökaluja, jotta mallista saatiin eheä ja siisti. Sen jälkeen käytettiin *parametric surfaces* -toimintoa. Sillä määriteltiin mallin eri pintojen rajat ja luokiteltiin pinnat tyyppien mukaan, kuten esimerkiksi tasoihin, pursotettuihin pintoihin ja vapaamuotoisiin pintoihin. Ohjelma approksimoi kappaleelle uudet pinnat. Jos rajat tai pinnat leikkasivat toisiaan tai aiheuttivat muita virheitä mallin muodossa, niitä säädettiin pinnan approksimaatiossa käytettyjen asetusten avulla sopivammaksi. Pinnoille annettiin suunta-, muoto- tai asentorajoitteita, kun se oli mahdollista, jotta saataisiin aikaan yhdensuuntaisia pintoja ja että kappaleen pinnat olisivat suorassa suhteessa pääkoordinaatistoon. Lopuksi pinnat toisiinsa yhdistävät reunat ja kulmat määritettiin. Kun kaikki pinnat ja reunat oli määritetty, ja mahdolliset muotovirheet korjattu, mallista tehtiin CAD-yhteensopiva ja se vietiin STEP-tiedostomuotoon. Tiedoston toiminta tarkastettiin tuomalla se SolidWorksiin. Työaika ajastettiin alkamaan siitä, kun polygoniverkko vietiin Geomagic:iin, ja lopputaamiseen, kun STEP-malli on tuotu onnistuneesti ohjelmasta. Tämä siksi, koska malli toimitettaisiin asiakkaalle todennäköisesti tässä muodossa. Jos mallia haluttaisiin muokata edelleen ja sille haluttaisiin rakennepuu, mallista voidaan tunnistaa piirteitä esimerkiksi SolidWorks:n FeatureWorks-työkalulla. GM:stä löytyy myös *parametric exchange* -työkalu, joka olisi virtaviivaistanut piirre pohjaisen mallin luontia, mutta valitettavasti se ei toiminut käyttäjättestausta tehtäessä. Syynä saattoi olla jossain puuttuvassa ohjelmiston laajenuksessa.

Traktorin koukun mallintaminen sujui joutuisammin, kuin VXmodel:in ja SolidWorks:in avulla, mutta moneen otteeseen jouduttiin käyttämään pintojen määrittämisessä vapaamuotoisia pintoja, jotta pinta saatiin suljetuksi. Tämä aiheutti sen, että osa pinnoista oli epämääräisiä. Pintojen tunnistaminen ja määrittely meni nopeasti, mutta mallin luominen epäonnistui monesti itsensä leikkaavien pintojen ja muiden virheiden takia. Näiden virheiden korjaamiseen meni paljon aikaa, ja lopulliseen malliinkin jäi kohta, mihin ei saatu luotua pintaa. (ks. kuvio 25)



Kuvio 25. Puuttuva pinta traktorin nostokoukussa, kun Geomagicissa luotua STEP-mallia tarkastellaan SW:ssä

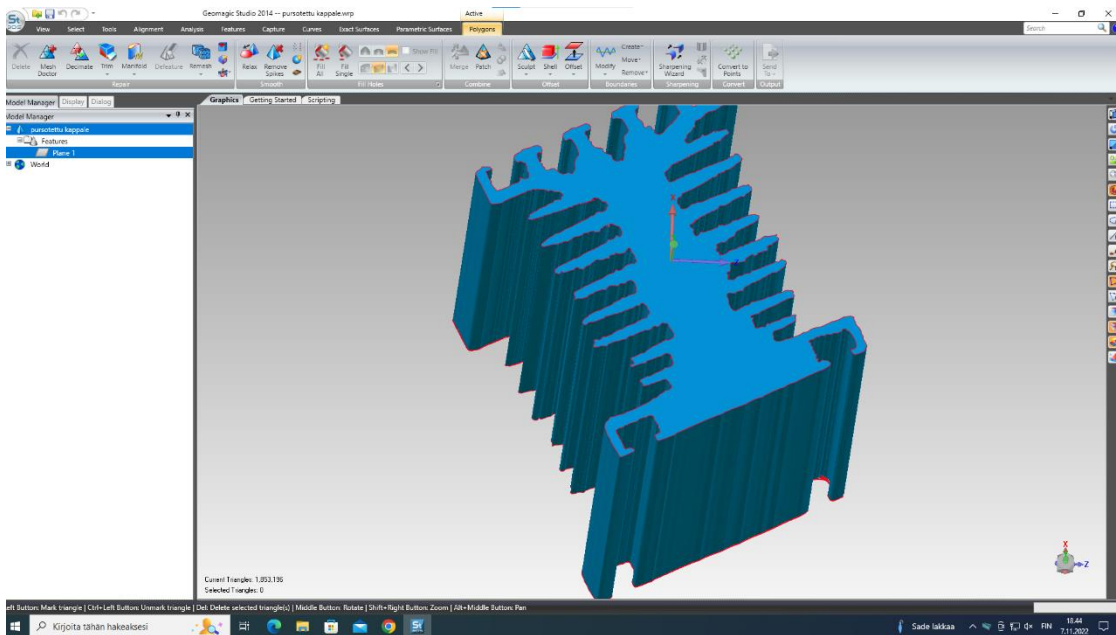
3D-tulostetun kappaleen mallinnus onnistui Geomagic Studiossa suoraviivaisesti. Hankaluuksia aiheutti kappaleen päällä olleiden urien pyöristetyt nurkat. Lisäksi mallissa paistoi ensimmäisellä mallinnuskerralla piirteiden suunnan ja asennon rajoittamisen puute, ja tämän virheen ilmettyä tätä jouduttiin korjaamaan muokkaamalla pintojen luokittelua ja niiden suuntaa sitomalla ne pääkoordinaatistoon. Jos virhe olisi huomattu heti, työaika olisi ollut suunnilleen sama kuin ensimmäisellä mallinnuskerralla, joten käytän sitä arvioinnissa.



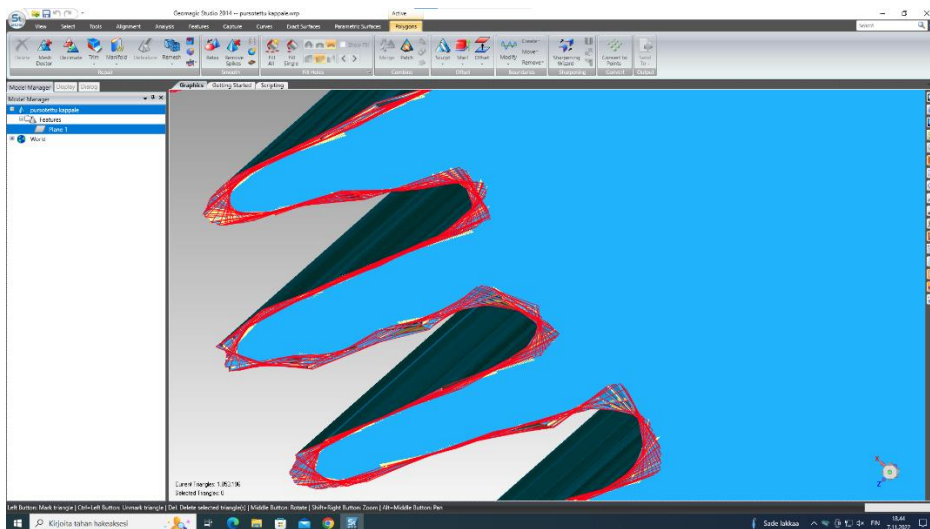
Kuvio 26. 3D-tulostettu kappale mallinnettuna Geomagic:issa. Huom. epäyhdensuuntaiset kappaleen reunat.

Sorvattua kappaletta ei pystytty mallintamaan laadukkaasti Geomagic Studiossa, koska skannausdatan laatu oli liian heikko (ks. kuvio 18). Koska useampi skannaus oli yhdistetty samaan pintamalliin, malli sisälsi toisiaan leikkaavia pintoja. Lisäksi skannausdata oli muutenkin puuttellista. Vaikka mallin korjaaminen manuaalisesti olisi ollut Geomagic Studiossa mahdollista, se olisi vienyt suhteettoman paljon aikaa eikä se olisi ollut mielekästä verrattuna siihen, miten nopeasti työ hoitui VXmodelin ja SolidWorksin avulla. Tämä mallinnustyö todettiin epäonnistuneeksi.

Pursotettu malli luotiin poistamalla skannausdatasta kaikki muu, paitsi kappaleen yläpinta, ja tämä pinta litistettiin samaan tasoon. Tätä tasoa vedettiin avaruudessa kappaleen pituuden verran. Tästä luodusta kappaleesta koitettiin tunnistaa pintoja *parametric surfaces* -toiminnolla, mutta kappaleen pinta oli liian rosainen (ks. kuvio 27), mikä aiheutti paljon virheitä pintoihin. Mallinnusta koitettiin uudestaan. Pintojen rosoisuutta yritettiin välttää litistettyä yläpintaa muokkaamalla. Tämä aiheutti paljon muutoksia tuotetun kappaleen geometriaan ja epämääräisyyttä. Tämäkin mallinnustyö todettiin epäonnistuneeksi.

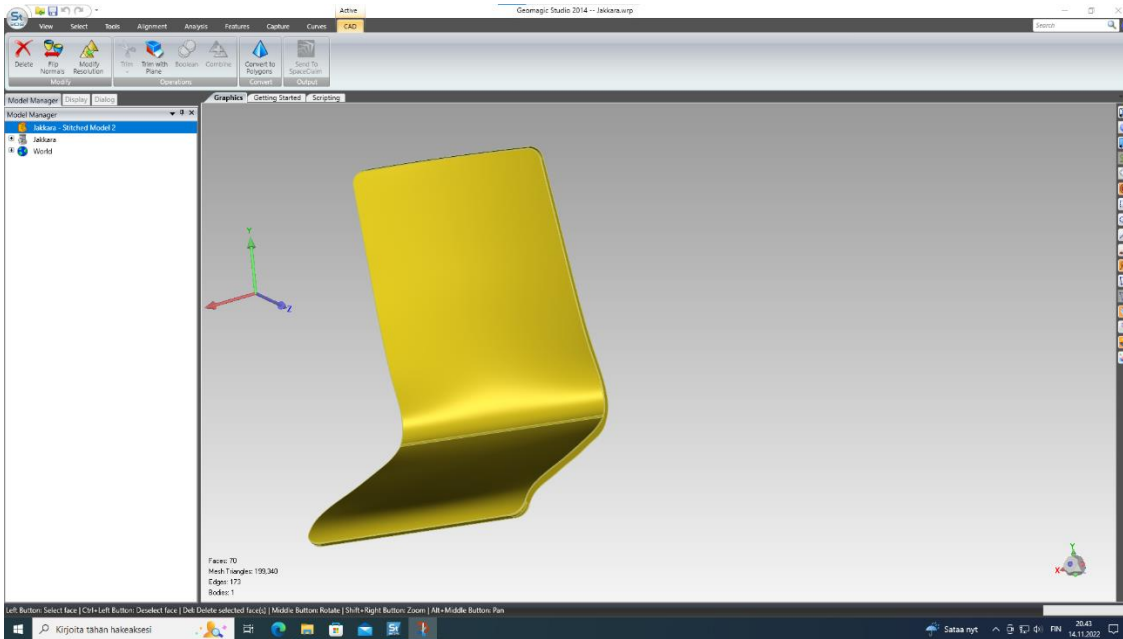


Kuvio 27 pursotettu kappale mallinnettuna Geomagic Studiassa



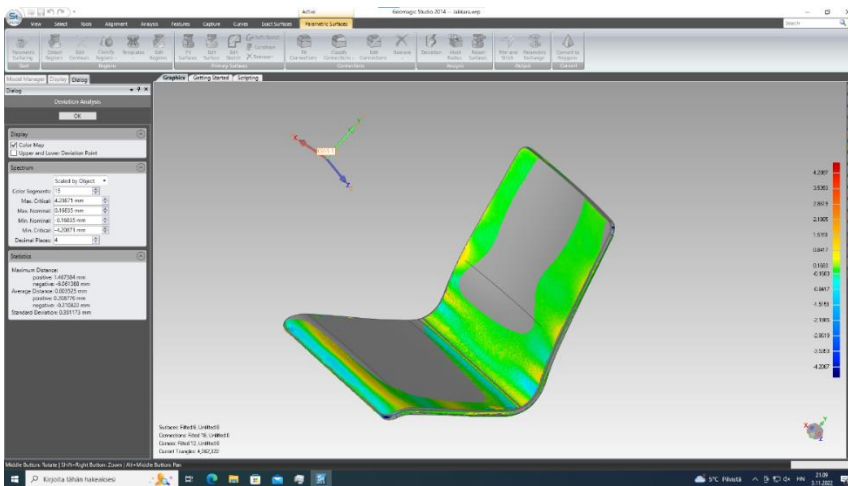
Kuvio 28 risteävät pinnat pursotetun kappaleen alapinnassa

Tuolin mallinnus onnistui Geomagic Studiassa hyvin. Tässä mallinnustyössä jouduttiin hyödyntämään freeform-pintoja, jotta mallin pinnan sulkeminen onnistuisi. Aikaa meni paljon polygonal-lin korjaamiseen, ja mallin suuri koko aiheutti ohjelman kaatuilua. En sisältänyt kaatuilun aiheuttamaa virheikää työaikaan.

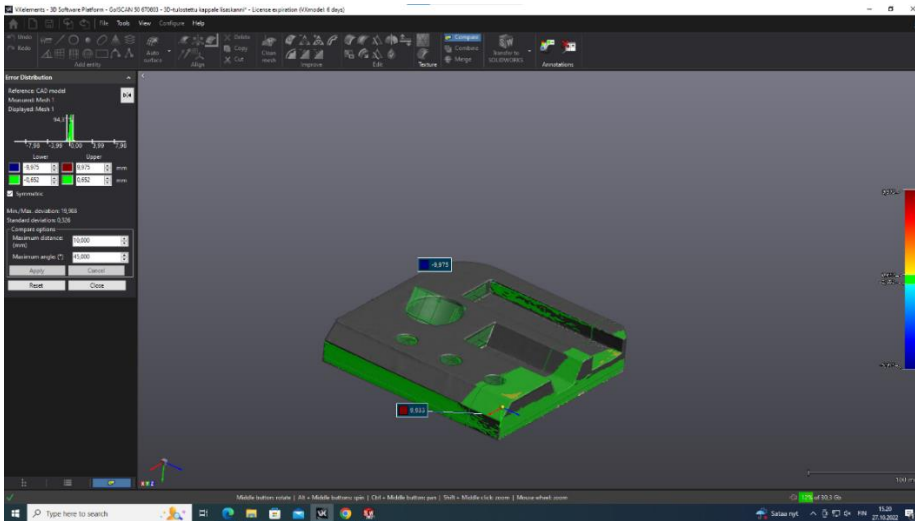


Kuvio 29. Geomagicissa mallinnettu tuolin istuinosa

Tuotettujen mallien geometriaa verrattiin alkuperäiseen skannausdataan orion avulla kohdennettuna ohjelmien muotovertailutyökaluilla.

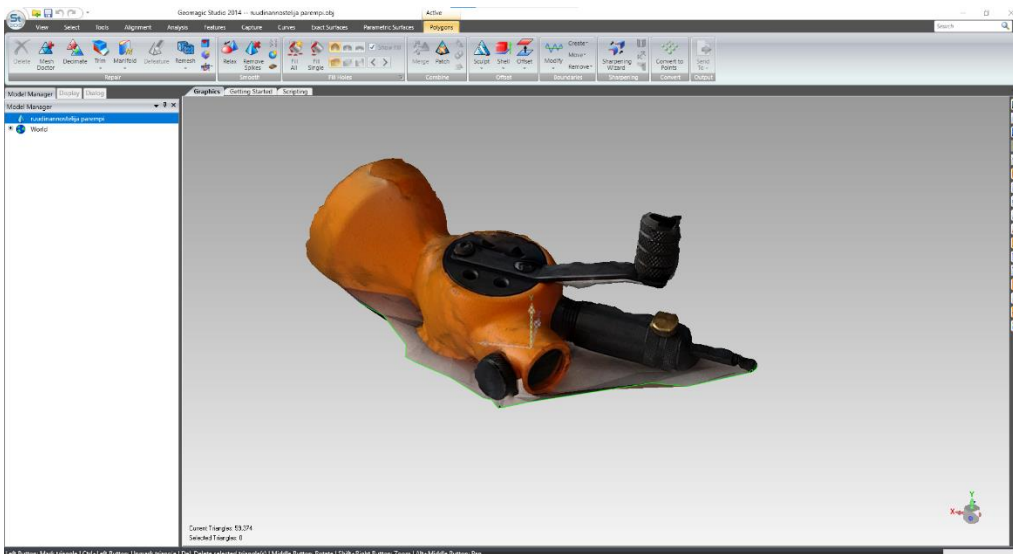


Kuvio 30. Mallin muotovertailua (Geomagic Studio 2014)



Kuvio 31. Mallin muotovertailua (VXmodel)

Lopuksi vielä kokeiltiin ulkopuolisen datan tuontia molempiin ohjelmiin. Puhelimeen asennetulla 3D-skannaussovelluksella skannattiin ruudinannostelija ja sen tuontia ohjelmistoon kokeiltiin.



Kuvio 32. Puhelimella skannattu kappale (GMS 2014)



Kuvio 33. Puhelimella skannattu kappale (VXmodel)

Takaisinmallinnustöiden valmistuttua menetelmät pisteytettiin aiemmin määriteltyjen aspektien mukaan ja siirryttiin tulosten analysointiin ja raportointiin. Tämän jälkeen työn tulosten perusteella parhaasta työkulusta laadittiin työohje.

6 Tulokset

6.1 Päätulokset

Käytännön toteutuksena suoritettuna käyttäjätestauksen perusteella VXmodel ja SolidWorks ovat parempi menetelmä piirrepohjaisen CAD-mallin tuottamiseen Geomagic Studio 2014:aan verrattuna. Työskentely oli paremmalla menetelmällä keskimäärin nopeampaa ja tuotetut CAD-mallit olivat käyttökelpoisempia ja laadukkaampia. Lisäksi paremmalla menetelmällä työskennellessä tuli vähemmän virheaikaa ja työskentely CAD-ympäristössä oli luontevaa. Koska varsinainen CAD-malli luotiin vasta SolidWorks:in omassa mallinnusympäristössä, mallit olivat heti rakennepuullisia ja sen geometria oli helposti muokattavissa tarpeen mukaan.

Opinnäytetyön alussa määriteltiin tutkimuskysymys: *“Mikä on paras tapa tuottaa parametrinen solidimalli skannausdatasta ProSolve Oy:stä löytyvillä työkaluilla ja onko se riittävän laadukas?”* Tähän pulmaan saatiin lähes täydellinen vastaus. Paras työkalu työn tekemiseen löytyi ja sen tuottamat mallit ovat natiivisti piirrepohjaisia solidimalleja. Työn laatu riippuu eniten käyttäjästä

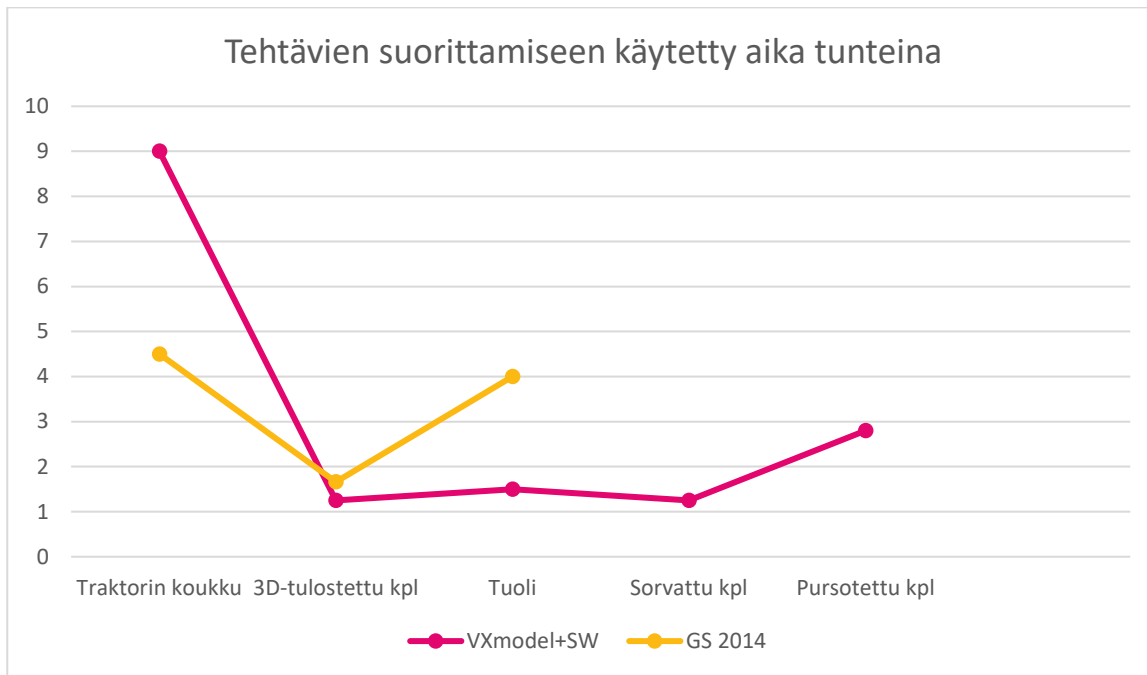
itsestään, kuinka huolellisesti työ tehdään. Työn laatua määrittävät paljon samat seikat kuin muusakin CAD-mallintamisessa. Skannausdatan geometrinen tarkkuus ja resoluutio jättävät hieman parantamisen varaa, eikä kaikkein pienimpiä yksityiskohtia saada laadukkaasti digitoitua. Tämä korostui erityisesti sorvattun kappaleen skannauksessa (ks. kuvio 18).

PISTEYTYSMATRIISI MUUNTAMISTYÖN VERTAILUUN					
Tyyppi	Skannattu kappale	Arvioitava aspekti	Painotus	Geomagic 2014	Vxmodel+SW
Tehtävät	Tuoli	Solidimallin teko onnistuu	100,00 %	1	1
		Malli voidaan mitoittaa CAD-ohjelmassa	100,00 %	1	1
		Käytetty aika	100,00 %	0	1
		Työvaiheiden määrä	50,00 %	0	1
	Sorvattu kappale	Solidimallin teko onnistuu	100,00 %	0	1
		Malli voidaan mitoittaa CAD-ohjelmassa	100,00 %	0	1
		Käytetty aika	100,00 %	0	1
		Työvaiheiden määrä	50,00 %	0	1
	Pursotettu kappale	Solidimallin teko onnistuu	100,00 %	0	1
		Malli voidaan mitoittaa CAD-ohjelmassa	100,00 %	0	1
		Käytetty aika	100,00 %	0	1
		Työvaiheiden määrä	50,00 %	0	1
	3D-tuloste	Solidimallin teko onnistuu	100,00 %	1	1
		Malli voidaan mitoittaa CAD-ohjelmassa	100,00 %	1	1
		Käytetty aika	100,00 %	0	1
		Työvaiheiden määrä	50,00 %	0	1
		Mallin vastaavuus fyysiseen kappaleeseen	100,00 %	1	0
	Traktorin nostokoukku	Solidimallin teko onnistuu	100,00 %	1	1
		Malli voidaan mitoittaa CAD-ohjelmassa	100,00 %	0	1
		Käytetty aika	100,00 %	1	0
Työvaiheiden määrä		50,00 %	0	1	
Mallin vastaavuus fyysiseen kappaleeseen		100,00 %	1	0	
Yleiset		Yhteensopivuus ulkopuoliseen dataan	50,00 %	1	0
		Ohjelmiston käyttöliittymä	50,00 %	1	1
		Ohjelmiston ominaisuudet	50,00 %	1	0
				Lopulliset pisteet	Lopulliset pisteet
				9,5	17

Kuvio 34. Käyttäjätestauksen lopulliset tulokset

Työvaiheet menetelmän mukaan			
Menetelmä	VX+SW	GMS 2014	
# työvaihe	2	Siivous	Siivous
	3	Poikkileikkausten teko	Korjaaminen
	4	Piirteiden etsintä	Alueiden tunnistus
	5	Piirteiden vienti	Tee käyrät
	6	Mallinnus	Tee pinnat
	7		Tee reunat
	8		trim & stitch
	9		Vie STEP
	10		Feature recognition

Kuvio 35. Työvaiheiden määrä menetelmän mukaan



Taulukko 1. Tehtävien suorittamiseen käytetty aika.

Geomagic Studio 2014	VXmodel
All (*)	Meshes files (*.csf, *.stl, *.obj)
All (*)	Meshes files (*.csf, *.stl, *.obj)
Wrap (*.wrp)	
3D Studio (*.3ds)	
3D Systems (*.slc)	
Breuckmann (*.bre)	
CogniTens (*.xyzn)	
Cyclone (*.ptx)	
Digibotics (*.dbt)	
Dimensional Photonics (*.dpi)	
Dr. PICZA (*.pix)	
DXF (*.dxf)	
Genex (*.gti)	
Geomagic Point Data (*.gpd)	
GOM (*.g3d)	
GOM (*.surf)	
Hymarc (*.hym)	
ICV (*.icv)	
IGES (*.igs; *.iges)	
InSpeck (*.net)	
Kreon (*.cwk)	
LDI / Datasculpt (*.scn)	
LDI / Normals (*.pcn)	
LightWave (*.lw; *.lwo)	
MantisVision (*.mpc; *.toc)	
Meta GPD (*.mgp)	
Metron (*.met)	
Metron (*.mtn)	
Nastran (*.nas)	
Neutral (*.neu)	
Nikon Metrology (*.sab; *.sab2)	
Optimex (*.opt)	
Optinet Point Data (*.opd)	
Opton (*.xyz)	
Parasolid (*.x_b; *.x_t)	
Percepton (*.bin)	
PLY (*.ply)	
Pro/E PART (*.prt; *.prt.[0-9]*)	
Pulsetech (*.cop)	
SAT (*.sat)	
Scantech (*.stb)	
ScanWorks Light (*.swl)	
ShapeGrabber (*.3pi)	
Steinbichler (*.ac)	
STEP (*.stp; *.step)	
STL (*.stl)	
Surphaser (*.btx)	
VDA (*.vda)	
Vertex Files (*.vbx; *.asc)	
Vialux (*.pct)	
Vivid (*.vvd)	
VRML (*.wrl)	
Nikon Metrology (*.sab; *.sab2)	
Wavefront (*.obj)	
	CAD files (*.iges; *.igs; *.step; *.st)
	CAD files (*.iges; *.igs; *.step; *.st)
	IGES (*.iges; *.igs)
	STEP (*.step; *.stp)
	All Files (*.*)

Kuvio 36. Vertailtujen ohjelmien tiedostojen tuontiformaatit

6.2 Muut havainnot

Vertailussa toiseksi jääneellä Geomagic Studio 2014:lla oli myös joitain hyviä ominaisuuksia, joita voidaan hyödyntää jatkossa takaisinmallinnustöissä. Esimerkiksi sen polygonimallin muokkaustyökalut olivat ylivoimaisia VXmodelin versioon 6.2 SR2 verrattuna, joka oli työn toteutushetkellä käytössä. Sillä myös pystyy muokkaamaan NURBS-verkkoja manuaalisesti, kun VXmodelilla NURBS-pintoja voidaan muodostaa vain automaattisesti. Joissain tapauksissa nämä työkalut voivat leikata monimutkaisten kappaleiden mallinnusaikaa huomattavasti, esimerkiksi traktorin nostokoukun tapauksessa (ks. taulukko 1).

6.3 Työohje

Kun käyttäjätetit saatiin valmiiksi, ja työn tulokset oli analysoitu, laadittiin parhaalle työkululle käytännön toteutuksessa saadun aineiston perusteella työohje, jotta työn tuloksia saadaan hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti jatkossa. Työohje löytyy kokonaan opinnäytetyön liitteestä 1.

7 Pohdinta

7.1 Tavoitteet, tulokset ja haasteet niiden välissä

Idea opinnäytetyöhön tuli käytännön tarpeesta työelämässä. Yrityksessä oli työkalut ja puitteet 3D-skannausten muuntamiseen piirrepohjaiseksi CAD-malliksi, mutta hiljainen tieto aiheeseen liittyen ei ollut välittynyt entisen työntekijän vaihtaessa työpaikkaa ja ProSolve Oy:n sisäistä ohjeistusta aiheesta ei ollut olemassa. Tämä osaaminen täytyi hankkia siis itse. Tämä määriteltiin myös opinnäytetyön tavoitteeksi ja sitä täydennettiin työohjeen teolla varmistamaan, että saatu tieto välittyy eteenpäin. Tavoitteena oli löytää paras työkulku 3D-skannauksen muuntamiseen piirrepohjaiseksi solidimalliksi ja varmistamaan menetelmän laadukkuus.

Työssä vertailtiin kahta eri menetelmää saman lopputuloksen saavuttamiseksi. Vertailu suoritettiin käyttäjätesteinä, jota varten laadittiin sarja skannaus- ja takaisinmallinnustehtäviä. Tämä haastoi mieltämään, mikä takaisinmallinnustyössä on merkityksellistä ja minkälaiset kappaleet havainnollistavat parhaiten ohjelmien toiminnallisuutta. Työn tuloksena saatiin tietoa siitä, että paras menetelmä muuntaa skannausdataa on käyttää 3D-skannerin oman skannausohjelmiston

VXelements:in VXmodel-laajennusta yhdessä SolidWorksin kanssa siten, että VXmodelista tuodaan piirteitä SolidWorksiin, joiden pohjalta luodaan täysin uusi CAD-malli. Menetelmä varmistaa sen, että pystytään keskittymään muuntamistyön perimmäiseen tarkoitukseen luoda yksiselitteinen, toiminnallinen sekä joustava 3D-malli tuotteen valmistamiseen tai osaksi muuta tuotetietoa. Tuotettujen mallien laadullisuus on hankalampi asia selvittää. Laatu on varmasti riittävä vastaamaan suureen osaan työmenetelmän käyttötärpeistä, varsinkin kun muistetaan takaisinmallinnustyön luonne, jossa tärkeintä ei ole geometrisesti tarkat mallit, vaan yhtenevä toiminnallisuus alkuperäisen tuotteen kanssa. Pelkästään opinnäytetyön tuloksien perusteella ei pysty etukäteen sanomaan, täyttääkö jokin menetelmällä tehty malli laatuvaatimukset, koska se riippuu mallinnettavan tuotteen käyttötarkoituksesta ja valmistusmenetelmistä.

Pääasiassa Geomagic Studio 2014 -menetelmän huono suoriutuminen käyttäjätestauksen tehtävistä voidaan selittää skannausdatan laadulla. Koska menetelmä nojaa skannausdatasta luodun polygonimallin geometriaan, on ensinnäkin korjattava ja jalostettava epätäydelliset polygonimallit käyttöä varten. Tämä vie huomattavasti aikaa, jos skannausdatassa on paljon virheitä. Toisekseen, kun malli on valmis parametrusten piirteiden luontia varten, tuotetut piirteet saattavat epäonnistua, koska ne yrittävät jäljitellä karkean polygonimallin pintaa. Näiden ongelmien selvittämiseen menee myös aikaa ja vie huomiota pois muusta mallin hienosäätämisestä. VXmodel + SW-menetelmällä kaikki tämä voitiin sivuuttaa, koska skannausdatasta luotuja piirteitä käytettiin vain referenssinä mallintamisessa.

Ehdottomasti suurin haaste oli työn käytännön toteutuksen hidastuminen useaan otteeseen. Toukokuussa käytännön toteutuksen alkaessa VXelements-ohjelman lisenssienhallinta ilmoitti, että VXmodel-laajennuksen lisenssitiedosto on väärä tai ohjelmisto ei osannut lukea sitä. Ongelman ratkaisu vaati apua Creaformin asiakastuelta. Tämä söi kriittisiä työpäiviä alkuperäisen työn valmistusajankohdan lähestyessä ja aikataulua päätettiin muuttaa. Toisen kerran ohjelmiston ongelmia selviteltiin kesäkuun alussa, kun lisenssiä yritettiin siirtää tietokoneelta toiselle, jossa oli SolidWorks-ohjelma asennettuna. Ongelmat johtuivat Creaformin servereiden ja asiakkaan päädyn välisistä ongelmista. Tämänkin selvittämiseen tarvittiin apua asiakastuelta. Alkuperäinen aikataulu koko opinnäytetyölle oli vuoden 2022 helmikuu-toukokuu, mutta sen valmistuminen venyi marraskuun lopulle käytännön toteutuksen oltua kesän tauolla.

7.2 Luotettavuus ja eettisyys

7.2.1 Tulosten luotettavuus

Suurin kysymys tulosten luotettavuudesta on se, että Geomagic Studio 2014 -ohjelman *parametric exchange* -toiminto ei toiminut käyttäjätestin aikana. Tämä toiminto olisi ollut keskeinen työn aikana, mutta sen käyttö olisi vaatinut kaikki käyttäjätestissä GM:lla tehdyt toiminnot ennen sen käyttöä, eli esimerkiksi työaika olisi vain lisääntynyt. Toisaalta mallien joustavuus ja parametrisuus tällä menetelmällä olisi parantunut.

Työn aikana ilmoille nousi kysymys siitä, vaikuttaako käyttäjän edeltävä kokemus tietyn ohjelman käytössä tuloksiin. Näin aivan varmasti on, mutta tässä kontekstissa, insinööritoimistossa, käyttäjällä on todennäköisesti edeltävää kokemusta CAD-ohjelmistoista, mutta ei välttämättä skannausdatan käsittelyohjelmistoista. Käyttäjätestauksen tuloksien perusteella CAD-ohjelmistoon nojaava menetelmä oli parempi ja nopeampi. Siitä voidaan päätellä, että kaikki kokemus CAD-ohjelmiston käytöstä vain lisää paremman menetelmän etumatkaa huonompaan vertailtuun menetelmään, eikä muuta työn lopputulosta. Tilanne olisi toinen, jos oletettu käyttäjäprofiili olisi erilainen, mutta se ei ollut opinnäytetyön aiheen rajoissa.

Kerätyn aineiston arvioinnissa olisi voinut käyttää enemmän vertailuaspekteja, jotta vertailtavien ohjelmien vahvuudet olisivat tulleet paremmin esiin tuloksissa. Nämä tietyt vahvuudet huomattiin vasta käyttäjätestauksen aikana, eikä alkuperäistä tehtävälistaa haluttu muuttaa, koska se olisi voinut vääristää tuloksia. Kuitenkin kyseessä on vain kahden eri takaisinmallinnusmenetelmän vertailu ja niiden paremmuusjärjestys oli ilmiselvä, joten saadun aineiston valossa ja omakohtaisen kokemuksen kautta pidän työn tulosta luotettavana.

7.2.2 Hyvä tieteellinen käytäntö

Työn aikana perehdyttiin hyvään tieteelliseen käytäntöön (HTK). Tutkimuksessa noudatettiin rehellisyyttä ja huolellisuutta. Lainatuista lähteistä ja kuvista laadittiin lähdeluettelo. Tutkimuksen tuloksia ei muunneltu tai sepitetty, koska se haittaisi tutkijaa itseään ja toimeksiantajatahoa. Työn käytännön toteutuksen aineiston keruu olisi pitänyt suunnitella paremmin, mutta saatu aineisto on silti selkeää ja käyttökelpoista.

7.2.3 Tietoperustan lähteet

Työssä käytettiin joitain lähteitä, jotka on julkaistu eräissä intialaisissa tiedejulkaisuissa. Osa julkaisuista mainostaa olevansa esimerkiksi ”UGC approved” (University Grants Commission), mutta tämän väittämän oikeellisuutta ei voi tarkistaa, koska UGC Approved List of Journals -sivu on huollolla, ainakin vielä 6.3.2022. Näitä lähteitä käytettiin varauksella, poimien yleisempää tietoperustaa työhön ja välttämällä tutkimusten tulosten siteeraamista, koska ei voida olla varmoja tutkimusten vertaisarvioinnin laadusta.

Olisin halunnut käyttää enemmän varsinaisia teoksia ja tutkimuksia tietoperustan lähteenä, mutta aiheen käytännölläisyyden ja spesifin luonteen takia käytin paljon internetlähteitä ja artikkeleita. Olen varma, että näistä saatu tieto on kuitenkin ajankohtaista ja laadukasta. Varoin käyttämästä liikaa markkinointiin tarkoitettua materiaalia, pois lukien teknistä tietoa koskevat laitteiden tai ohjelmistojen tarjoajien sivut.

7.3 Tulosten tarkastelu suhteessa teoreettiseen viitekehukseen

Puhakan (2008 61–74) selitys NURBS-käyristä ja -pinnoista auttaa ymmärtämään yhtenä vertailun kohteena olleen ohjelmiston, Geomagic Studio 2014, freeform-työkalujen toimintaperiaatteita. Ne tuntemalla pystyy skannausdatan valmistelemaan tehokkaammin sellaiseksi, että NURBS-pinnat syntyvät ilman komplikaatioita ja tarpeeksi hyvälaatuisiksi. Lisäksi Geomagic hyödyntää CAD-mallin pintojen approksimointiin polygonimallia, joista Puhakka (2008, 49–52) myös kertoo. Toinen, VXmodeliin ja SolidWorksiin perustuva menetelmä jättää lopullisen mallin mitoittamisen täysin mallintajan käsiin, mikä tekee menetelmästä suoraviivaisemman ja joustavamman. Wangin (2010) teos avaa olennaista takaisinmallinnuksen teoriaa ja toi minulle oivalluksen siitä, mitä takaisinmallinnuksella haetaan. Kun tuloksena saatuja malleja vertailee, on ilmeistä, kumman menetelmän tuottamat mallit ovat tarkoituksenmukaisia.

7.4 Johtopäätökset ja kehittämissuhteet

Työn tuloksena saatu tieto ja työohje tulevat tarpeeseen ja niiden avulla pystytään edelleen kehittämään ProSolve Oy:n 3D-skannauspalvelua. Olen työn tuloksiin tyytyväinen.

Opinnäytetyön jatkona Geomagic Studion parametric exchange-toiminto täytyy saada toimimaan ja testata, toisiko se mitään lisäarvoa työnkulkulle. Lisäksi voitaisiin tutkia muiden täydentävien mitausmenetelmien, kuten koordinaattimitauskoneen datan tuontia osaksi työnkulkua. Menetelmiä

voisi myös vertailla lisää kappaleilla, joissa on vapaamuotoisia pintoja, koska se toi vertailun hävinneen menetelmän vahvuudet esiin.

Yrityksen 3D-skannauskaluston tekniikan ikä lähentelee kymmentä vuotta, ja alalla on tapahtunut paljon kehitystä. Jos tätä palvelua halutaan tehostaa, kehittämissuunnitelmissa ottaisiin harkintaan uuden, suurempiresoluutioisen skannerin hankinnan, jotta pienet yksityiskohdat olisivat skannausdatassa parempia. Vanhaa skanneria voidaan käyttää sen rinnalla suurempien kappaleiden skannaamiseen. Tähän voisi yhdistää Creaformin customer care planin uusimisen ja VXelements -ohjelmiston uusimman version tilaamisen. Nykyinen ohjelmiston versio on vuodelta 2018. Uusimmassa ohjelmiston versiossa on joitain merkittäviä parannuksia VXmodel-laajennuksen ominaisuuksiin, esimerkiksi manuaalinen vapaamuotoisen pinnan luonti. Nykyisellään vapaamuotoisia pintoja voi tehdä VXmodelin sisässä vain automaattisesti luomalla, eikä se toimi riittävän hyvin, jos skannausdata on huonolaatuista. Toisaalta myös 3D Systemsin tuoreempaan Geomagic Design X:ään voisi tutustua.

Lähteet

3D scanning technologies and the 3D scanning process. 2021. Artikkel. aniwaa. Viitattu 8.11.2022. <https://www.aniwaa.com/guide/3d-scanners/3d-scanning-technologies-and-the-3d-scanning-process/>

Bernier, S., Reinhard, T. & Lyut, B. 2015. Make: Design for 3D Printing. 3. p. San Francisco: Maker Media.

CadWorks. n.d. Mallinnusohjeita 3D-mallintajalle. PP-esitys. CADworks Oy. Diaesitys saatu sähköpostin liitteenä opinnäytetyön ohjaajalta. Viitattu 25.11.2022.

Cherdo, L. 2022. 3D scanner accuracy and resolution: The basics. Artikkel. aniwaa. Viitattu 5.4.2022. <https://www.aniwaa.com/insight/3d-scanners/3d-scanner-accuracy-resolution-basics/>.

<https://www.artec3d.com/learning-center/what-are-3d-scanners-used-for>

Chougule V., Gosavi H., Dharwadkar M. & Gaiind A. 2018. Review of Different 3D Scanners and Scanning Techniques. 7th National conference on Recent Developments in Mechanical Engineering RDME-2018. IOSR Journal of Engineering. Viitattu 6.3.2022. <http://iosrjen.org/Papers/RDME-2018/Volume-2/8.%2041-44.pdf>.

Edl M., Mizerak, M. & Trojan, J. 2018. 3D LASER SCANNERS: HISTORY AND APPLICATIONS. Verkkojulkaisu. Acta Simulatio. Volume 4, 2018, Issue 4, s. 1–5. Viitattu 6.3.2022. https://actasimulatio.eu/issues/2018/IV_2018_01_Edl_Mizerak_Trojan.pdf.

First Generation Handyscan 3D / Zscanner 700. N.d. Valmistajan tietosivu legacy-tuotteelle. Nettisivu. Creaform. Viitattu 16.5.2022. <https://www.creaform3d.com/en/customer-support/legacy-products/first-generation-handyscan-3d-zscanner-700>.

Go!SCAN 3D G2 SCANNER. N.d. Valmistajan tietosivu legacy-tuotteelle. Nettisivu. Creaform. Viitattu 22.2.2022. <https://www.creaform3d.com/en/handyscan-3d-g2-scanner>.

Go!SCAN 3D: Technical specifications. N.d. Valmistajan tietosivu Go!SCAN 3D-linjan tuotteille. Nettisivu. Creaform. Viitattu 5.4.2022. <https://www.creaform3d.com/en/handheld-portable-3d-scanner-goscan-3d/technical-specifications>.

HandySCAN 3D | BLACK Series: Technical specifications. N.d. Valmistajan tietosivu HandySCAN 3D-linjan tuotteille. Nettisivu. Creaform. Viitattu 16.5.2022. <https://www.creaform3d.com/en/portable-3d-scanner-handyscan-3d/technical-specifications>.

Historia. N.d. Yrityksen historia. Nettisivu. ProSolve Oy. Viitattu 22.4.2022. <https://www.prosolve.fi/yhteystiedot/prosolve/historia/>

How to Choose the Best 3D Scanner to Use with Your 3D Printer. 2019. Kuvaleike nettisivuston ohjeartikkelista. formlabs.com. Viitattu 10.11.2022. <https://formlabs.com/blog/how-to-choose-a-3d-scanner-for-3d-printing/>

ISO 10360-8:2013. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) — Part 8: CMMs with optical distance sensors. Julk. 12/2013. Tarkastettu 2019. Viitattu 23.11.2022. <https://www.iso.org/standard/54522.html>

Joensuu, J. 2016. 3D-ALAN SANASTO. 3D-grafiikan termit suomeksi. Opinnäytetyö, AMK. Kajaanin ammattikorkeakoulu, tietojenkäsittelyn tutkinto-ohjelma. Viitattu 5.4.2022. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/113462/Joensuu Janne 3D-alan sanasto.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/113462/Joensuu%20Janne%203D-alan%20sanasto.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Laaksonen, T. n.d. 3D-mallinnuksen perusteita: Mallinnusohjeita 3D-mallintajalle. CadWorks Oy. PP-esitys. Diaesitys saatu sähköpostin liitteenä opinnäytetyön ohjaajalta. Viitattu 25.11.2022.

Lundell, J. 2022. Industrial 3D Optical Measurement Techniques. Luento Firpa Flash – 3D skannaus ja mittaus -tapahtumassa. Esitetty 16.3.2022.

Makkonen, S. & Lavikainen, P. 2020. Työohjeet apuna asiantuntijatyössä. Artikkelit. LAB Pro. Viitattu 12.5.2022. <https://www.labopen.fi/lab-pro/tyoohjeet-apuna-asiantuntijatyossa/>

Mesh overview. 2009. Kuva Wikimedia commons -sivustolla. Päivitetty 23.8.2017. By Mesh_overview.jpg: The original uploader was Rchoetzlein at English Wikipedia.derivative work: Lobsterbake (talk) - Mesh_overview.jpg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7021230>.

Puhakka, A. 2008. 3D-grafiikka. Helsinki: Talentum.

Reverse engineer. n.d. Merriam-Webster verkkosanakirja. Viitattu 2.3.2022. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/reverse%20engineer>.

Reverse Engineering 101: Step-by-Step Guide to Creating Parametric CAD from 3D Scan Data. N.d. Ohje/tutoriaali. Polyga. Viitattu 11.4.2022. <https://www.polyga.com/reverse-engineering-101-scan-to-cad/>.

Reverse Engineering Services. N.d. Takaisinmallinnuspalvelun tarjoajan tietosivu tarjoamastaan palvelusta. Holocreators. <https://holocreators.com/reverse-engineering-services/>.

Salmela, J. 2022. Toimitusjohtaja. ProSolve Oy. Haastattelu 23.11.2022.

Vinkkejä ohjetekstin tekijöille. 2019. Kotimaisten kielten keskuksen verkkosivut. Viitattu 12.5.2022. https://www.kotus.fi/ohjeet/hyvan_virkakielen_ohjeita/millaisia_ovat_toimivat_ohjeet_ja_kysymykset/ohjeita_ohjeiden_tekijoille.

Wang, W. 2010. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. Boca Raton, Yhdysvallat. Taylor & Francis Group. Viitattu 11.4.2022. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.jamk.fi:2443/lib/jypoly-ebooks/reader.action?docID=581727>

What are NURBS? N.d. Mallinnusohjelman tietosivu. Nettisivu. Rhinoceros. Viitattu 5.4.2022. <https://www.rhino3d.com/features/nurbs/>.

What are point clouds? 2018. Artikkelisiivulla Tech27.com. Julkaistu 8.2.2022. Viitattu 5.4.2022 <https://tech27.com/resources/point-clouds/>.

Polygon mesh. N.d. Wikipedia-artikkeli. Viitattu 5.4.2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Polygon_mesh.

What is solid modeling? N.d. Sanasto. Viitattu 5.4.2022. <https://www.spatial.com/resources/glossary/what-is-solid-modeling>.

Liitteet

Liite 1. Työohje



24. MARRASKUUTA 2022

3D-SKANNAUSDATAN MUUNTAMINEN
CAD-MALLIKSI
TYÖOHJE

OLLI NIEMETMAA
INSINÖÖRITOIMISTO PROSOLVE OY
Onkapannu 2



1 Alkusanat

Tein tämän työhöjeen osana Jyväskylän ammattikorkeakoulun konetekniikan insinööritutkinnon opinnäytetyötäni, jonka aiheena oli 3D-skannausdatan muuntaminen CAD-malliksi. Opinnäytetyössä vertailtiin yritykseen hankittuja ohjelmistoja ja selvitettiin, mikä on paras työnkulku tämän kaltaiseen tehtävään.

Haluan käyttää tämän tilaisuuden kiittääkseeni työn aikana minua tukeneita ihmisiä! Ensimmäiseksi, haluan kiittää avopuolisonani Emmaa henkisestä tuesta koko opinnäytetyöprosessin ajan. Kiitän veljeäni Mikkoa, joka on kannustanut minua kovasti, ja pitänyt huolta logistiikkapuolestani (auto). Lisäksi kiitän koulutovereitani näistä vuosista ja vertaistuesta haasteita kohdatessa. Kiitän opinnäytetyöohjaajanani toiminutta Lehtori Antti Henelliä.

Lopuksi kiitän toimeksiantajan asemassa toiminutta ProSolve Oy:tä, ja toimitusjohtaja Janne Salmelaa mahdollisuudesta toteuttaa itse ideoimani opinnäytetyö.

Sisällys

Alkusanat.....	1
Tehtävät ennen takaisinmallinnusta	3
Skannausdatan siistiminen	4
Mallin uudelleenasetointi koordinaatistoon	9
Poikkileikkausten tekeminen.....	10
Piirteiden tunnistaminen.....	13
Vapaamuotoisten pintojen luominen	14
Piirteiden vienti CAD-ohjelmaan.....	16
Piirrepohjaisen CAD-mallin tekeminen	18
Tulosten tarkastelu muotovertailun avulla	22
Toteutuneita takaisinmallinnusaikoja esimerkiksi.....	24

2 Tehtävät ennen takaisinmallinnusta

Tämä työohje pätee VXelements-ohjelman versioon 6.2 SR2. Jos versio muuttuu, täytyy ohjeen oikeellisuus tarkistaa ja päivittää.

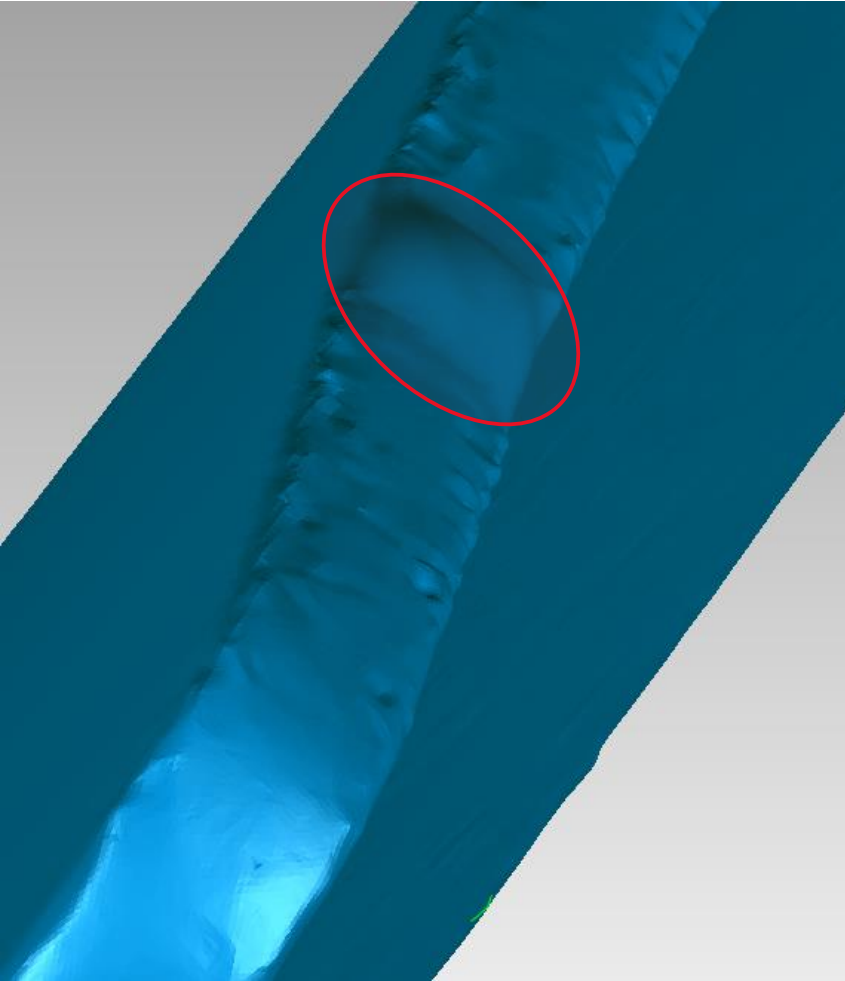
Ennen työn aloittamista sinun täytyy osata käyttää 3D-skanneria ja tuntea VXelements -ohjelman perustoiminnot. Lisäksi sinun täytyy hallita SolidWorks -mallinnusohjelman käyttö.

Kun skannausdataa aletaan muuntamaan CAD-malliksi, selvitä ensin huolellisesti takaisinmallinnuksen tuloksena saatavan mallin käyttötarkoitus. Jos malli tehdään asiakkaalle, ota tämä asia esille projektin aloituspalaverissa. Mallin lopullinen käyttötarkoitus määrittää sen, mitä menetelmää takaisinmallinnuksessa kannattaa käyttää, ja mihin asioihin kannattaa kiinnittää huomiota ja käyttää aikaa työssä. Joissain tapauksissa 3D-skanneri on työntömittaa hitaampi!

Ennen kappaleen 3D-skannaamista valmistele se huolella. Käytä tarpeeksi tähystarroja, mutta vältä niiden asettamista kappaleen reunojen, nurkkien ja kulmien lähelle, koska se aiheuttaa virheitä skannausdatan geometriaan (ks. kuva 1). Kun kappaleessa on tarpeeksi tähyksiä, sen skannaaminen on nopeampaa ja tulokset ovat tarkempia. Jos skannattava kappale on musta, tai kappaleen pinta on heijastava, pinnoita kappale heijastuksia poistavalla valkoisella jauheella, esimerkiksi MR 2000 Anti-Refleks L sumutteella. Kalibroi skanneri skannausolosuhteissa!

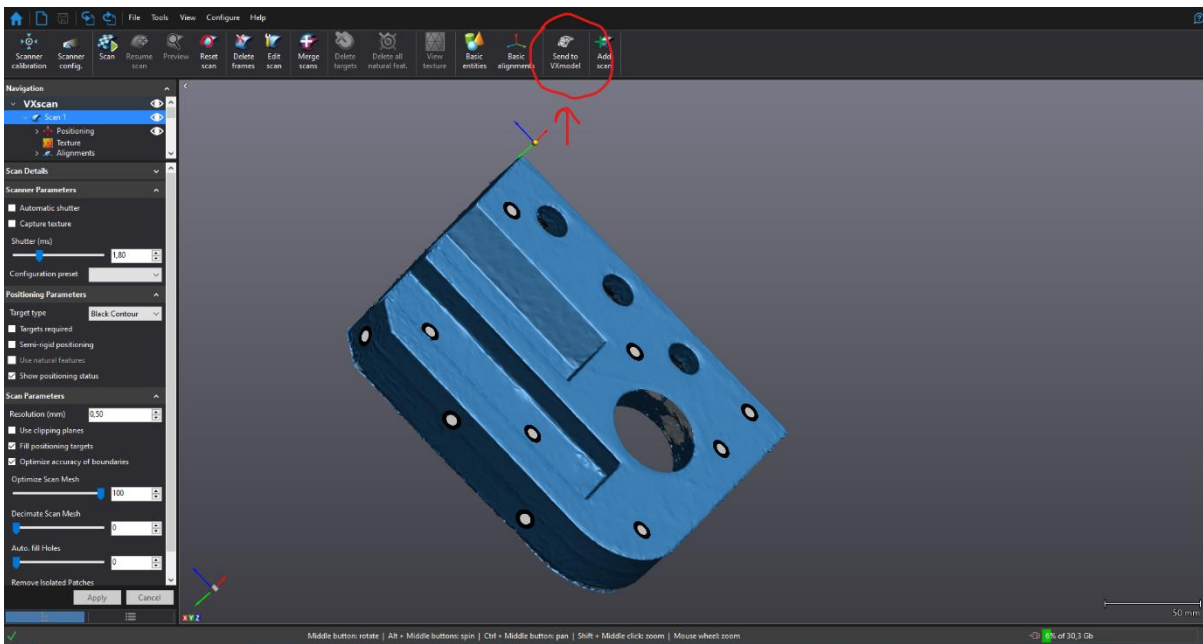
Takaisinmallinnuksessa voit käyttää apuna myös VXelementsin omia kontekstuaalisia ohjeita, jotka tulevat näkyviin, kun painat F1 -näppäintä.

Kuva 1. Tähystarran aiheuttama paukama skannausdatassa



3 Skannausdatan siistiminen

Vie malli VXelements skannausnäköymästä VXmodel-laajennukseen painamalla työkalunauhasta *send to VXmodel* (ks. kuva 2).

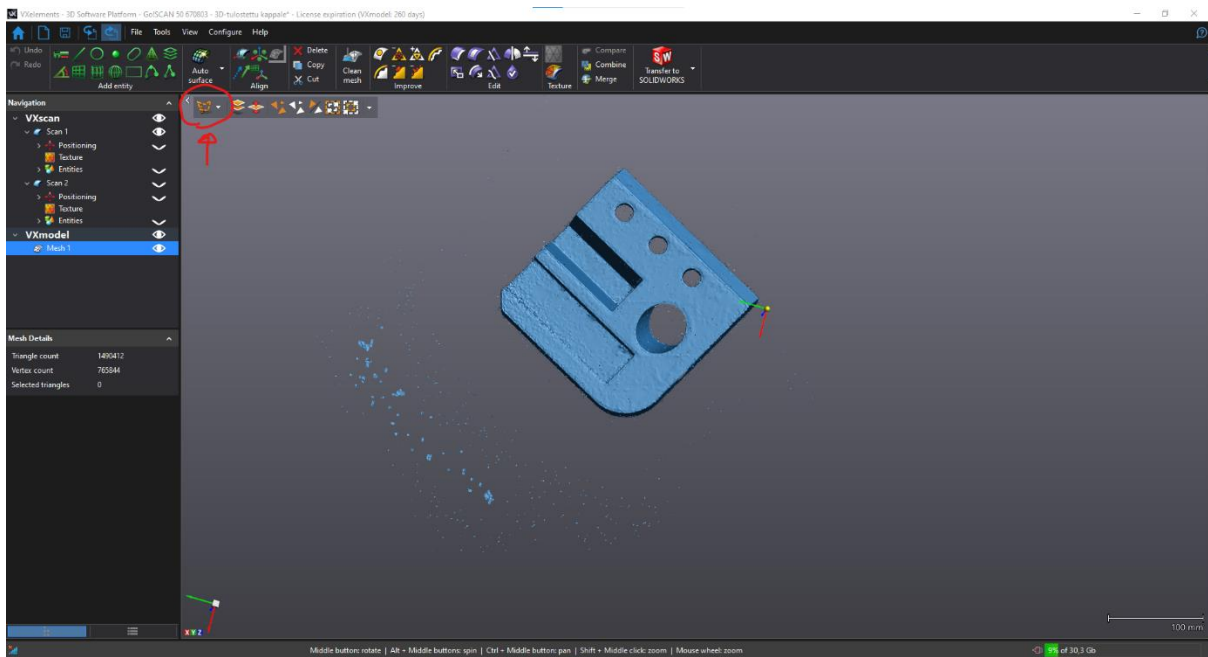


Kuva 2

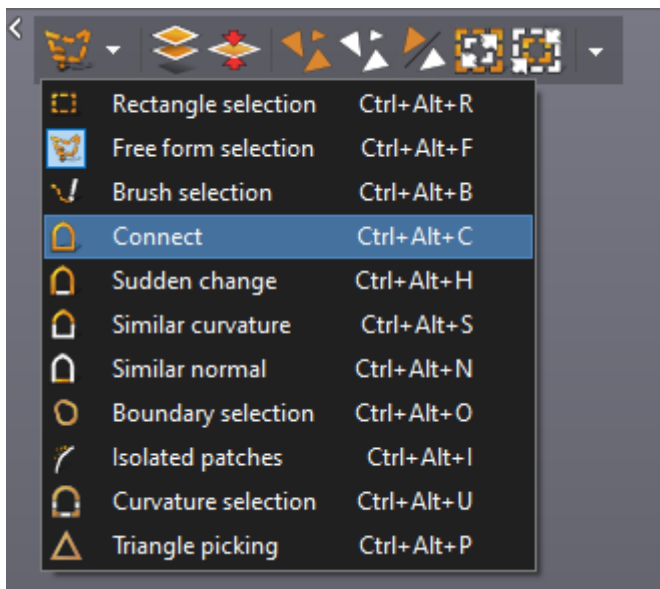
Poista mallista siihen kuulumattomat asiat ja selkeät muotovirheet.

3D-näkymän ikkunan vasemmasta ylänurkasta löytyy alavetovalikko, jossa on erityyppisiä mallin pinnan valintatyökaluja. Valitse alue klikkaamalla pintaa. Valittu pinta muuttuu keltaiseksi. Paina näppäimistöä tai ohjelman valintanauhasta *delete*.

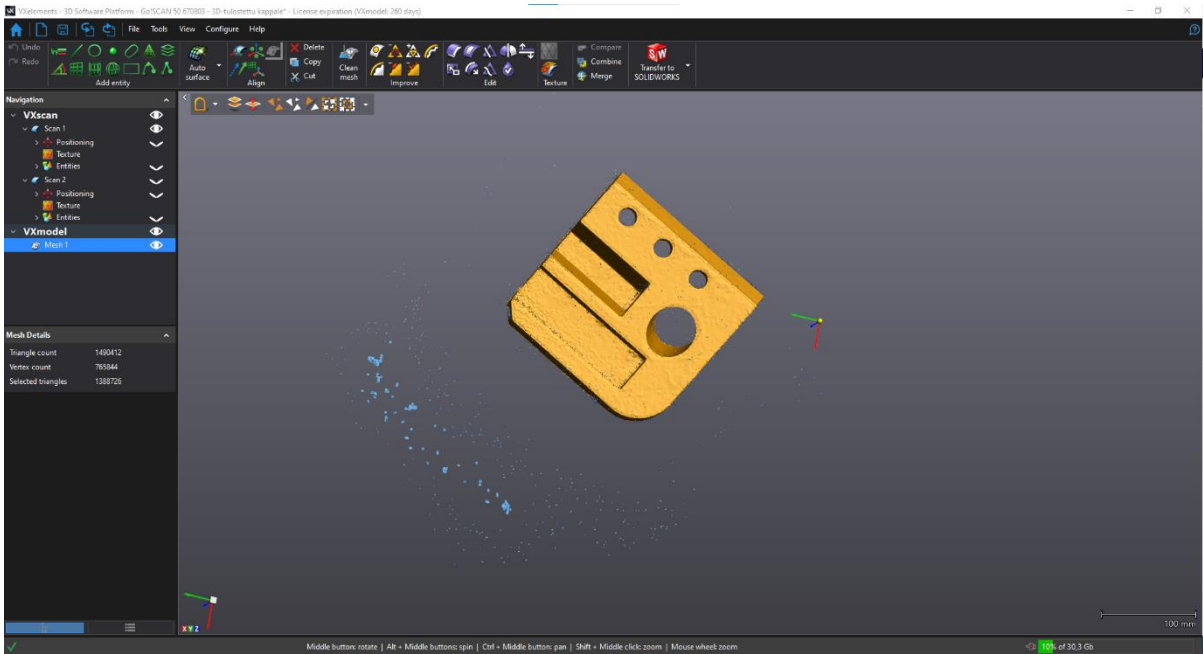
Tässä esimerkissä valittiin säilytettävä pinta *connect*-valintatyökalulla ja vaihdettiin valinta päinvastaiseksi *Inverse selection*-työkalulla (ks. kuvat 3, 4, 5 ja 6).



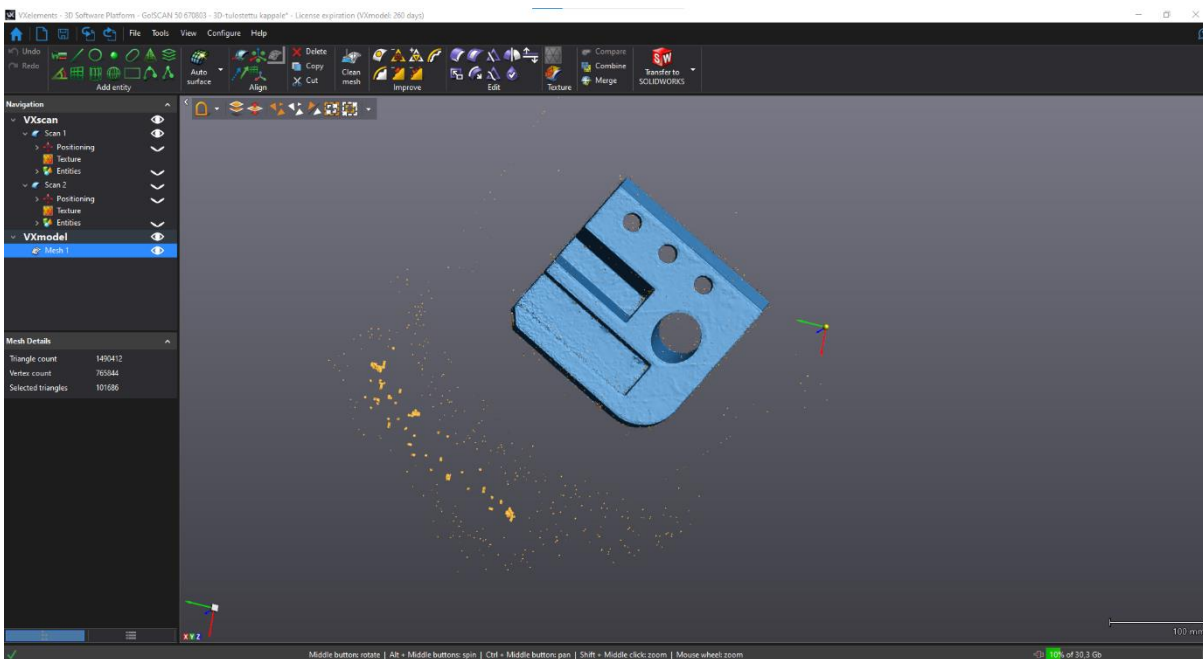
Kuva 3



Kuva 4. Valintatyökalut.

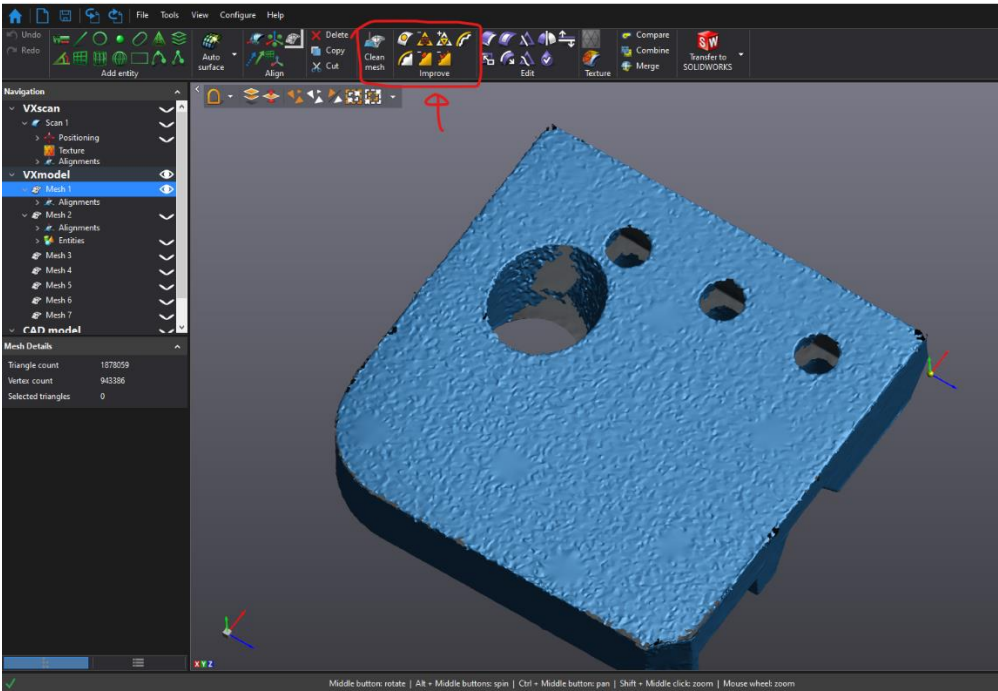


Kuva 5

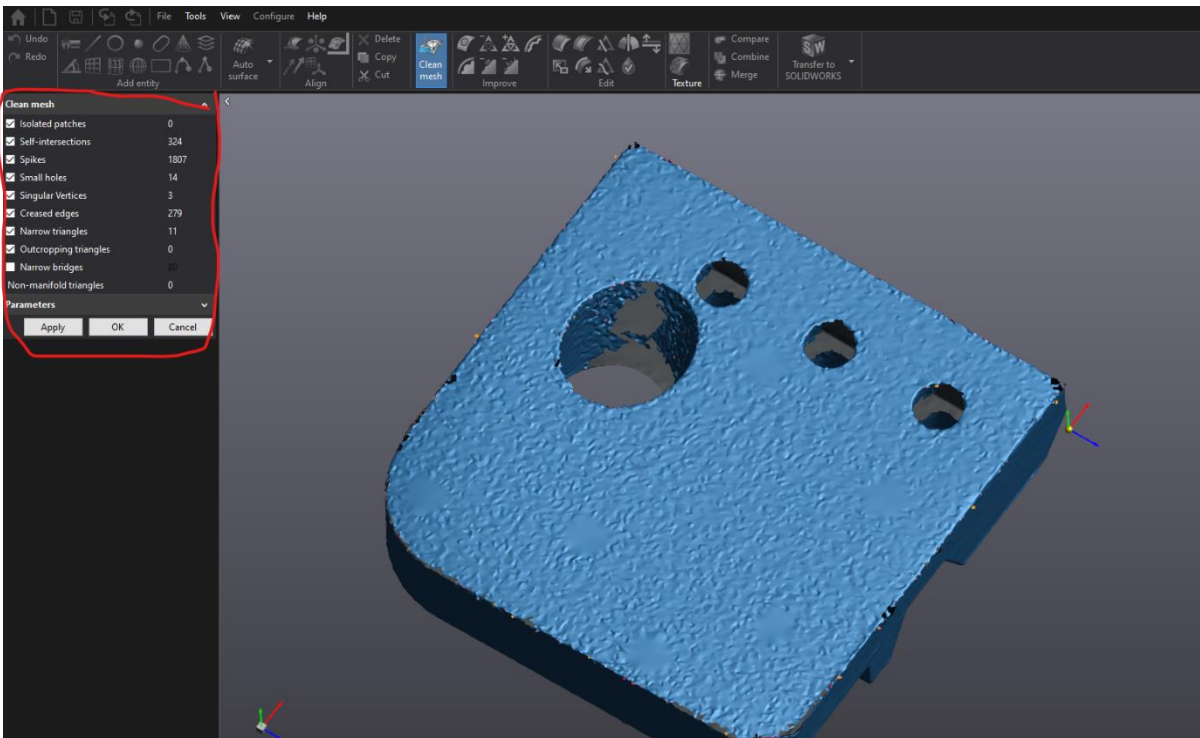


Kuva 6

Tätä seuraavaa vaihetta ei ole välttämätöntä tehdä, jos skannausdatan laatu on riittävä. Optimoimallin polygoniverkko selkeää ja sileäpintaista mallia varten. Poista piikit mallin pinnoista automaattisella *clean mesh*-työkalulla tai manuaalisilla *improve*-työkaluilla (ks. kuvat 7 ja 8).



Kuva 7

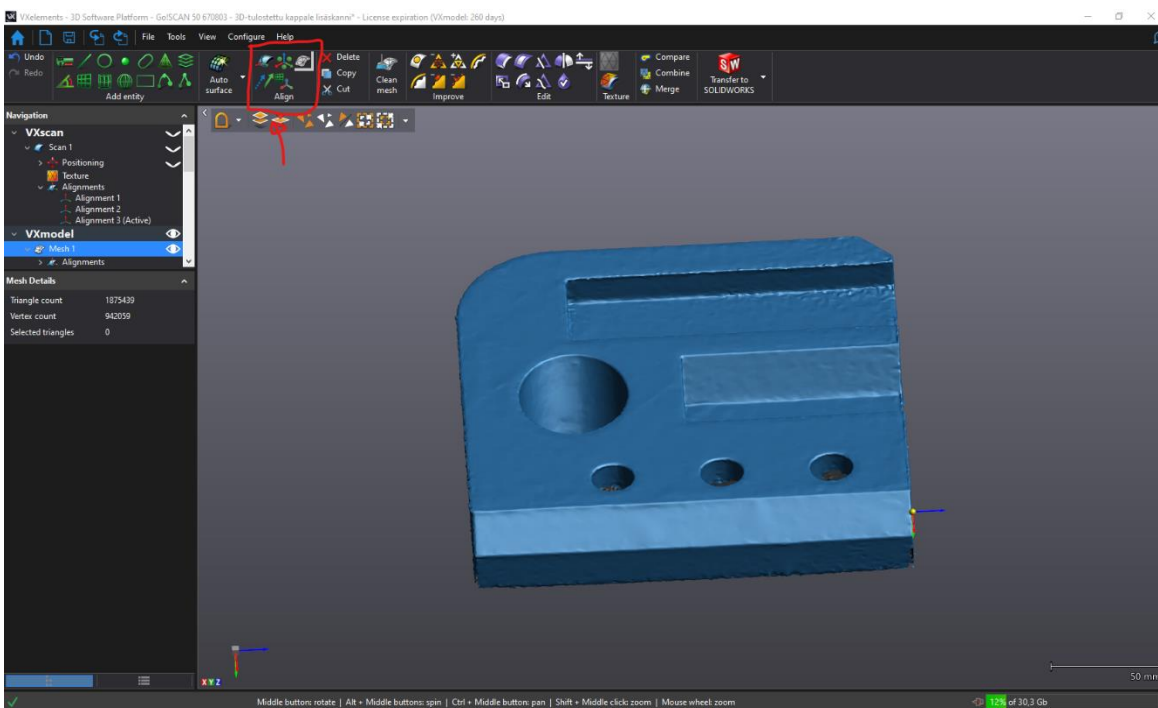


Kuva 8

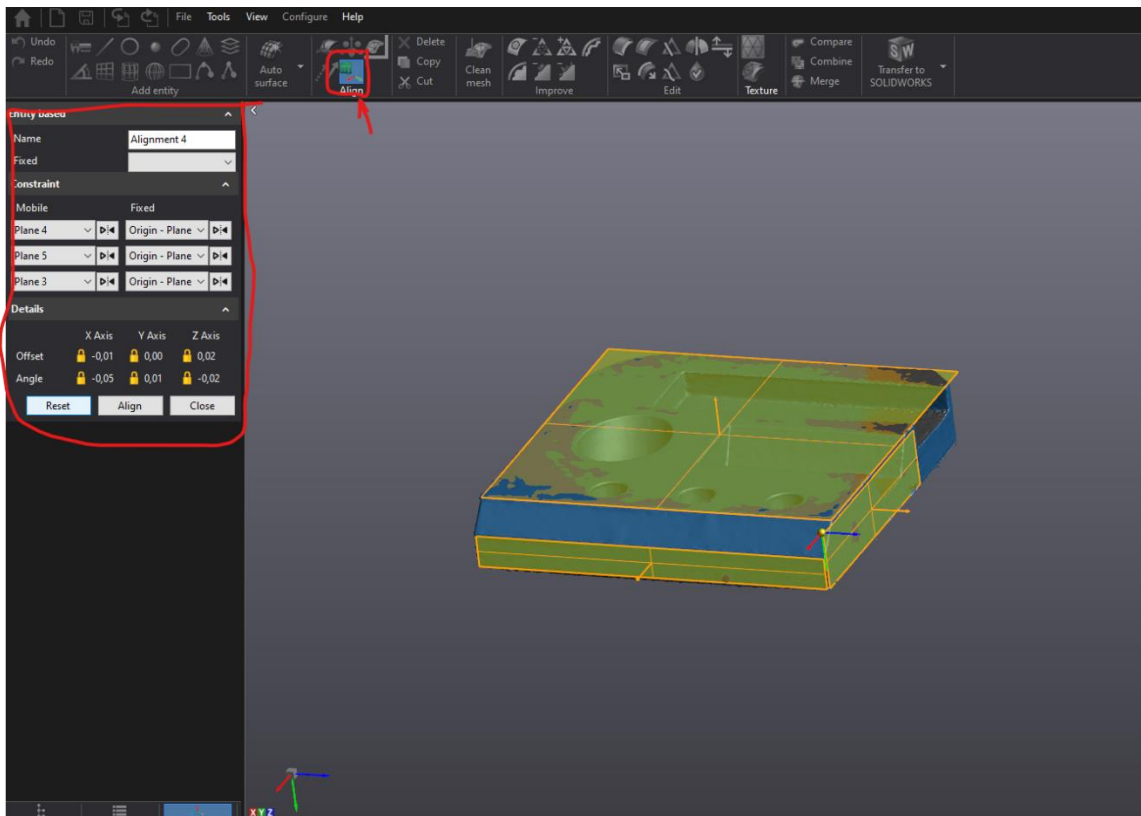
4 Mallin uudelleenasetointi koordinaatistoon

Mallin uudelleenasetointi on tärkeää laadukasta työskentelyä varten. Koordinaatiston avulla luodut piirteet saadaan yhdensuuntaisiksi. Asemointi voidaan tehdä valitsemalla mallista kolme pistettä tai luotujen piirteiden, kuten tasojen perusteella.

Katso työohjeen kohta **6 Piirteiden tunnistaminen**. Tee tasot tai muut piirteet malliin niihin pintoihin, joiden mukaan haluat asemoida mallin koordinaatistoon (ks. kuva 9). Valitse työkalunauhan *align*-välilehdeltä *entity based*-työkalu. Valitse vasemmanpuoleisista alasvetovalikoista tekemäsi tasopiirteet, ja oikeanpuoleisista alasvetovalikoista niitä vastaavat koordinaatiston tasot. Paina *Align* (ks. kuva 10).



Kuva 9

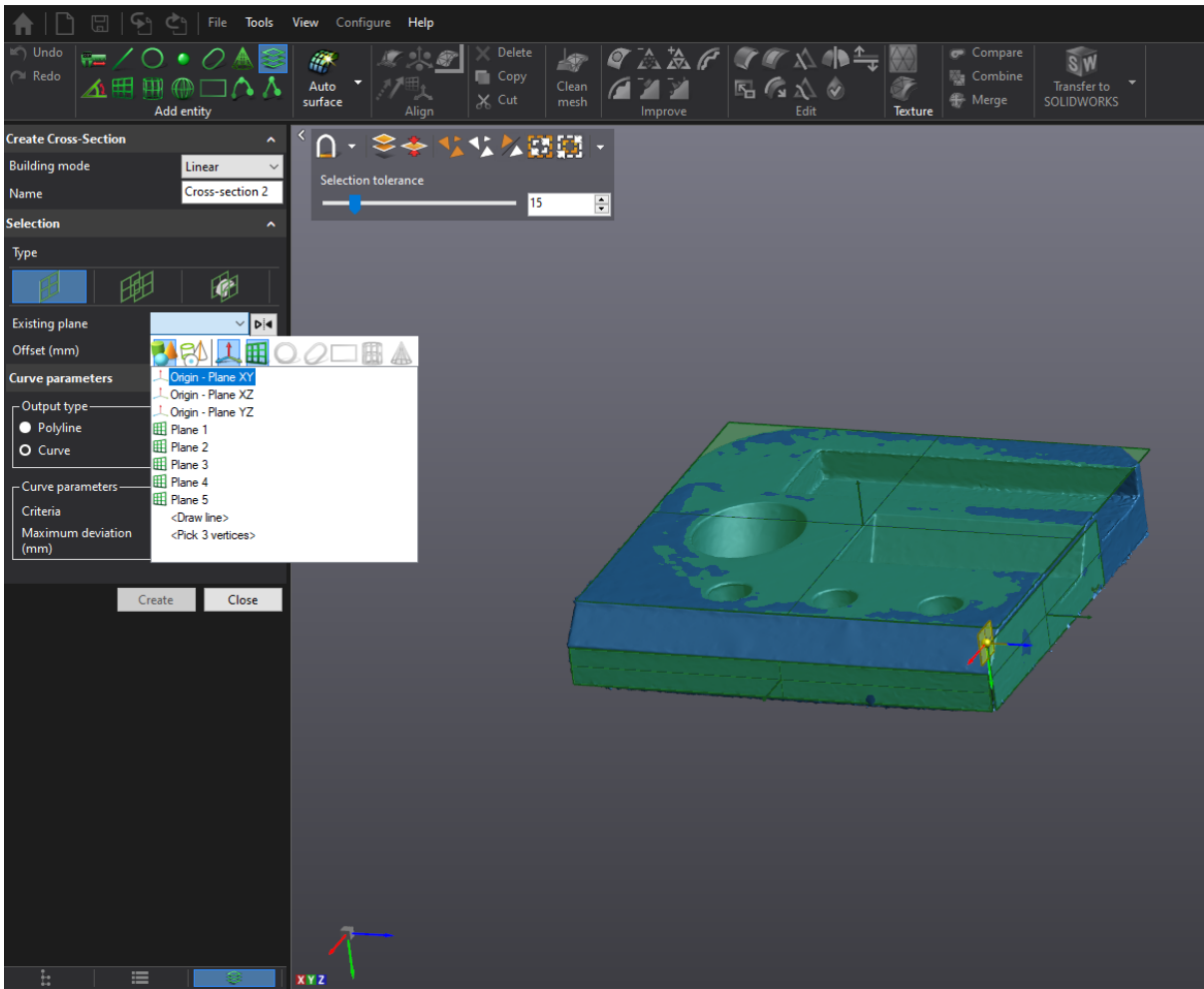


Kuva 10

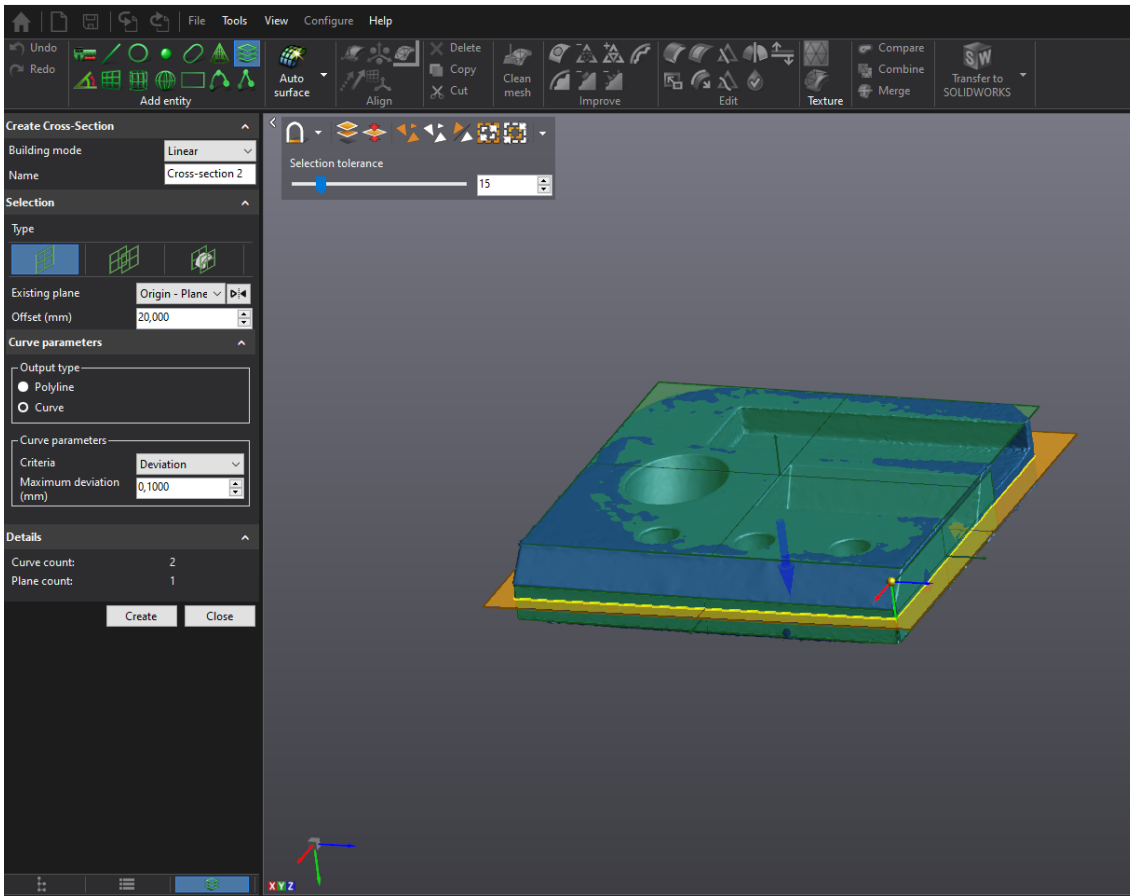
5 Poikkileikkausten tekeminen

Kaavaile karkeasti, miten aiot mallintaa kappaleen CAD-ohjelmassa. Kartoita sen mukaan mitä poikkileikkauksia skannausdatasta pitää tehdä.

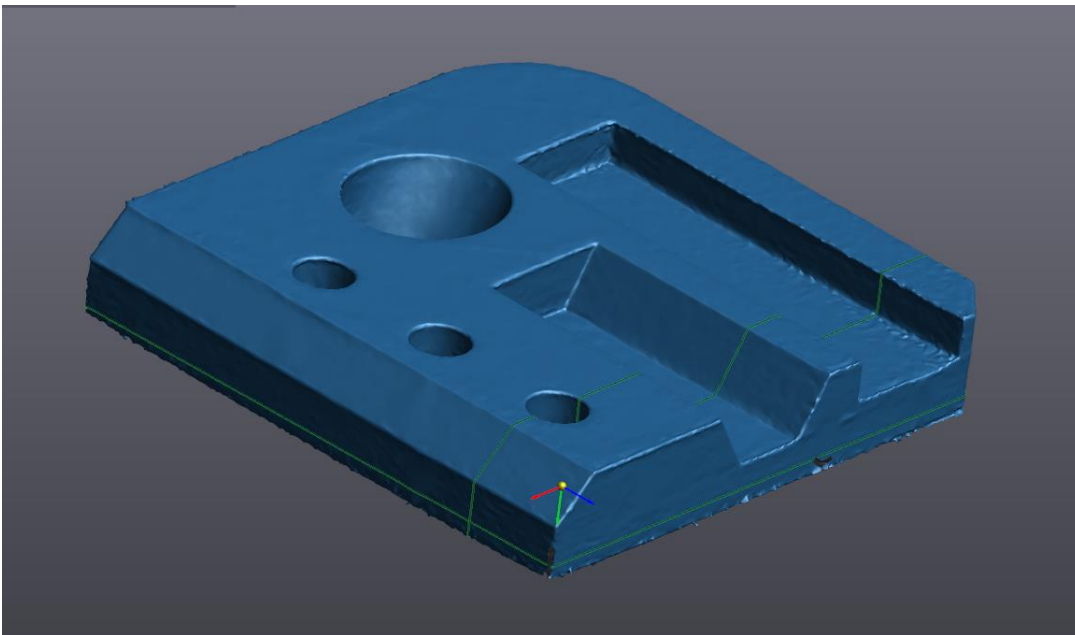
Valitse valintanauhan *Add entity* välilehdeltä *Cross-section*-työkalu. Valitse poikkileikattavat kohdat niin, että pystyt niiden perusteella tekemään CAD-mallin pääsketsit ja muut tarvittavat sketsit. Ohjelma luo poikkileikkauksista käyrätyyppiset piirteet. Ks. kuvat 11, 12 ja 13.



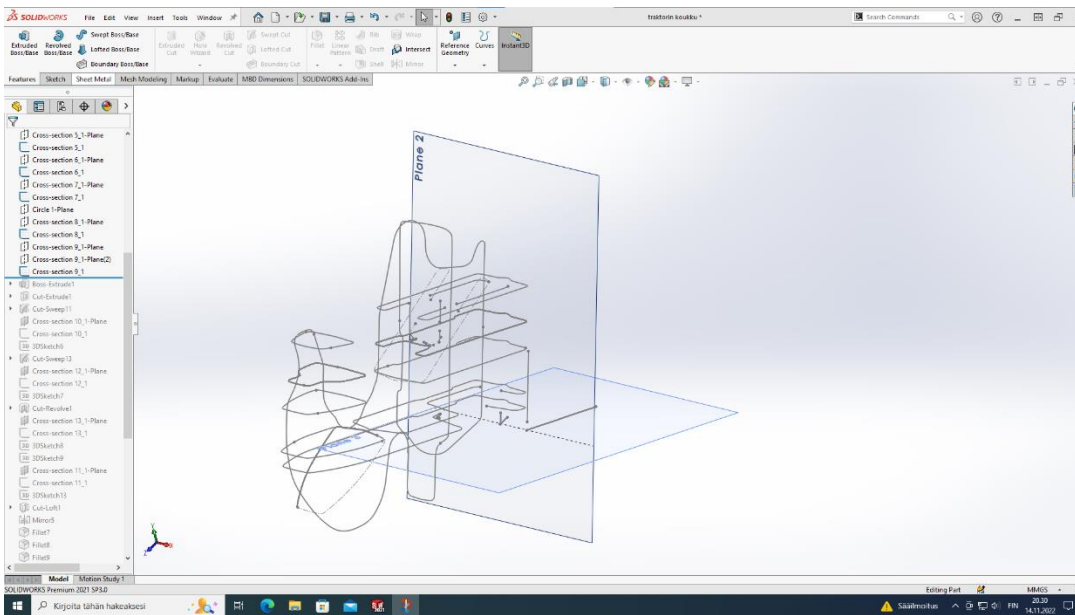
Kuva 11



Kuva 12



Kuva 13 Tässä työssä tarvittiin vain kaksi poikkileikkausta



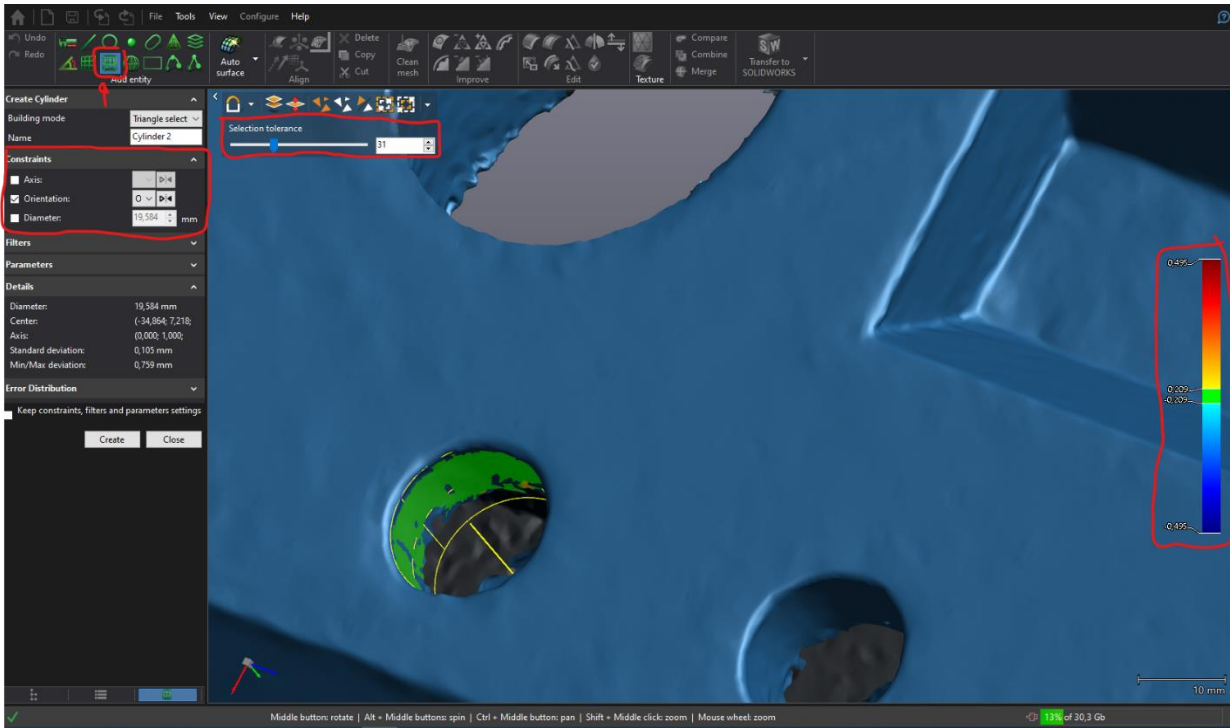
Kuva 14. esimerkki toisesta kappaleesta VXmodelissa tehdyistä poikkileikkaisviivoista (SolidWorks)

6 Piirteiden tunnistaminen

Kaavaile karkeasti, miten aiot mallintaa kappaleen CAD-ohjelmassa. Kartoita sen mukaan mitä piirteitä skannausdatasta pitää tunnistaa.

Valitse valintanauhan *Add entity* -välilehdeltä haluamasi alkeispiirre. Käytä pinnan valintatyökalua valitsemaan referenssipinta, joka mukaan piirre approksimoidaan. Mahdollisimman tarkkaan approksimointiin, valitse kaikki piirteeseen sopiva pinta joko maalaustyökalulla tai kasvattamalla valintatoleranssia. Jos pinnan valintaan tullessa lämpökartassa näkyy huomattavia poikkeamia, poista ne referenssipinnan valinnasta.

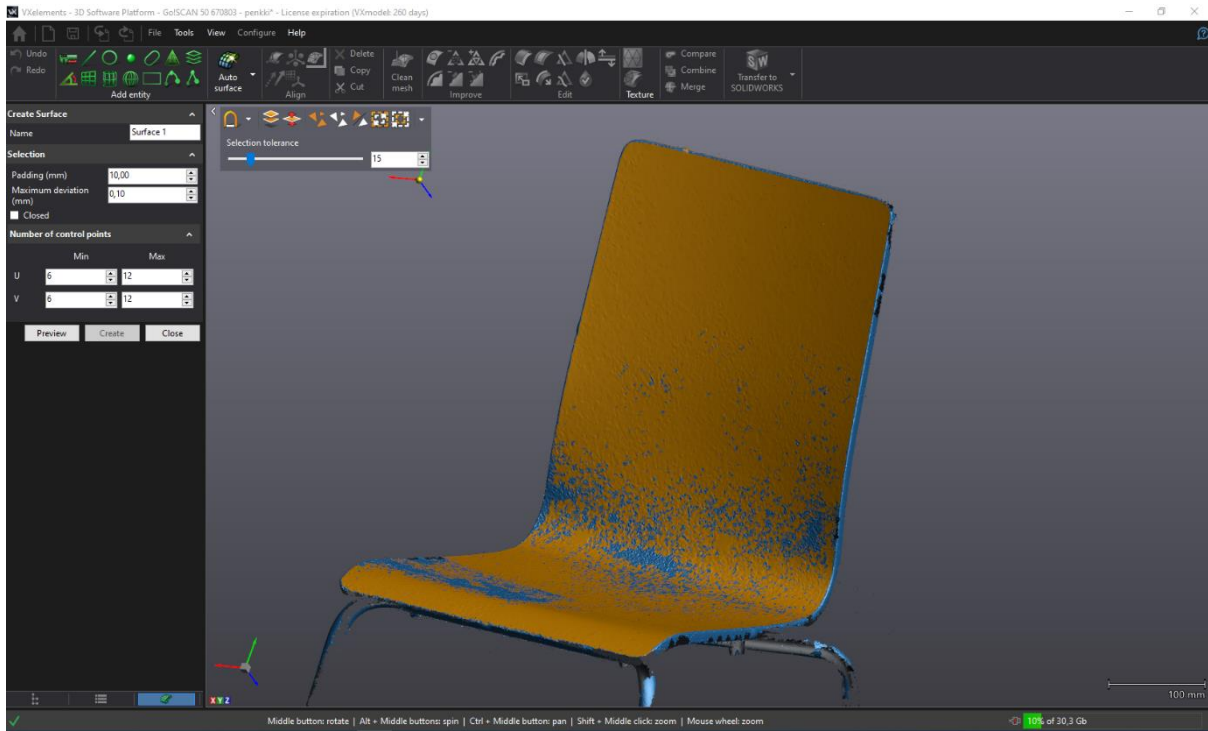
Tarvittaessa sido piirteen asento koordinaatistoon tai muuhun piirteeseen *Constraints*-asetusten avulla. Paina *create* (ks. kuva 15). Ohjelma luo piirteet joko pintoina, viivoina, käyrinä tai solideina.



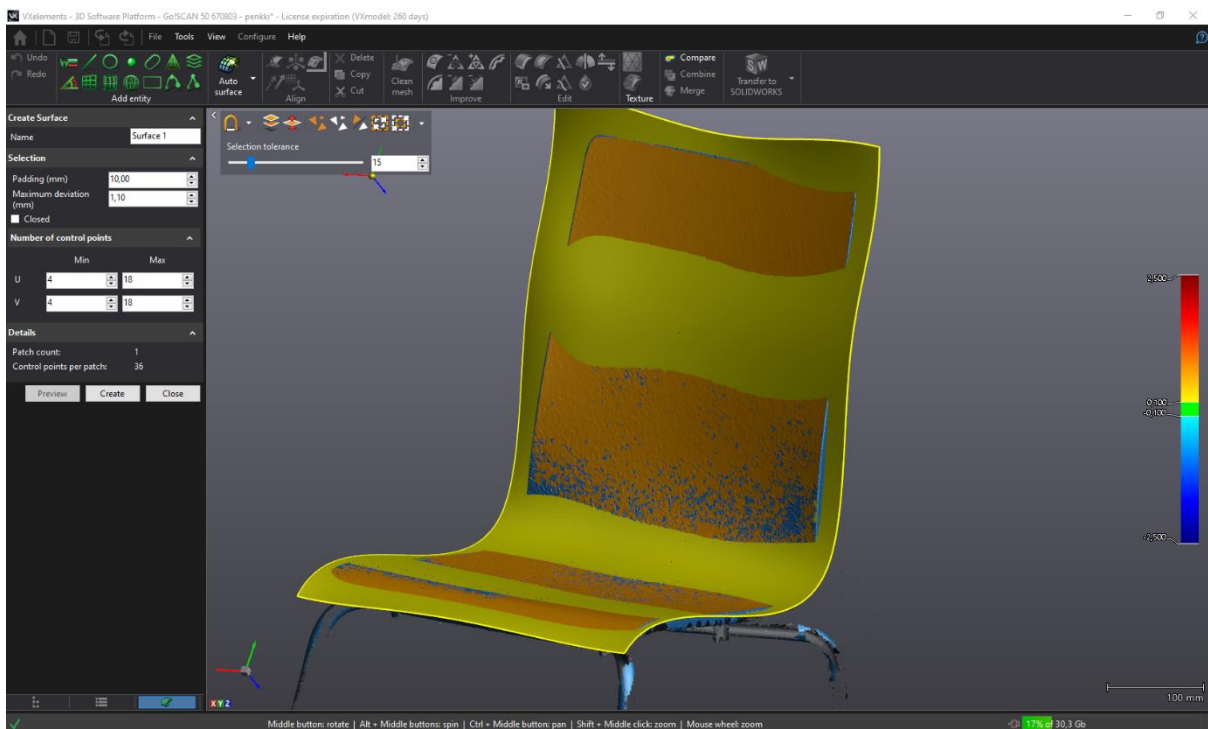
Kuva 15

7 Vapaamuotoisten pintojen luominen

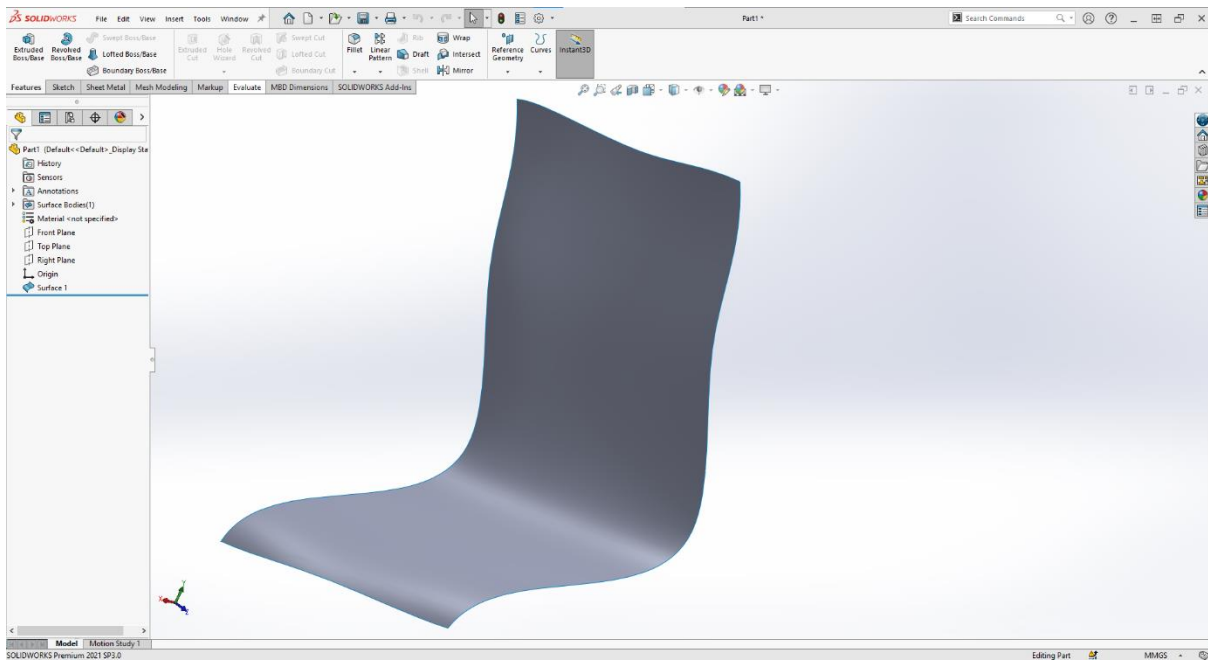
Valitse valintanauhasta *Auto surface* -työkalu tai paina sen vieressä olevaa alasvetovalikkoa ja valitse *single patch*, jos haluat luoda pain yhden patchin NURBS-pinnan. Jos teet vain yhden pinnan, valitse haluamasi pinta valintatyökalulla. Valitse pinnan parametrit ja paina *preview*. Tietokone luo pinnan automaattisesti. Tässä voi kestää minuutteja, jopa 10 minuuttia. Kun pinta on valmis, paina *create*. Ks. kuvat 16 ja 17.



Kuva 16



Kuva 17



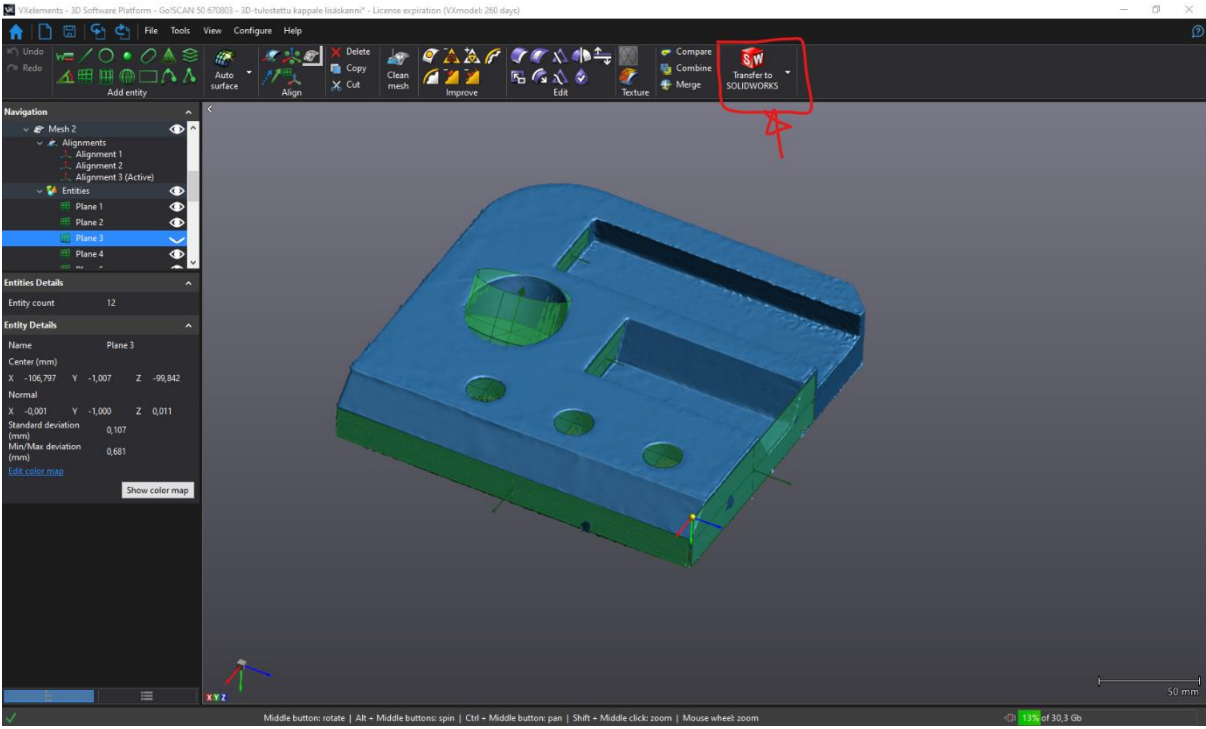
Kuva 18 Vapaamuotoinen pinta tuotuna SolidWorksiin

8 Piirteiden vienti CAD-ohjelmaan

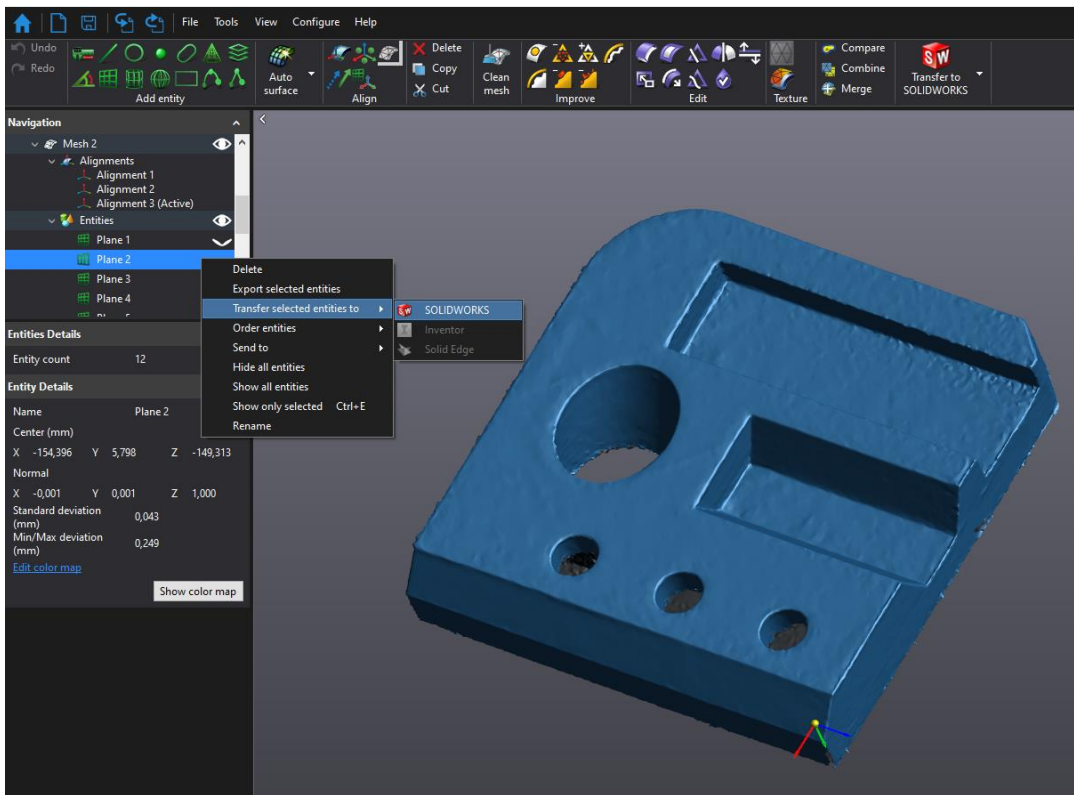
Käynnistä SolidWorks samalla koneella, jolla työskentelet. Sulje tervetulosivulla oleva ponnahdusikkuna niin, että mitään mallia tai ponnahdusikkunaa ei jää auki.

Paina VXmodelin valintanauhan oikeasta reunasta toiminto *Transfer to SOLIDWORKS*. Vaihtoehtoisesti voit viedä yksittäisiä piirteitä mallin rakennepuusta painamalla piirteen kohdalla hiiren oikeaa nappia ja valitsemalla *Transfer selected entities to->SOLIDWORKS*.

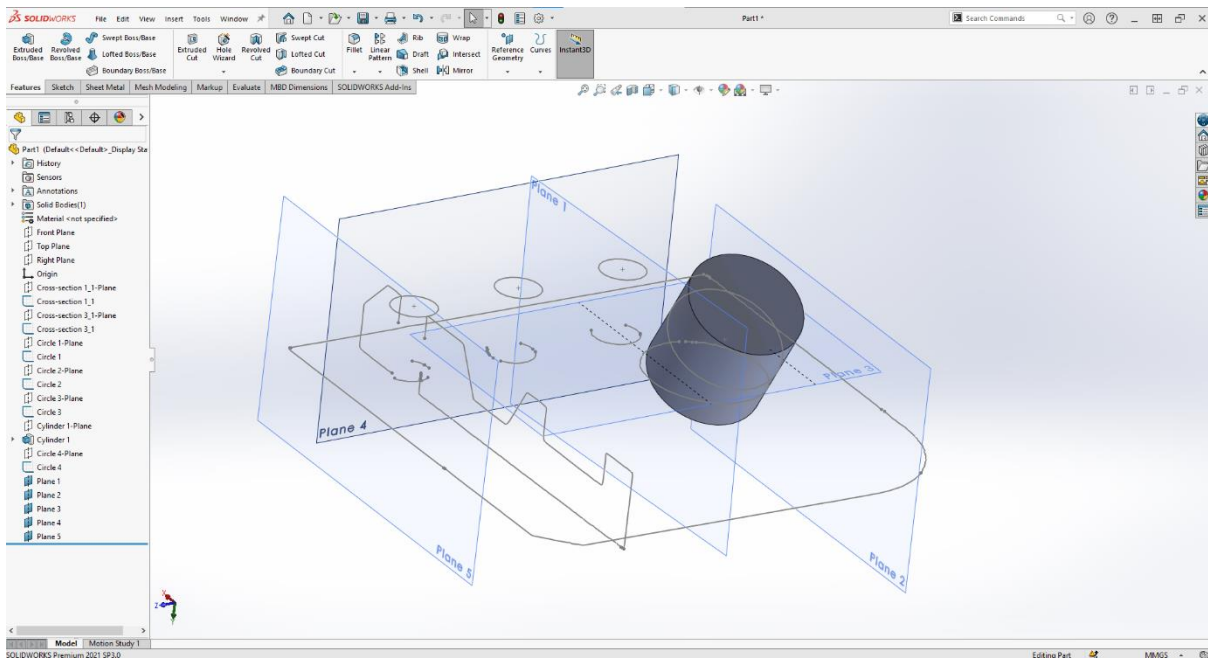
Jätä VXelements päälle, niin voit tunnistaa skannauksesta lisää piirteitä samanaikaisesti, kun mallinnat SolidWorksissa. Ks. kuvat 20, 21 ja 22.



Kuva 19



Kuva 20



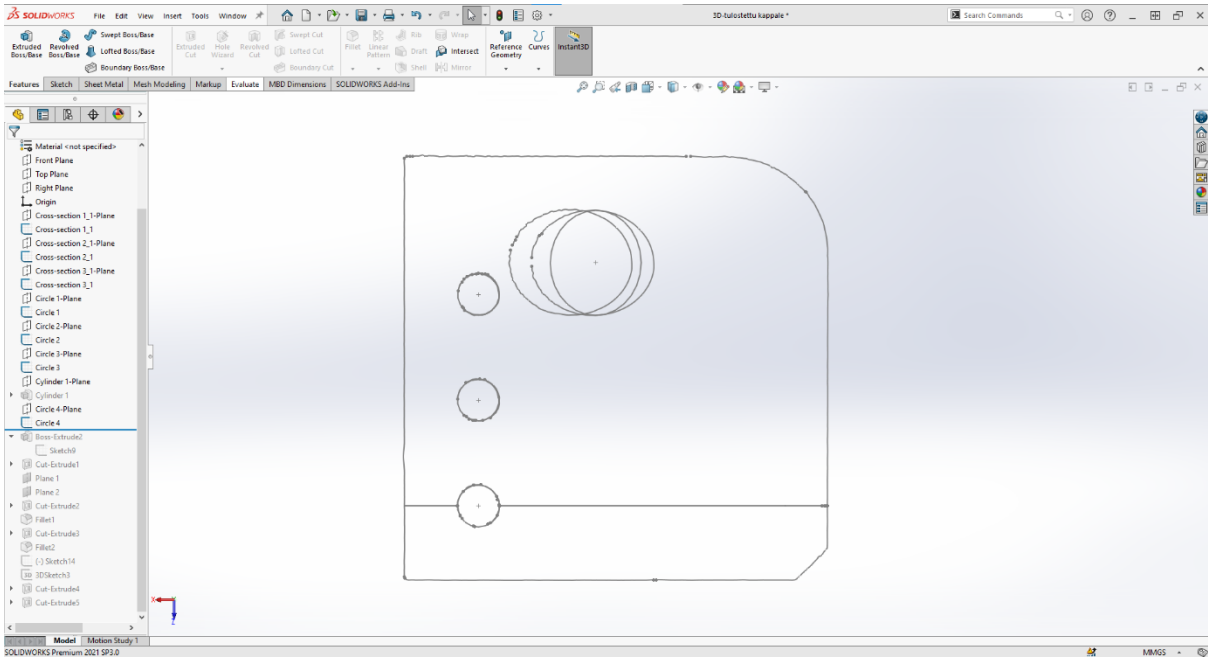
Kuva 21. Piirteet tuotuna SolidWorksiin.

9 Piirrepohjaisen CAD-mallin tekeminen

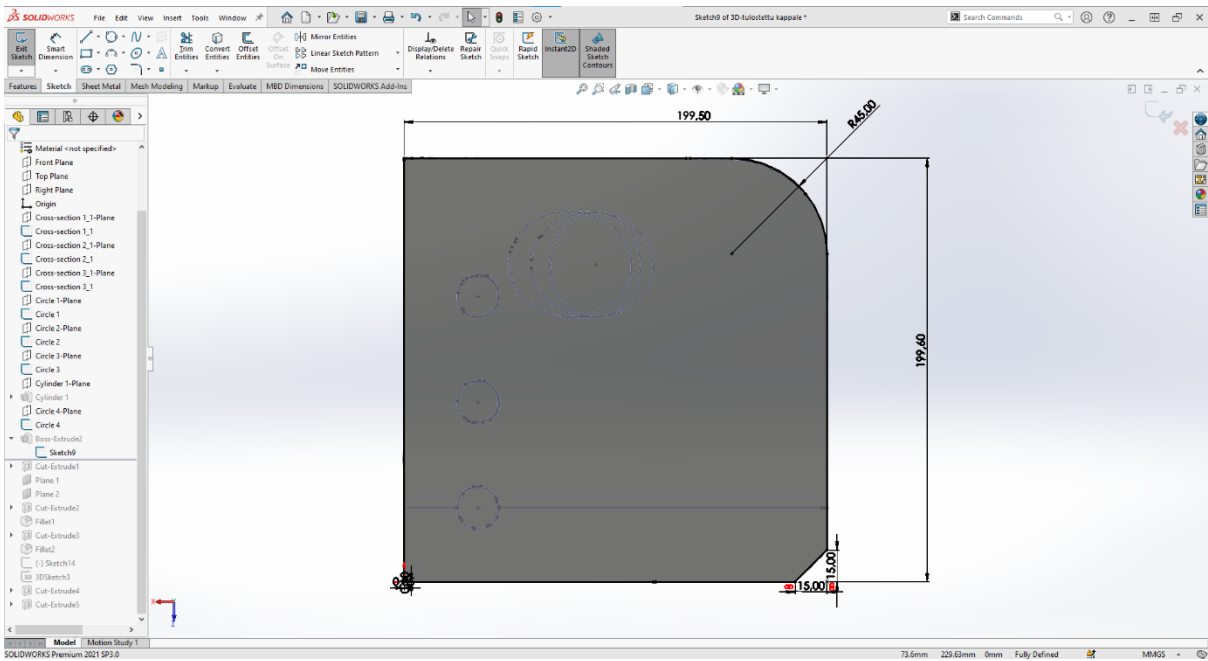
Kun alat mallintamaan piirrepohjaista mallia VXmodelista tuotujen referenssipiirteiden avulla, ota snapping pois käytöstä. Jotta mallia pystyisi muokkaamaan piirteitä numeerisesti ohjaamalla, piirteet eivät saa olla sidottuna referenssinä käytettyihin piirteisiin.

Tee aputaso referenssiiviivan suuntaisesti. Käytä *Convert entities*-työkalua tuomaan referenssiiviiva aputasolle, ja muuta se apuviivaksi. Jäljennä poikkileikkauskäyrä sketching-piirtotyökaluilla. Mitoita sketsi mahdollisimman lähelle referenssiiviivaa tai mitoita tarkoituksellisesti mitoilla. Käytä syntynyttä sketsiä piirteen luontiin pursottamalla, vetämällä tai pyöryttämällä, jne.

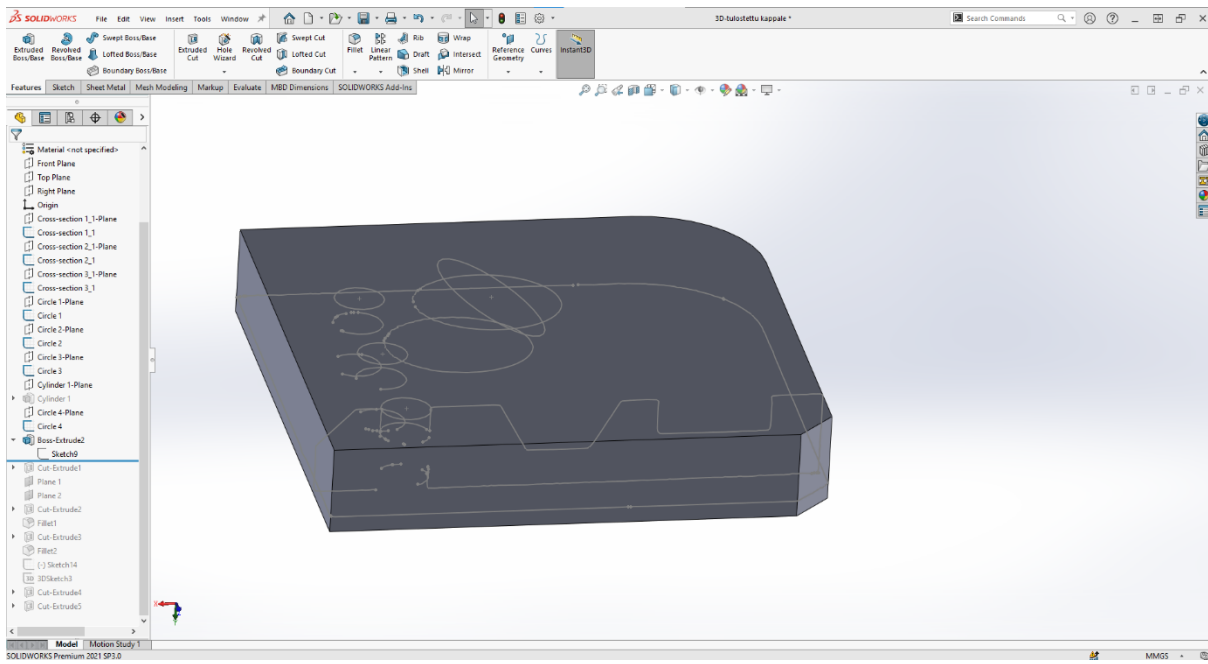
Pidä mallia tehdessä mielessä osan valmistustapa ja yritä pitää rakennepuu selkeänä. Ks. kuvat 23, 24, 25, 26, 27 ja 28.



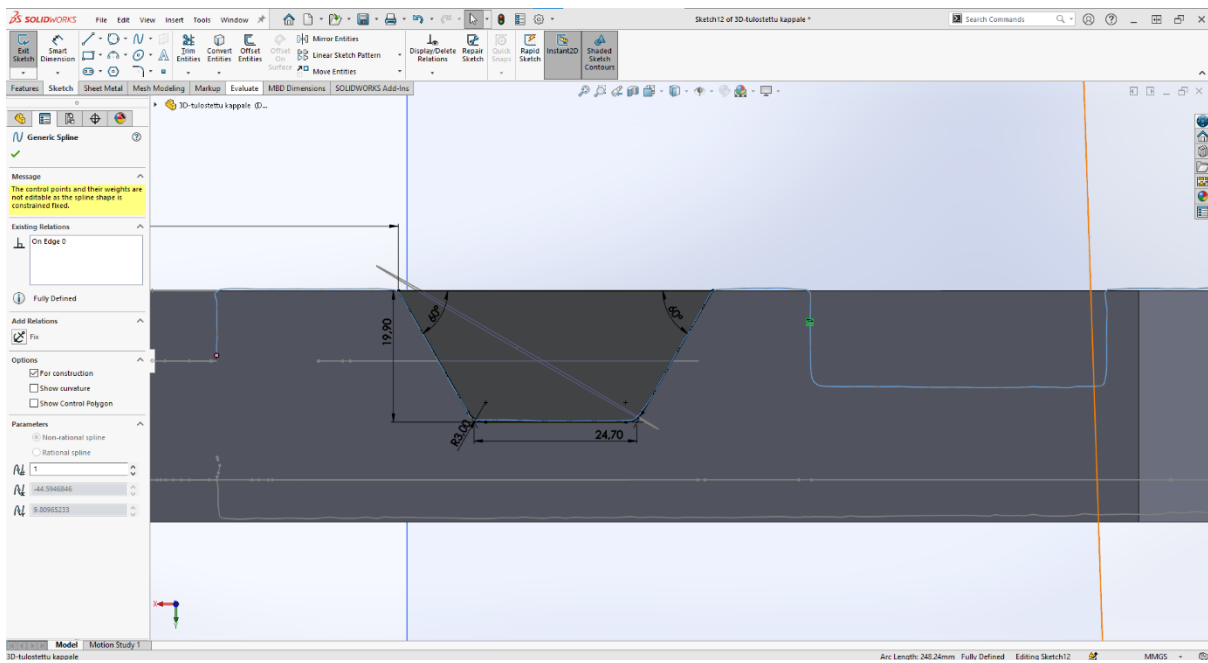
Kuva 22



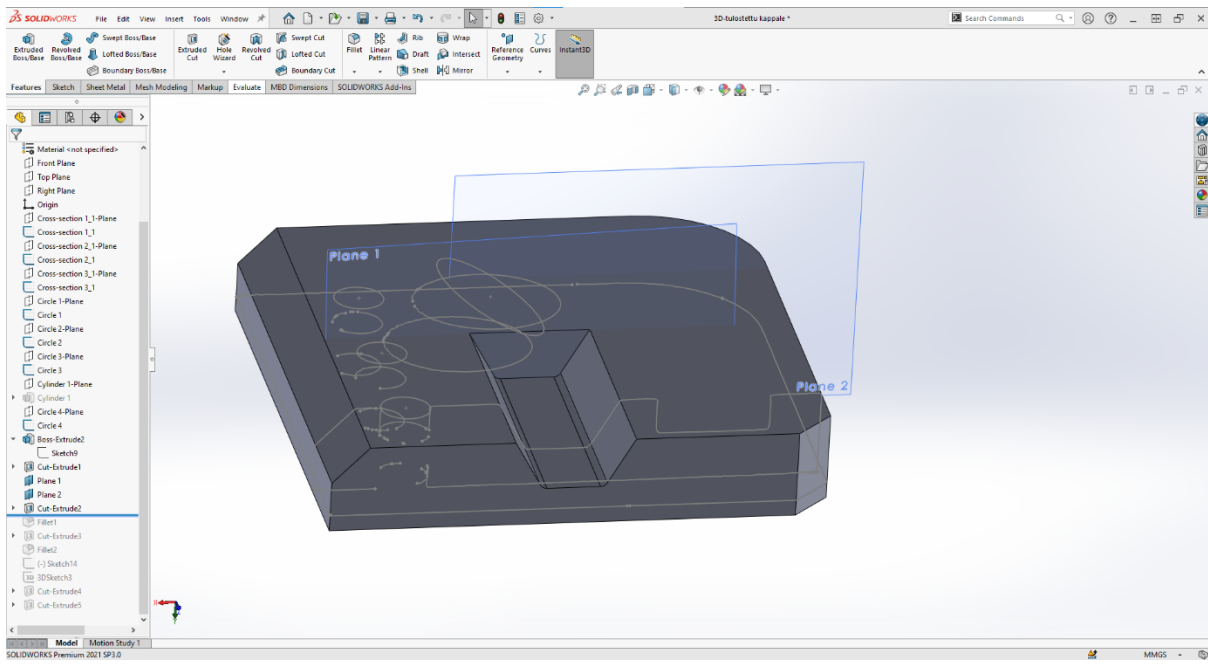
Kuva 23



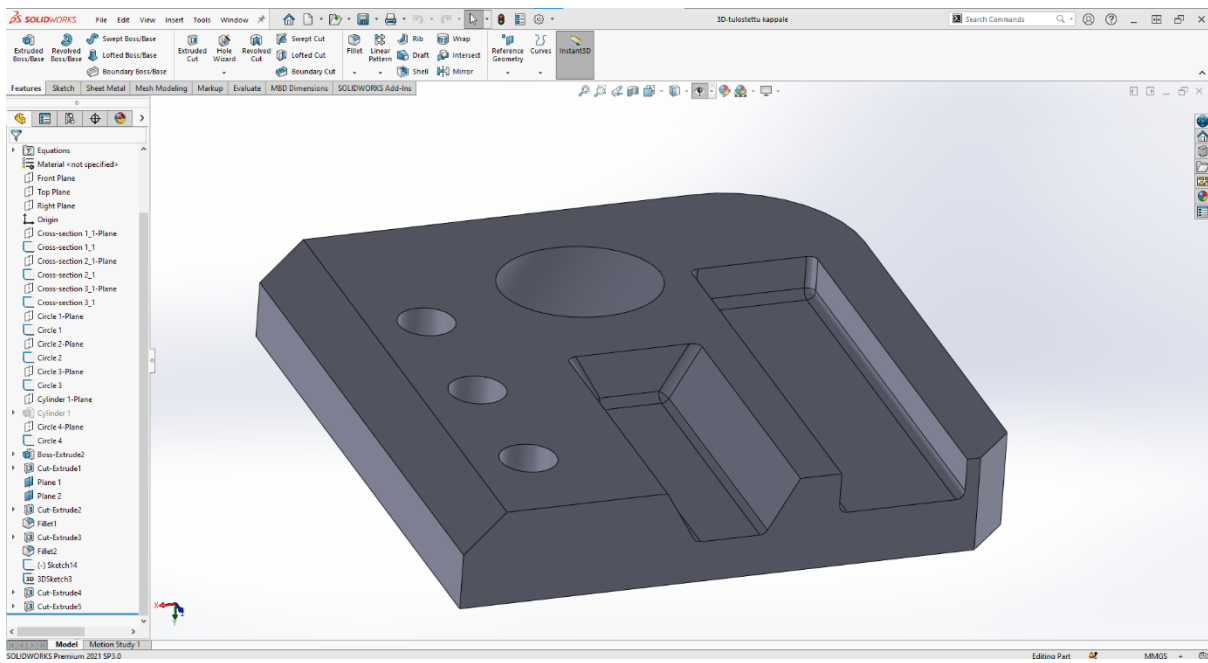
Kuva 24



Kuva 25. Huomaa sinisellä korostettu alkuperäinen referenssikäyrä.



Kuva 26

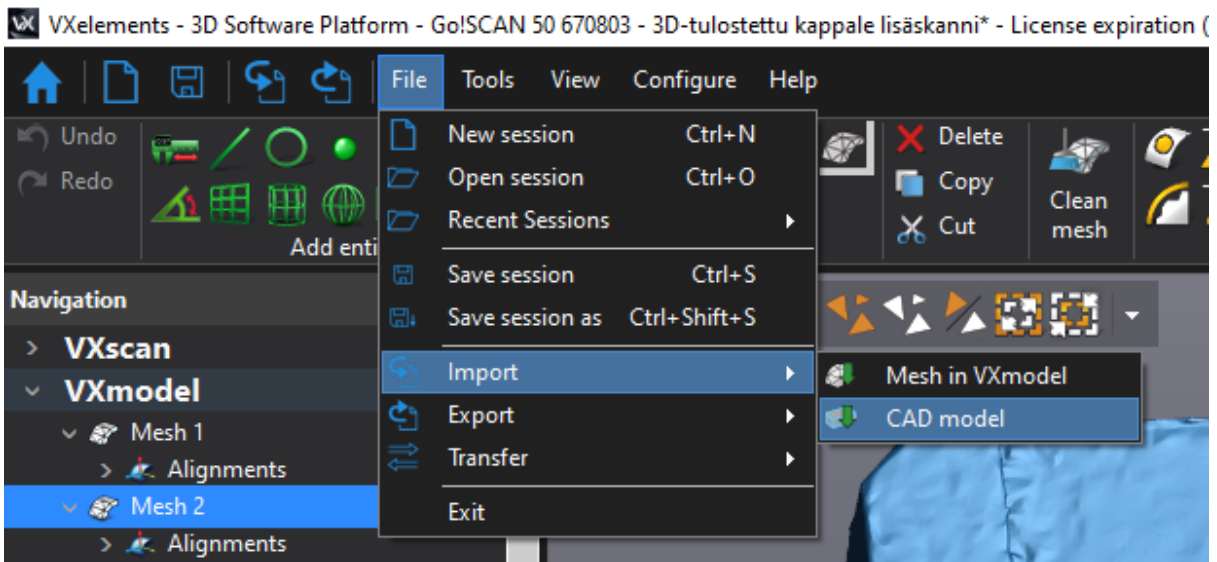


Kuva 27. Valmis piirrepohjainen CAD-malli.

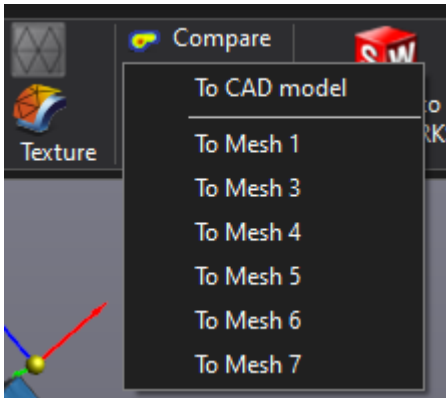
10 Tulosten tarkastelu muotovertailun avulla

Valmista CAD-mallia voidaan vertailla alkuperäiseen skannausdataan VXmodelissa.

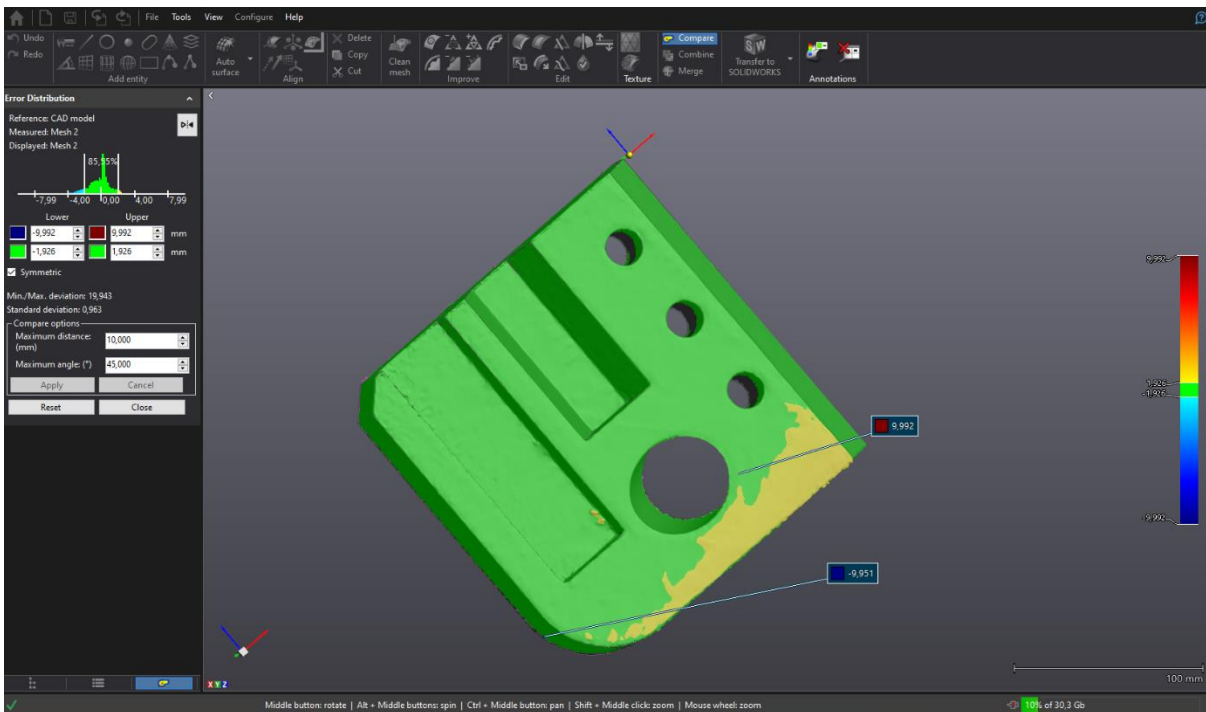
Vie CAD-malli SolidWorksista STEP-tiedostomuodossa. Tuo se VXmodeliin kuvan 29 osoittamalla tavalla. Valitse rakennepuusta aktiiviseksi se verkkomalli(mesh) johon haluat CAD-mallia verrata. Valitse ohjelman valintanauhasta *Compare*-toiminto, jolloin aukeaa alasvetovalikko, ja valitse sieltä *To CAD model* (ks. kuva 30). Ohjelma kohdentaa mallit toisiinsa pääkoordinaatiston avulla ja luo mallin pinnalle lämpökartan mallien mittapoikkeamista (ks. kuva 31).



Kuva 28



Kuva 29



Kuva 30

11 Toteutuneita takaisinmallinnusaikoja esimerkiksi

Kappaleen tyyppi	Piirteiden määrä CAD-mallissa	Käytetty aika mallintamiseen (h)
Taottu osa	21	9
Prismaattinen, 3D-tulostettu kappale	8	1,25
Sorvattu kappale	7	1,25
Muotoiltu vaneri	3	1,5
Pursotettu alumiini	6	3