

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka

2020

Niko Nummenpää

# 3D-SKANNERIN KÄYTTÖÖNOTTO JA PROSESSIKUVAUS

Niko Nummenpää

## 3D-SKANNERIN KÄYTTÖÖNOTTO JA PROSESSIKUVAUS

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin yrityksen kesällä 2019 hankkiman Go!Scan 3D -skannerin käyttöönottoa ja prosessikuvausta. Yritys oli investoinut skanneriin, sillä se halusi pystyä itse tarkastamaan alihankintuja komponentteja ja parantamaan tuotteidensa laatua. Skanneria käytetään yrityksen valmistuttamien komponenttien tarkastamiseen, jossa mitataan muun muassa kappaleiden geometriaa ja mittoja, joita ei perinteisillä koskettavilla mittaamenetelmillä ollut mahdollista tehdä. Yrityksellä ei entuudestaan ollut kokemusta 3D-skannerien käytöstä. Tämän vuoksi skannauselle luotiin prosessi ja selitteet, jonka mukaan yritys pystyisi harjoittamaan skannausta. Työssä tutustuttiin erilaisiin koskettaviin ja ei-koskettaviin skannausmenetelmiin. Koskettava skannaus on tiedonkeruutapa, jossa mittapää kerää kappaleesta tietoa koskettamalla kappaletta, kun taas ei-koskettavissa skannausmenetelmissä tiedonkeruu tapahtuu kappaleesta heijastuvan valon avulla. Pääpaino teoriaosuudessa oli strukturoidussa valossa, joka vastaa yrityksen käyttämän skannerin toimintatapaa.

Työssä luotiin prosessi yrityksen harjoittamalle skannaustoiminnalle, jotta skanneria voitaisiin käyttää tehokkaasti siten, että se tukisi yrityksen suunnittelua ja parantaisi laatua. Yritykselle suunniteltiin skannauspöytä, joka helpottaisi suurien kappaleiden skannausta, sillä ennen kiinteää mittausta paikkaa ei ollut. Vertailumittausten avulla selvitettiin yrityksen käyttämän skannerin tarkkuus mitattaessa pientä kappaletta. Samalla hankittiin tietoa mitä toimenpiteitä käyttäjältä vaaditaan, kun halutaan mahdollisimman tarkkoja mittaustuloksia Polyworks-ohjelmistossa. Vertailumittauksissa vertailtiin yrityksen käyttämää skanneria Turun ammattikorkeakoulun Zeiss T-scan -laitteistoon ja Koneteknologiakeskuksen koordinaattimittauskoneeseen. Mittausten vertailu tapahtui vertailemalla skannereiden muodostamia STL-malleja koordinaattimittauskoneen antamiin tuloksiin. Tuloksista havaittiin, että skannerin tarkkuus olisi riittävän hyvä yrityksen vaihtelevissa mittaolosuhteissa.

Lopuksi työssä kerrotaan miten tarkkuuden varmistamiseksi Gage R&R-tutkimus olisi tarpeen. Yritys voi myös tulevaisuudessa siirtyä käyttämään koskettavaa 3D-skannausta, sillä koskettavassa skannauksessa kerättävän tiedon määrä on pienempi ja vakiokappaleiden mittaus nopeampaa.

### ASIASANAT:

3D-skannaus, structured light, tarkkuus, mittaus, verifiointi

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical Engineering

2020 | 27 pages, 7 pages in appendices

Niko Nummenpää

# DEPLOYMENT AND PROCESS DESCRIPTION OF A 3D SCANNER

The company in this thesis invested in a Go!Scan 3D scanner in the summer of 2019. This thesis addresses the 3D scanner's deployment and process description. The company had invested in the 3D scanner because it wanted to be able to verify components made by its subcontractors and improve its quality. The scanner is being used to verify components manufactured by the company's subcontractors, in which the geometry and dimensions of the components are checked. This was not possible with conventional contact-based measurement methods. The company had no prior experience in 3D scanning. This is why the company needed a process description and guides on how to effectively utilize 3D scanning. In the thesis, different types of scanning methods were researched. These include contact and non-contact-based scanning methods. Contact-based scanning methods work by probing the component while non-contact-based scanning methods gather data of the object from the light that it reflects. The main focus in theory was structured light, since this method matches the company's scanner's operation.

A process was created for the company in order to use 3D scanning effectively in a way that would benefit the company's design department and quality. A scanning table was designed that would make scanning large components easier than in the past when no fixed measuring platform was available. The scanner's accuracy on small objects was examined using comparison measurements. At the same time, information on what actions the user needs to take in order to get the most accurate results in Polyworks was gathered. Comparison measurements were taken where scans from the company's scanner were compared to the scans made with Turku University of Applied Sciences' Zeiss T-scan equipment and Machine Technology Center Turku Ltd's coordinate measuring machine. The results showed that the scanner's accuracy would be good enough for the varying circumstances in which the scanner is used.

Lastly, it is mentioned that a Gage R&R study would be needed to confirm the accuracy of the scanner. In the future, the company may possibly switch to contact-based scanning due to it extracting less data and being faster in measuring already established components.

## KEYWORDS:

3D-scanning, structured light, accuracy, measuring, verification

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO</b>	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 TEORIAA</b>	<b>8</b>
2.1 Structured light	8
2.2 Muita tekniikoita yleisesti	10
<b>3 SKANNERISTA</b>	<b>12</b>
<b>4 SKANNAUSPROSESSI</b>	<b>15</b>
4.1 Yrityksen kohtaamat haasteet	15
4.2 Skannausprosessi	15
4.3 Kappaleen tarkastelu Polyworks-ohjelmassa	18
4.4 Kiinteän mittaustaikan suunnittelu	18
<b>5 VERTAILUMITTAUKSET</b>	<b>20</b>
5.1 Mittakappaleen suunnittelu	20
5.2 Mittaukset	21
5.3 Tulokset	22
<b>6 JOHTOPÄÄTÖS</b>	<b>26</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>27</b>

## LIITTEET

- Liite 1. Skannerin tekniset ominaisuudet.
- Liite 2. Mittakappaleen mittapisteen
- Liite 3. Mittakappaleen mittatasot
- Liite 4. Mittadata

## KAAVAT

Kaava 1. $\Delta L = \alpha \Delta T L_0$	23
---	----

## KUVAT

Kuva 1. Structured light -skannerin toimintaperiaate (3dn)	9
Kuva 2. Creaform Go!SCAN 3D (Creaform 2020)	13
Kuva 3. Tarkkuuden ja resoluution vaikutus kappaleen STL-malliin. (How20)	14
Kuva 4. Mittapöydän CAD-malli	19
Kuva 5. Mittakappale Solidworks-ohjelmassa.	20
Kuva 6. Mittakappale koordinaattimittauskoneella (Jarkko Korhonen)	21
Kuva 7. Näkymä mittakappaleesta Polyworks-ohjelmistosta.	23

## KUVIOT

Kuvio 1. Kaavio skannausprosessista.	16
Kuvio 2. Poikkeamat koordinaattimittauskoneesta.	24
Kuvio 3. Skannausten prosentuaalinen poikkeama	25

## KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

.STL	Stereolithography (STL)
3D	Three-dimensional
TOF	time-of-flight (Terabee)
PDM	Product data management (Siemens)
CAD	Computer-aided design

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on selvittää kohdeyrityksen kesällä 2019 hankkiman 3D-skannerin soveltuvuutta yrityksen valmistuttamien komponenttien geometrian ja mittojen varmistuksessa. Yritys valmistuttaa märkätiloja matkustajalaivojen hytteihin, joiden lattiaelementtien geometria vaihtelee riippuen projektista. Yritys on nähnyt tarpeelliseksi investoida omaan 3D-skanneriin, sillä yritys pyrkii parantamaan valmistuttamiensa komponenttien laatua ja siirtämään mittauksia yrityksen omalle henkilöstölle. Tällöin oma skanneri helpottaisi yhteistyötä alihankinnan ja yrityksen toteuttaman suunnittelun kanssa. Ennen skannerin käyttöönottoa yritys on pääasiassa verifioinnut suunnitteluaan koskevilla mittausmenetelmillä tai 3D-skannauksella alihankintana. Yrityksellä ei entuudestaan ole ollut 3D-skanneria omassa käytössään, joten tarkkaa tietoa siitä, millaiseksi mittausprosessi muodostuisi ei ollut. Tämä vaatisi arvion siitä, mistä tehokas mittaaminen koostuu ja millainen skannausprosessi olisi, jotta skanneria voitaisiin käyttää tehokkaasti. Koska opinnäytetyön alue on laaja, työlle on otettu seuraavat päämäärät. Tärkeimpinä tavoitteina on luoda ja selvittää toimenpiteet skannerin käyttöönotolle, kun halutaan luoda toimintamalli ja mahdollisuudet eri kokoisten kappaleiden skannaamiselle kohdeyrityksen tiloissa sekä mahdollisesti alihankkijalla. Toisena tavoitteena on selvittää yrityksen skannerin ominaisuuksia, jotta skanneria voidaan käyttää kustannustehokkaasti relevanttien asioiden mittaamiseen. Viimeisenä tavoitteena on tehdä vertailumittaus yrityksen skannerilla, jolla selvitetäisiin sen tarkkuus.

## 2 TEORIAA

### 2.1 Yleisesti

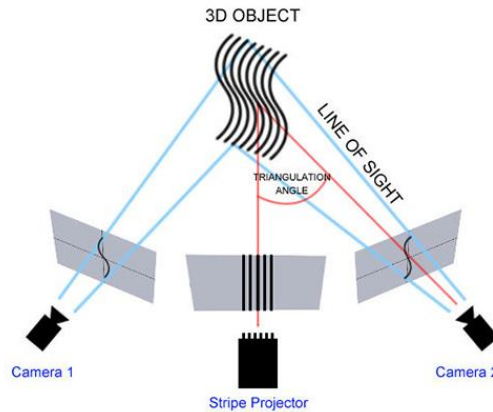
3D-skannaus on valolla tai koskettavalla mittapäällä tapahtuvaa tiedon keruuta fyysisestä kappaleesta, jossa fyysisen kappaleen geometria tallennetaan sähköiseen muotoon. 3D-skannaus voidaan jakaa kahteen eri tiedonkeruutapaan: koskettaviin mittaamenetelmiin, kuten koordinaattimittauskoneet ja koskemattomiin mittaamenetelmiin. Koskemattomat mittaamenetelmät voidaan jakaa pääpiirteiltään seuraaviin luokkiin: lentoaika, vaihe-ero ja laserkolmiomittaus sekä edelleen aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin. (3D Laser Scanner's Techniques Overview, 2015.)

Teoriaosuus keskittyy pääasiassa aktiiviseen structured light –menetelmän toimintaan, sillä se vastaa kohdeyrityksen skannerin toimintatapaa ja on näin ollen perustavanlaatuista tietoa yrityksen käyttämän laitteen toimintatavan ja mittaussoveltuvuuden ymmärtämisessä.

### 2.2 Structured light

Structured light eli structuroitu valo on aktiivinen skannausmenetelmä. Aktiivinen skannaus tarkoittaa sitä, että skanneri päästää jonkinlaista säteilyä tai ultraääntä skannattavaan kohteeseen. Aktiiviset skannausmenetelmät voivat perustua muassa valoon, ultraääneen tai röntgen-säteilyyn. Strukturoidussa valossa toiminta perustuu valonlähteeseen, joka heijastaa skannattavaan kappaleeseen valokuvion. Kuvio, joka kappaleeseen heijastetaan voi olla joko yksi- tai kaksiulotteinen. Kun kuvio tai yksiulotteinen viiva heijastetaan projektorilta kappaleen pintaan, projektorista poikkeavaan tasoon asetettu kamera tarkastelee kuvion tai viivan muodonmuutosta. Kuvassa 1. havainnollistetaan structuroidun valon toimintaa.





Kuva 1. Structured light -skannerin toimintaperiaate (3dn).

Stripe projector toimii valonlähteenä ja heijastaa kappaleen pintaan kuvion jonka kamerat 1 ja 2 näkevät. Kamerat 1 ja 2 ovat asemoitu niin, että näiden etäisyys on tunnettu. Kun Kameroiden etäisyys valonlähteeseen on tiedossa, on laitteen mahdollista tietää skannerin etäisyys skannattavaan kappaleeseen kolmiomittauksen avulla. Kun kappaleeseen heijastetaan kuvio, joka pitää sisällään erimerkiksi useita viivoja, skanneri voi yhtäaikaaisesti tulkita useamman viivan etäisyyttä kappaleessa ja muodostaa nopeasti mallin skannattavasta kohteesta. Tämä kuvion muodonmuutoksen tarkastelu voi tapahtua jopa miljoonia kertoja sekunnissa, jolloin kappaleesta saadaan useita näytteitä, jotka algoritmi sitten tulkaa etäisyydeksi kohteesta ja muodostaa tällöin 3D-geometrian kappaleesta. Struktruoidun valon hyviä puolia ovat sen tarkkuus, nopeus ja suuri skannauspinta-ala, jotka voidaan saavuttaa hyvinkin pienellä laitteella. Niitä on markkinoilla saatavilla useita eri malleja esimerkiksi pöydän päälle asetettavista yksityiskäyttöön tarkoitettuista skannereista sekä yrityskäyttöön tarkoitettuja skannereita, joiden tarkkuus riittää aina laadunvarmistuksen vaatimuksiin asti. Ongelmaksi strukruoidun valossa saattaa ilmetä paljon valoa absorvoivilla materiaaleilla niiden huono heijastavuus. Tällöin kameralle ei heijastu valokuvioita takaisin ja skannausta ei tapahdu. Valoa liikaa heijastavat materiaalit aiheuttavat skannauksessa kohinaa, jossa skanneri ei tunnista kuinka kaukana kappale on. Skannerin algoritmista ja kameroista riippuen tämä voi estää kyseisen materiaalin skannaamisen. Myös ympäristön valomäärä vaikuttaa skannauksen suorittamiseen; liian kirkkaassa tilassa projektorin heijastama valokuvio voi hukkuu muualta tulevaan valoon, eikä kamera erota kuviossa tapahtuvaa muodonmuutosta. (3D Laser Scanner's Techniques Overview, 2015.)

### 2.3 Muita tekniikoita yleisesti

Muihin tekniikoihin kuuluvat erilaiset koskettavat ja koskemattomat 3D-skannausmenetelmät.

**Koskettavat mittausmenetelmät** ovat menetelmiä, jossa tiedonkeruu tapahtuu kappaletta koskettavalla mittapäällä. Nämä menetelmät toimivat usein mekaanisella jalustalla, jossa on jonkinlainen mekaaninen käsivarsi mittapään liikuttamiseen. Mittapään liikuttaminen voi tapahtua automaattisesti tai manuaalisesti. Kun mittapää osuu mitattavan kohteen pintaan, laite tallentaa mittapään position X, Y, Z -koordinaatistosta. Tällä tiedolla kappaleesta voidaan muodostaa pistepilvi, joka sisältää eri mittauskohtien koordinaatistodatan. Koordinaattimittauskoneita käytetään esimerkiksi teollisuudessa laadunvarmistukseen. Koordinaattimittauksen haittapuolena on sen toimintatapa; toimintatapa vaatii kosketusta kappaleeseen, joten herkkiä materiaalia tai esineitä ei välttämättä ole mahdollista mitata tällä menetelmällä. Riskinä on mittapään luoma muodonmuutos kappaleeseen. Toinen haittapuoli on sen hitaus. Koordinaattimittauskoneen mittausnopeus on yleensä vain muutamia satoja hertzejä, kun taas optisella järjestelmällä tämä voi olla väliltä 10-500kHz. (3D Laser Scanner's Techniques Overview, 2015.)

**Laserkolmiomittaus** on myös yksi aktiivinen skannausmenetelmä. Tässä menetelmässä projektori heijastaa kappaleeseen laserin ja kamera tarkastelee laserpisteen sijaintia. Kun laserpisteen etäisyys kappaleessa vaihtelee, kamera näkee laserpisteen paikan muuttuvan näkökentässään. Tätä kutsutaan kolmiomittaukseksi, sillä laserprojektorin, kappaleen ja laserin reitti muodostaa kolmion. Koska kameran etäisyys ja kulma laserprojektoriin on tunnettu, voidaan trigonometrian avulla laskea etäisyys kappaleeseen. (3D Laser Scanner's Techniques Overview, 2015.)

**Photogrammetry** eli kuvamittaus tarkoittaa nimensä mukaisesti prosessia, jossa valokuvia mitataan. Prosessissa kerätään kohteesta, josta halutaan tehdä 3D-malli, kuvia ja ne prosessoidaan mitattavaksi malleiksi. Malleja on myös mahdollista visualisoida kohteen tekstuureilla ja värillä. Kuvamittausta voidaan käyttää muun muassa suurien rakenteiden tarkastesluun kuten: suunnitteluun, arkkitehtuuriin tai ympäristöanalyysiin. (Use of photogrammetry in 3D modelling and visualization of buildings.)

**Time of flight-** eli aikaeromenetelmässä mitataan laserpulssin aikaeroa lähtöpisteestä takaisin anturille. Laservaloa käytetään lähettämään valopulssi kappaleelle ja aikaa, joka valolta kestää palata kameralle, mitataan. Koska valonnopeus on tiedossa, voidaan siitä laskea valon kulkema matka ja näin ollen etäisyys kohteeseen. Menetelmän tarkkuus riippuu siitä, kuinka hyvin aikaa voidaan mitata. (3D Laser Scanner's Techniques Overview, 2015.)

### 3 SKANNERISTA

Kohdeyrityksellä oli tarve mitata kappaleita, joiden geometriaa ja mittoja on hankala määrittää perinteisillä koskettavilla mittausmenetelmillä kuten esimerkiksi rullamitta ja työntömitta. Ongelmaksi koettiin, että koskettavilla mittausmenetelmillä kappaleesta ei saisi eristettyä tarpeeksi informaatiota tai että suuren informaatiomäärän keräämiseen menisi paljon aikaa. Mittausmenetelmää valitessaan kohdeyritys testasi useita eri 3D-skannereita, joista jokainen poikkesi toimintavaltaaan, ohjelmistoltaan tai tarkkuudeltaan toisistaan. Näistä skannereista Creaformin valmistama Go!Scan 3D valittiin hankittavaksi. Yritys valmistuttaa valmistamiinsa tuotteisiin modulaarisia märkätiloja, joiden lattiaelementti sisältää monisuuntaisia kaatoja, pyöristyksiä ja muuhun rakenteeseen vaikuttavia tasomaisuuksia. Mittausmenetelmäksi haluttiin koskettamaton 3D-skannaus, jonka skannaustulosta olisi mahdollista verrata kappaleen 3D-malliin. Koskettamaton kappaleen mittaus mahdollistaa myös suuremman datamäärän keruun kappaleesta, kuin koskettava 3D-skannaus. Tällöin yrityksen kriteereinä skannerin valinnalle olivat ohjelmiston helppokäyttöisyys, vähäinen koulutuksentarve, lyhyt käyttöönottoaika ja mahdollisuus skannata kirkkaita tai heijastavia sekä tummia materiaaleja. Skanneri oli myös pystyttävä ottamaan mukaan, jolloin itse skanneri tai siihen liittyvä laitteisto ei saanut olla vaikeasti kuljetettavissa. Tämä mahdollistaisi suunnittelun tarkastamisen myös alihankkijan toimipisteissä, ennen kuin kohdeyritys itse ottaisi tavaraa vastaan. Riittävä tarkkuus yrityksen valmistuttamien komponenttien mittaamiseen oli myös ehdoton kriteeri.

Yrityksen hankkima Go!Scan 3D edustaa Creaformin kannettavaa skannerisarjaa. Creaform mainostaa laitteen olevan heidän tuotelinjansa nopein käyttäjäystävällinen skanneri. Liitteessä 1 on ilmoitettu valmistajan laitteelle antamat tiedot. Oleellisinta kohdeyritykselle skannerin teknisistä ominaisuuksista olivat sen tarkkuus, mittausresoluutio, volumetrinen tarkkuus ja verkkoresoluutio.



Kuva 2. Creaform Go!SCAN 3D (Creaform 2020).

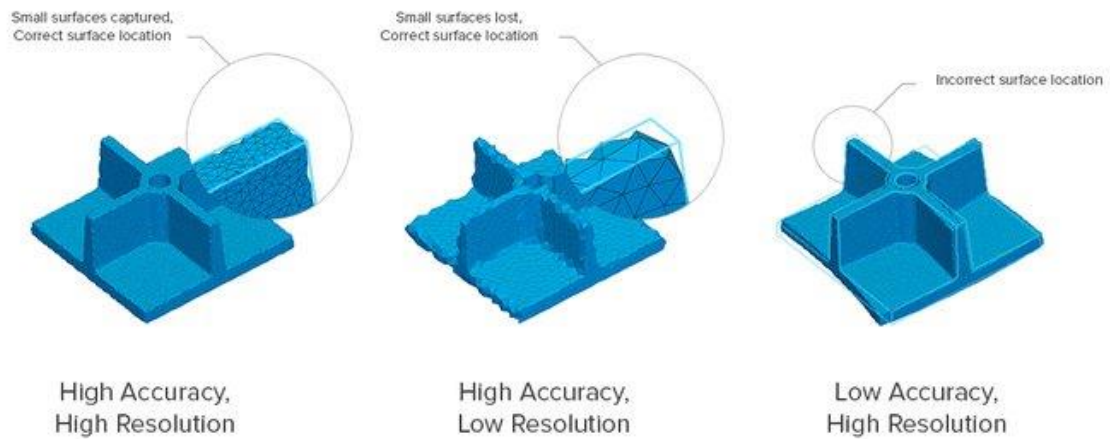
**Mittausresoluutio** kertoo mikä on mittauspisteiden väli kun skanneri muodostaa kappaleesta 3D-mallin. Pienemmällä mittausrésoluutiolla on mahdollista kerätä enemmän mittauspisteitä kappaleen pinnasta, josta skanneri sitten muodostaa STL-mallin. Mittausrésoluutioksi valmistaja antaa 0,1mm. Tällöin mitattavia pisteitä, josta malli muodostetaan otetaan skannauksesta 0,1mm välein.

**Volumetrinen tarkkuus** ilmaisee skannerin tarkkuuden mitta-alueen kasvaessa. Yrityksen skannerille tämä on valmistajan mukaan 0,05mm + 0,15mm/m. Tällöin, mitä suurempi kappale on, sitä enemmän virhettä muodostuu, mitä kauemmas skannauksen aloituspaikasta mennään.

**Verkkoresoluutio** kertoo skannauksen mittauspisteistä muodostettavan kolmion koon. Pienen verkkoresoluution omaava kappale sisältää enemmän kolmioita, joista 3D-malli koostuu, jolloin kappale sisältää enemmän informaatiota kappaleen yksityiskohdista. Verkkoresoluution koko on verrannollinen kappaleesta muodostuvan tiedoston kokoon. Skannerin käyttäjän pitää osata valita oikea résoluutio riippuen siitä, kuinka tarkasti kappaleen yksityiskohtia halutaan tallentaa.

Tarkkuudeksi valmistaja antaa skannerille 0.05mm. Kuvassa 3. on havainnollistettu tarkkuuden ja verkkoresoluution yhteisvaikutusta kappaleesta muodostuvaan 3D-malliin. Skannerin ollessa tarkka ja verkkoresoluution ollessa matala voidaan kappaleesta muodostaa mittatarkkoja tasoja, mutta yksityiskohdat, kuten reiät jäävät epätarkoiksi

kolmioiden vähyden vuoksi. Vastakohtana tälle on epätarkka skannaustulos, jossa verkkoresoluutio on korkea ja mittaustarkkuus huono. Tällöin kappaleesta muodostettavat tasot eivät välttämättä sijaitse oikeilla paikoilla suhteessa toisiinsa. Yksityiskohdista tulee mittauskelvottomia, sillä epätarkkuus aiheuttaa vääristymiä geometriaan.



Kuva 3. Tarkkuuden ja resoluution vaikutus kappaleen STL-malliin (How20).

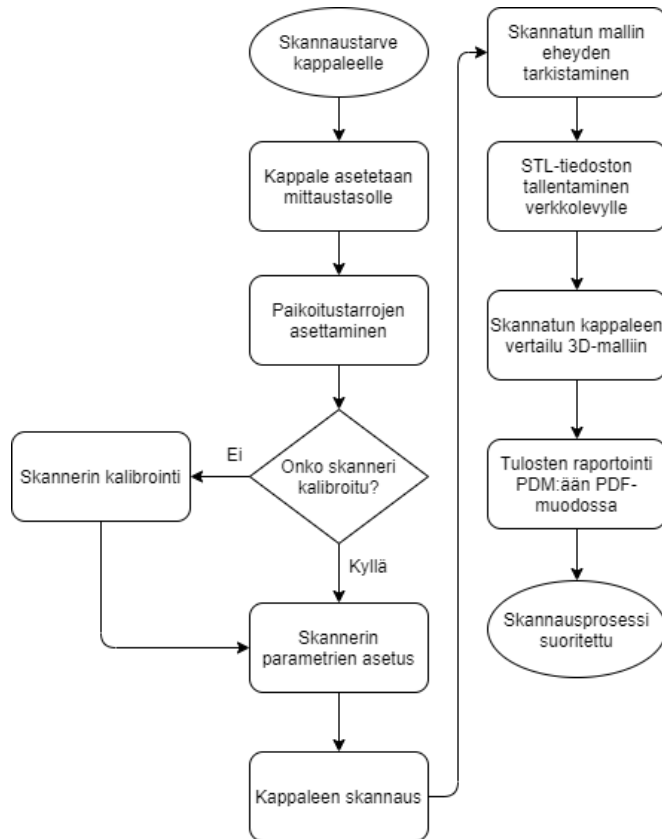
## 4 SKANNAUSPROSESSI

### 4.1 Yrityksen kohtaamat haasteet

Skannauksessa yritys kohtaa monenlaisia haasteita. Kappaleet, joita yritys skannaa ovat suuria, noin 1,5x2 m kooltaan ja ne sisältävät usein valoa hyvin heijastavaa sinkittyä terästä ja kiiltävää lasikuitua. Tämän vuoksi skannauspaikka pitää valita tarkoin, sillä ympäristön valomäärä vaikuttaa siihen, kuinka hyvin skanneri näkee kappaleen pinnan. Skannerin käyttäjän täytyy myös tietää skannerin valotusarvoista, jotta hyvin valoa heijastavat pinnat saadaan skannattua. Mittauspaikkaa ei ole, jolloin kappaleet voivat heilua mittauksen aikana, kun ne paikoitetaan epätasaiselle alustalle. Yrityksellä ei myöskään ole vielä käytössään selvää prosessia, mitä skannauksessa tapahtuisi, joten selvää konsensusta siitä, miten kappaleiden kanssa toimitaan ei ole.

### 4.2 Skannausprosessi

Skannausprosessi alkaa yleensä jonkinlaisesta suunnittelun tai tuotannon vaatimasta tarpeesta. Yleensä skannaustarve on kappaleille, joita ei ole vielä hyväksytty tuotantoon. Syitä tähän ovat muun muassa uusi toimittaja kappaleelle, suunnittelun mittaverifiointi tai saapuvan materiaalin pistokoemainen testaus.



Kuvio 1. Kaavio skannausprosessista.

**Kappaleen asettaminen mittaustasolle** on skannauksen lähtökohta. Mitattava kappale halutaan asettaa mahdollisimman suoralle tasolle, jonka ympärillä on esteetöntä kulkea. Kappaleen asettaminen riittävän tasomaiselle, tukevalle ja kohtisuoralle pinnalle on tärkeää, sillä muuten kappale voi altistua erilaisille värinöille tai kappaleen omasta massasta johtuville muodonmuutoksille.

**Paikoitustarrojen asettaminen** tehdään tarpeen mukaan. Jos kappale on alle skannerin mittausalueen kokoinen ja/tai se sisältää geometriaa, skanneri pystyy yleensä tunnistamaan kappaleen ilman paikoitustarroja. Kappaleen ollessa yli skannausalueen koon tai jos se ei sisällä huomattavan suurta määrää poikkeavaa geometriaa täytyy paikoitustarroja asettaa. Paikoitustarroja on hyvä asettaa vähintään kolme kappaletta alueelle, jonka skanneri näkee; tässä tapauksessa skannausalue on 390 mm x 390 mm.

**Skannerin kalibrointi** tulee suorittaa yrityksen skannerilla vähintään seitsemän päivän välein. Ympäristön lämpötilan muuttuessa, laitteen sisäisiin tai ulkoisiin komponentteihin kerääntyessä pölyä tai skannerin menettäessä ajan myötä tarkkuuttaan altistuessaan näille ja värinöille kalibroinnilla varmistetaan, että mittaustulokset pysyvät luotettavina



myös tulevaisuudessa. Creaformin skannerin mukana tulee kalibrintilevy, jolla skannerin voi kalibroida eri mittauskohteissa.

**Skannerin parametrien asettamisella** tarkoitetaan yrityksen laitteen kohdalla valotusarvon ja verkkoresoluution asettamista haluttuun arvoon. Mitattavasta kohteesta riippumatta skannerille pitää asettaa kappaleelle sopivat skannausparametrit. Käytetty resoluutio vaikuttaa skannattavasta kappaleesta muodostuvan STL-tiedoston mittatarkkuuteen, jossa pienempi resoluutio luo suuremman tiedoston joka sisältää enemmän dataa ja yksityiskohtia mittauksesta näin ollen kasvattaen skannauksen jälkiprosessointiaikaa. Valotusajalla tarkoitetaan skannerin sulkijan (shutter) valotusarvoa, joka riippuu kappaleen väristä ja materiaalista heijastavuuden kannalta. Tummat materiaalit vaativat suuremman valotusajan, sillä materiaali ei heijasta pienillä valotusarvoilla valoa takaisin skannerin kameralle, jolloin tiedonkeruuta kappaleen pinnasta ei tapahdu. Skannauksen aikana käyttäjä voi joutua muuttamaan skannerin parametrejä, jos kappale sisältää kontrastiltaan toisistaan suuresti poikkeavia materiaaleja.

**Kappaleen skannaus** suoritetaan viemällä skanneri lähelle skanneria ja aloittamalla skannaus Vxelements-ohjelmassa. Creaformin Go!Scan on tehty käyttäjäystävälliseksi skannerin paikoituksessa suhteessa skannattavaan kappaleeseen. Sopiva etäisyys (syväterävyys) on 450 mm kappaleesta. Skanneri myös ilmoittaa käyttäjälle sopivan skannausetäisyyden puna-sini -väriskaalalla, josta käyttäjän on helppo tulkita tietokoneen näyttöön katsomatta, tapahtuuko skannausta.

**Skannatun mallin eheyden tarkistamisessa** tarkastetaan, onko skannatussa mallissa mukana kaikki tarpeellinen tai onko siinä jotain, mitä siinä ei kuulu olla. Skannaus voi epäonnistua, jos paikoitustarroja ei ole tarpeeksi tai skanneri menettää muuten paikoituksensa suhteessa kappaleeseen. Tällöin malliin voi muodostua ylimääräisiä malleja päällekkäin, jotka sitten käsittelyvaiheessa sekoittavat mittaustulosten tarkastelua. Toinen ongelma saattaa olla kiiltäviä pintoja skannattaessa tuleva melu. Melulla tarkoitetaan kiiltävästä pinnasta skannerille lähtevää dataa, jonka skannerin algoritmi tulkitsee tarpeettomasti skannauspinnaksi.

**STL-tiedoston tallentaminen verkkolevylle** suoritetaan heti skannauksen prosessoinnin valmistuttua. Koska skannaukset voivat tapahtua riskialttiissa tiloissa, joissa ei aina välttämättä ole tukevaa jalustaa skannaustietokoneelle, tietokoneen vioittuminen tai mahdollinen hajoaminen tulee ottaa huomioon. Verkkolevyn käyttö

skannauksessa mahdollistaa myös skannausten tarkastelun muualla kuin samassa tilassa skannaustietokoneen kanssa. Yrityksellä ei ole käytössä Polyworks-ohjelmaan kellovia lisenssejä vaan lisenssit toimivat tietokoneeseen yhdistetyn USB-tikun kanssa, joten STL-tiedostojen tulisi olla saatavilla kaikkialla.

**Skannatun kappaleen vertailu 3D-malliin** tehdään Polyworks Inspector -ohjelmalla. Ohjelmalla on mahdollista tutkia joko STL-mallia suhteessa CAD-malliin tai eristää mittoja pelkästään STL-mallista. Mittaustulosten tarkastelu tehdään kappale- tai projektikohtaisesti riippuen siitä, mitä ollaan mittaamassa ja onko kyse tuotantoa ennen tapahtuvasta vastaanottotarkastuksesta vai vasta kehitysvaiheessa olevasta kappaleesta, jossa mittauskäytäntö ei ole vielä vakiintunut.

**Tulosten raportointi PDM:ään** tehdään PDF-muodossa. Kun kappaleesta on selvitetty halutut mitat ja niitä on verrattu yrityksen toleransseihin, mittaraportti viedään PDM:ään ja raportista ilmoitetaan mittadataa hyödyntäville henkilöille sähköpostitse.

#### 4.3 Kappaleen tarkastelu Polyworks-ohjelmassa

Yrityksellä on käytössään 3D-mallien tarkastelua varten Polyworks-ohjelmisto. Ohjelmisto Ohjelmaan on mahdollista tuoda kappaleiden 3D-malleja ja verrata näitä kyseisestä kappaleesta skannattuun STL-malliin. Ohjelma mahdollistaa useiden skannausten mittaseurannan ja näistä raportoimisen muille osastoille.

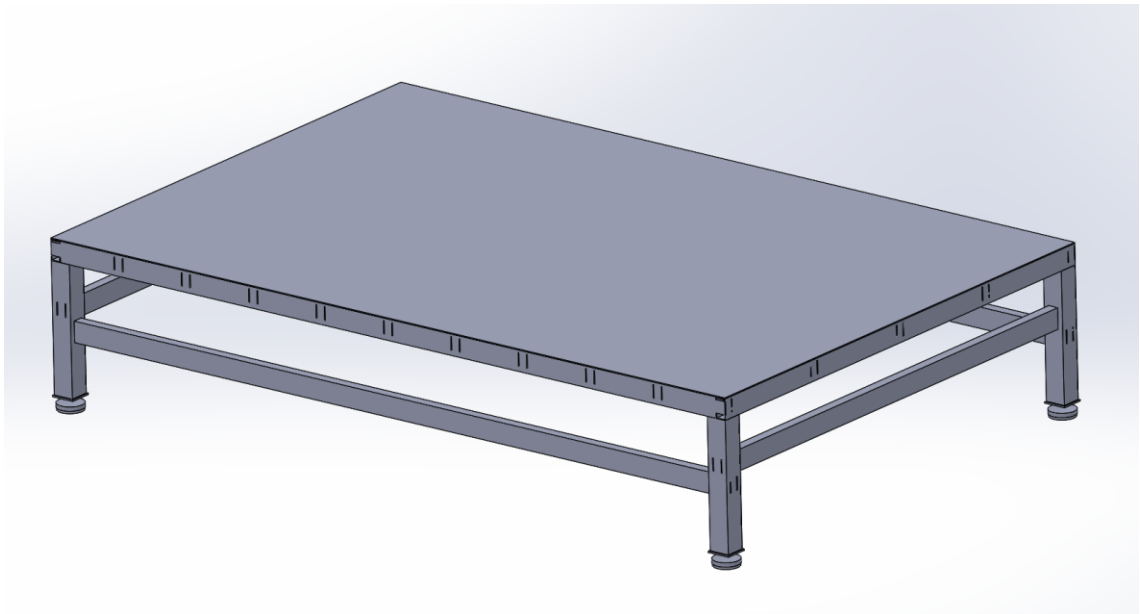
#### 4.4 Kiinteän mittauspaikan suunnittelu

Kappaleiden skannausta varten kohdeyritys halusi myös kiinteän mittauspaikan. Mittauspaikalla oli tarkoitus eliminoida kappaleen mittauspaikasta johtuvia virheitä ja parantaa mittausten työergonomiaa. Suurimmaksi ongelmaksi koettiin kappaleen asettuminen epätasaiselle pinnalle, jolloin kappaleen korkeusmittoihin voi tulla virhettä kappaleen mittauksessa, jos kappaleen pohjan ja alatasen väliin jää tyhjää tilaa. Tällöin skannauksen verkkoresoluutiosta riippuen skanneri voi yhdistää tyhjän tilan kappaleen alla kappaleesta muodostuvaan stl-tiedostoon, jolloin tiedosto ei vastaa todellisuutta. Kiinteä taso toimisi näin ollen referenssipintana, josta olisi mahdollisuus mitata kappaleen korkeusmittoja, kun virheen määrä pöydän pinnassa tiedettäisiin. Ennen

yrittäjä oli skannannut suuria komponentteja lähinnä lattialla, sillä riittävän tasomaista työpintaa ei ollut.

Mittauspöydälle annettiin seuraavat vaatimukset:

- Koko 3000 mm x 2000 mm
- Työkorkeus 550 mm - 600 mm
- Tasomaisuus alle 1 mm
- Kyky kantaa 200 kg kuorma alle 1 mm muodonmuutoksella



Kuva 4. Mittauspöydän CAD-malli

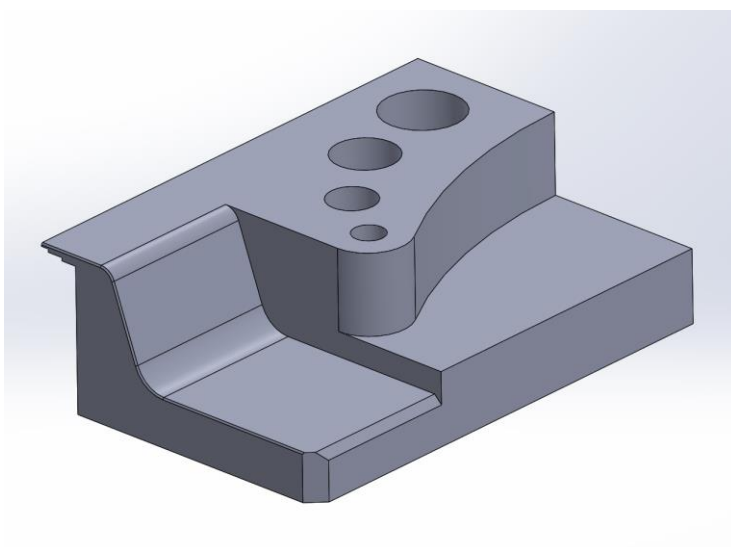
Mittauspöytä koostuu putkiprofiilirakenteesta ja teräslevypinnasta. Mittauspöytä suunniteltiin Solidworks-ohjelmistolla EN10219-putkiprofiilista sen saatavuuden ja hinnan vuoksi. Putkiprofiili olisi mahdollista laserleikata, jolloin pöydän rakenteen kokoonpano olisi helppoa. Pöytä haluttiin myös suhteellisen kevyeksi, jotta yrityksen rajallisilla tiloissa sitä olisi mahdollista siirtää. Yritys, jolta pöytää aiottiin ostaa ei osannut antaa tasomaisuusvaatimuksille takuita, joten rakenne olisi myös samalla kehitysprojekti, jossa nähtäisiin mihin tasomaisuuksiin hitsaamalla on mahdollista päästä näin suurella alueella. Pöytä rakenteen arvioitiin olevan tarpeeksi kevyt ja mutta silti rakenteellisesti luja, että pöytä taso olisi mahdollista vaihtaa tai suoristaa, mikäli tasomaisuutta ei saisi saavutettua.

## 5 VERTAILUMITTAUKSET

Skannerin valmistaja lupaa skannerille jo sertifioituja tarkkuuksia, mutta kohdeyritys halusi selvittää, kuinka hyvin nämä tarkkuudet pitävät paikkaansa. Vertailumittaukset myös antaisivat jonkinlaisen kuvan siitä, mitä toimenpiteitä skannerilta ja käyttäjältä vaaditaan äärimmäistä tarkkuutta haettaessa. Vertailumittaus toteutettiin skannaamalla ensin referenssikappale yrityksen skannerilla. Tämän jälkeen kappale skannattiin Turun ammattikorkeakoulun tiloissa Zeiss T-Scan -skannerilla ja mitattiin Koneteknologiakeskuksen Zeiss Prismo Ultra -koordinaattimittauskoneella. Skannauksesta muodostettavia STL-malleja verrattiin keskenään suhteessa referenssikappaleeseen ja koordinaattimittauskoneen antamiin tuloksiin. Ensimmäiset kaksi skannausta tehtiin yrityksen skannerilla ja kolmas skannaus tehtiin T-Scanilla.

### 5.1 Mittakappaleen suunnittelu

3D-skanneria varten suunniteltiin polyasetaalista valmistettu referenssikappale. Kappaleella oli tarkoitus varmistaa skannerin ja mittaohjelmistosta saatavien tulosten tarkkuus. Mittakappaleelle suunniteltiin mitattaville kohteille ominaisia muotoja, joita olivat muun muassa reiät, kaarevat pinnat, pyöristykset ja terävät kulmat. Mittakappale valmistettiin polyasetaalista koneistamalla, sillä tästä oli mahdollista valmistaa suuriakin kappaleita ilman että hinta ja kappaleen paino olisivat kasvaneet suuriksi.



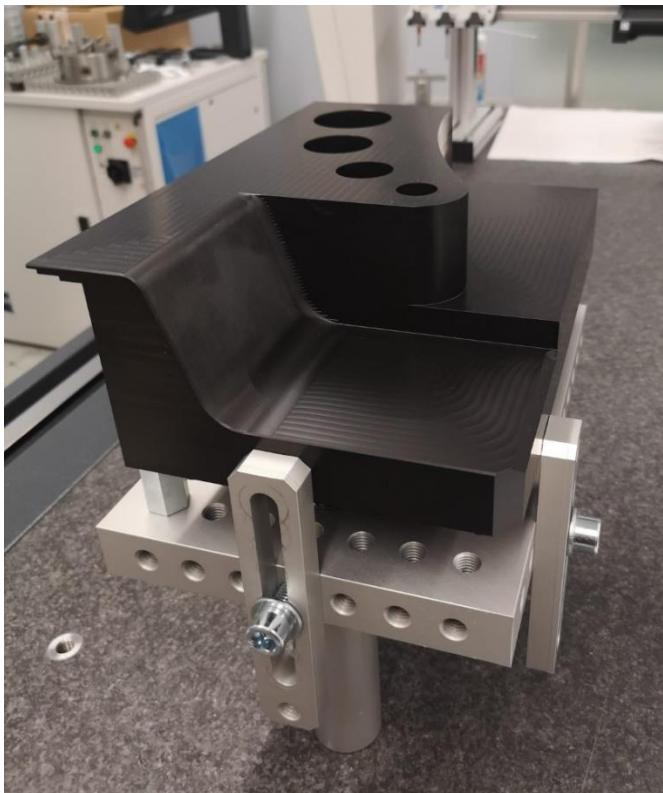
Kuva 5. Mittakappale Solidworks-ohjelmassa.

Mittakappaleen suunnittelua helpotti se, ettei kappaletta tarvinnut koneistaa absoluuttisesti oikeisiin mittoihin. Kappaleen absoluuttisten mittojen tarkastelu tehtiin koordinaattimittauskoneella, jolloin mittauksesta saatavia tuloksia voitaisiin vertailla skannerin antamiin tuloksiin.

## 5.2 Mittaukset

### **Koordinaattimittauskone**

Mallikappale mitattiin Turussa sijaitsevassa Koneteknologiakeskuksen Zeiss Prismo Ultra -koordinaattimittauskoneella. Ympäristön lämpötila oli skannatessa 20 astetta. Liitteessä 2 on ilmoitettu lävistäjämitat, halkaisijat ja pyöristykset, joita koneella mitattiin. Kuvassa 6 näytetään mittakappaleen asemointi mittausta varten.



Kuva 6. Mittakappale koordinaattimittauskoneella (Jarkko Korhonen)

Koordinaattimittauskoneella saataisiin tarpeeksi tarkka tieto mittakappaleen koosta ja muodosta. Tämä antaisi hyvin tietoa pintojen tasomaisuuksista ja äärimitoista. Tuloste mittaustuloksista liitteessä X.

### **Skannaus Go!Scan:lla**

Skannauksia otettiin yrityksen laitteella yhteensä kaksi kappaletta. Ensimmäinen skannaus tehtiin 0,2 mm verkkoresoluutiolla 22 asteen lämpötilassa ja toinen 0,5 mm resoluutiolla 18 asteen lämpötilassa. Skannaukset poikkesivat toisistaan siten, että 0,2 mm resoluution skannaus piti tehdä yhdellä skannauksella, jolloin kappaleen alapinta jäi osin skannaamatta. Tietokoneen suorituskyky ei riittänyt yhdistämään useammasta skannauksesta koostuvaa kappaletta tällä resoluutiolla. Tällöin kappale piti tukea pohjastaan siten, että mahdollisimman suuri osa kappaletta olisi näkyvässä. 0,5 mm verkkoresoluution skannaus tehtiin roikottamalla kappaletta, jotta kappaleen saisi skannattua kerralla kauttaaltaan.

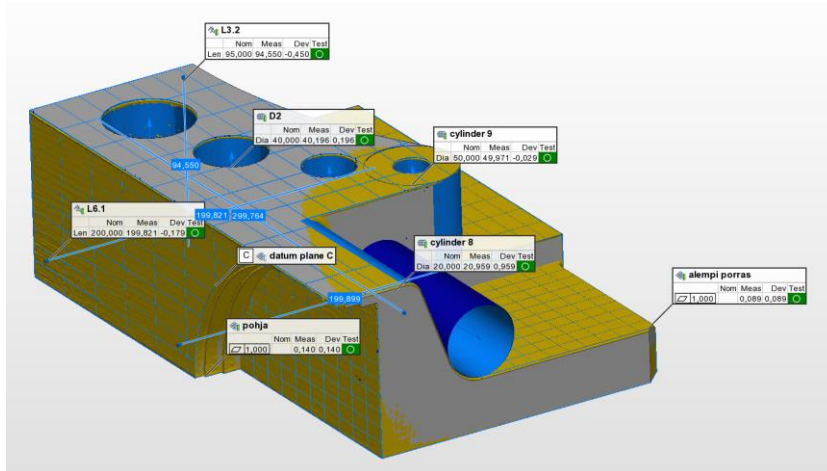
### **Skannaus Turun Ammattikorkeakoululla**

Mittakappaleen skannaus suoritettiin Zeiss T-Scan -skannerilla. Skannerin toiminta perustuu valon kolmiomittaukseen, jossa skanneri heijastaa kappaleelle näkyvän laserviivan. Skannerin toiminta poikkeaa kohdeyrityksen käyttämästä Go!Scan skannerista, joten se on hyvä vertailukohde yritykselle. Zeiss T-Scan -skannerille ei anneta ollenkaan volumetristä tarkkuutta. Tämä johtuu siitä, että skannerin paikoitusmenetelmä ei vaadi mittauskappaleeseen asetettavia paikoitustarroja, vaan skannerin paikoitus tapahtuu T-Scan -laitteistossa paikoituskameralla. Kameran täytyy nähdä skanneri skannaustapahtuman aikana, jolloin laitteisto osaa paikoittaa skannatun alueen 3D-mallin.

### **5.3 Tulokset**

Skannaustulosten vertailu suoritettiin Polyworks-ohjelmistolla. Ensimmäiselle skannaukselle annettiin mitat, joita kappaleesta haluttiin eristää. Tämän jälkeen loput skannaukset voitiin tuoda ohjelmistoon ja paikoittaa nämä samalla menetelmällä, kuin ensimmäinen kappale. Skannatut mallit paikoitettiin suhteessa 3D-malliin painoarvoilla niin että mittakappaleen pohjalla olisi suurin painoarvo STL-mallin paikoittumisessa. Tällä pyrittiin saamaan lineaarimittojen kohtisuoruus riittävän hyväksi vertailua varten. Ongelmaksi skannausten vertailussa muodostui sylinterielementin käyttö ohjelmistolla.

Ohjelmisto tulkitsee liian monta pistettä skannauksen pyörityksistä, jolloin pyörityksen pisteitä jouduttiin karsimaan siten, että sylinteri silmämääräisesti vastaisi STL-mallin pyöritystä. STL-malleista ja koordinaattimittauskoneen tulokset kerättiin excel- taulukkoon, jossa skannauksia verrattiin koordinaattimittauskoneen tuloksiin.



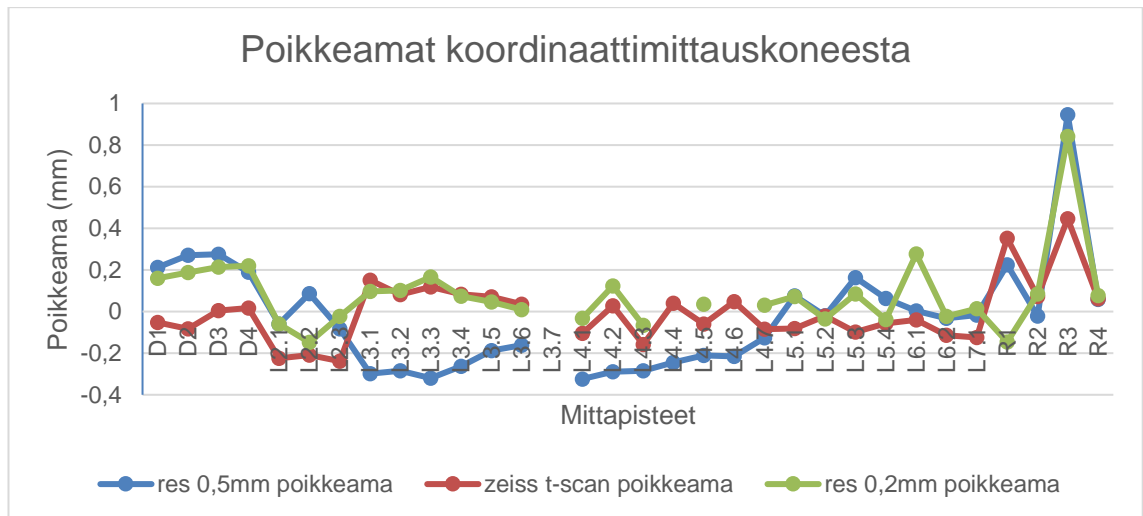
Kuva 7. Näkymä mittakappaleesta Polyworks-ohjelmistosta.

Kaikkia skannauksia ei ollut mahdollista toteuttaa samassa lämpötilassa, jolloin mittaustulokset saattaisivat poiketa toisistaan. Excel-taulukkolaskentaohjelmassa lämpötilan vaikutus mittaustuloksiin pyrittiin kompensoimaan lineaarisen lämpölaajenemiskaavan avulla.

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0$$

Kaava 1. Lineaarinen lämpölaajeneminen

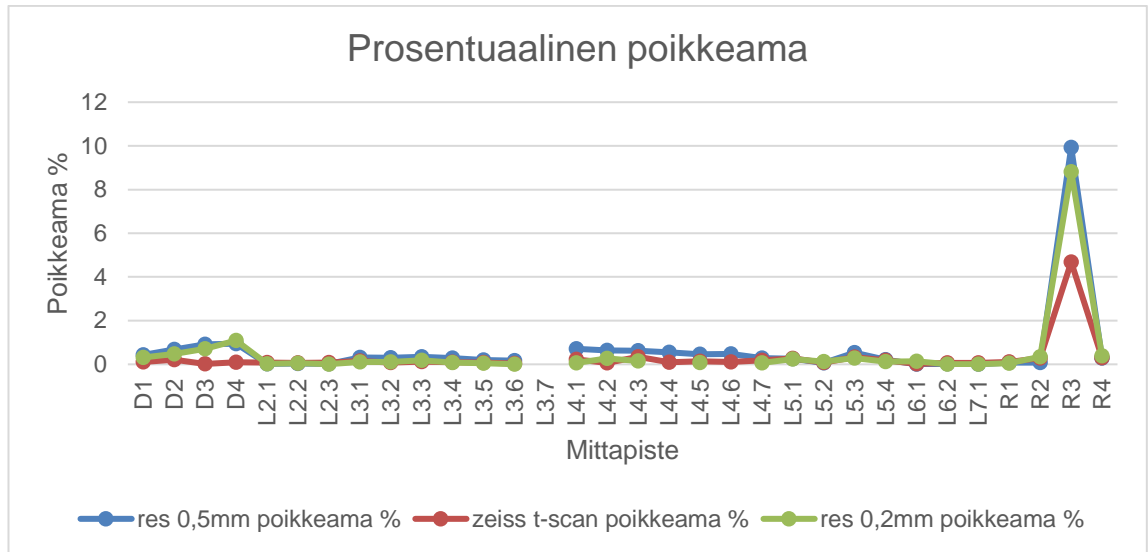
Kuviossa 2 on vertailtu eri skannauksista saatuja mittoja koordinaattimittauskoneen antamiin tuloksiin. Kuviossa nominaalina toimii koordinaattimittauskoneen mitat eri pisteistä. Mittauspisteet on nimetty mittojen ominaisuuksien mukaan, jossa L-mitat edustavat lineaarimittoja, D-mitat halkaisijoita, ja R-mitat pyörityksiä. Mittauspisteestä L3.7 ei ole tietoa saatavilla, sillä se jäi katvealueella 0,2 mm resoluution skannauksessa. Tämän takia mittaa ei haluttu ottaa mukaan vertailuun.



Kuvio 2. Poikkeamat koordinaattimittauskoneesta.

Lineaarimittojen poikkeamat Res 0,5 ja res 0,2 skannauksissa sijoittuvat 0,28 mm ja -0,32 mm sisään. Poikkeuksena tästä on pyöristys R3. Poikkeamaa voi selittää Polyworks ohjelmistossa se, että pyöristykset piti mitata sylinterityökälulla. Sylinterityökälun paikoittaminen pyöristykseen ja pyöristyksessä olevaan dataan oli hankalaa, sillä ohjelmisto laskee mukaan pyöristyksien vieressä olevia suoralla tasolla sijaitsevia mittapisteeitä halkaisijaan.





Kuvio 3. Skannausten prosentuaalinen poikkeama

Skannausten prosentuaalisessa poikkeamassa mittavirheen absoluuttista määrää verrattiin koordinaattimittauskoneen antamiin lukemiin. Suurin virhe on R3 mitassa. Tämä voi selittyä samasta syystä kuin aikaisemmin mainittu sylinterityökalun käyttö. Kuvaaja näyttää että mittakappaleen tapauksessa 100x200x300 kokoisen kappaleen mittauksessa päästään ainakin 0,3 mm tarkkuuteen. Ottaen huomioon että vertailumittauksia ei tehty samoissa olosuhteissa kuin koordinaattimittausta, on tulos hyvä. Myöskään skannerin valotusarvolle ei tehty vertailua, miten tämä vaikuttaisi tulokseen. Tuloksista voidaan ainakin päätellä, että pyörityksiä ja reikiä tarkastellessa käyttäjän täytyy kiinnittää erityistä huomiota siihen, miten mittoja eristetään ja mitä pisteitä mitataan Polyworks-ohjelmistossa.

## 6 JOHTOPÄÄTÖS

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda perusta yrityksen skannaustoiminnalle. Tämä tapahtui selvittämällä yleisiä skannausmenetelmiä ja tutustumalla skannauksen teoriaan. Skannausteoriasta kävi miten eri skannerit toimivat ja mihin sovelluksiin nämä soveltuvat parhaiten. Tämä auttoi muodostamaan pohjan sille, mitä yrityksen skannerilla voitaisiin skannata ja millaisissa olosuhteissa. Kun skannerin toimintaperiaate oli selvillä ja skannerilla oli skannattu referenssikappaleet useampaan kertaan, saatiin hyvä kuva siitä, mitä toimenpiteitä käyttäjältä vaaditaan kappaleiden skannaamiseen ja miten hankalia elementtejä on helppo lähestyä. Opinnäytetyössä onnistuttiin luomaan prosessi, jota käyttäjän on helppo seurata skannatessaan yrityksen komponentteja tai tehdessään mittauksia alihankkijalla. Nyt yrityksellä on käytössään mittauspöytä, jota voidaan hyödyntää kappaleiden skannauksessa. Mittalaitteen tarkkuutta onnistuttiin vertailemaan koordinaattikoneen arvoihin. Haastavinta työssä oli työn laajuus ja mittausten vertailu. Työhön liittyi skanneriprosessin kehittäminen ja mittauspöydän suunnittelu, jotka olisi voitu eristää omiin kokonaisuuksiin vieläkin paremmin. Skannerin tarkkuuden selvittäminen osoittautui hankalaksi, sillä tutkimusasetelmaa ei ollut määritelty tarpeeksi tarkasti työtä aloittaessa. Tämän takia skannerin mittavertailusta saatuja tuloksia voidaan pitää parhaimmillaankin vain suuntaa antavana.

Työ antoi yritykselle kallisarvoista tietoa, miten se tulee toimimaan tulevaisuudessa skannereiden kanssa. Vertailumittaukset osoittivat tarpeen tutkia skannerin tarkkuutta lisää ja toteuttaa skannerilla Gage R&R -tutkimus. Vaikka tulokset eivät vastanneet odotusta, voidaan skannerin tarkkuuden katsoa olevan riittävän hyvä yrityksen käyttöön, sillä kappaleita voi joutua skannaamaan missä vain, jolloin ympäristönä ei koskaan toimi vakiolämpötilassa oleva mittauslaboratio. Tulevaisuudessa yritys voisi myös harkita käyttävänsä koskettavaa 3D-skannausta, sillä kerättävän datan määrä ei-koskettavassa 3D skannauksessa on suurempi ja enemmän aikaavievä prosessi. Tällöin koko kappaletta ei tarvitsisi skannata, vaan riittävää olisi vain haluttujen alueiden mittaaminen. Myös mittaukset vakiokappaleille pystyttäisiin suorittamaan nopeammin.

Työ jatkuu yrityksen sisäisten skanneriohjeiden laatimisella ja skannausprosessin jatkokehittämisellä.

## LÄHTEET

*3D Laser Scanner's Techniques Overview*. **Ebrahim, Mostafa A-B. 2015.** 10, 2015, Vol. 4.

3dnatives. *Laser 3D-skanneri vs. structured light-skanneri*. Viitattu 22.4.2020 <https://www.3dnatives.com/en/laser-3d-scanner-vs-structured-light-3d-scanner-080820194/>.

**Creaform.** Go!Scan 3D. *Creaform*. Viitattu 22.4.2020 <https://www.creaform3d.com/en/handheld-portable-3d-scanner-goscan-3d/technical-specifications>.

**Daneshmand, Morteza, et al. 2018.** *3D Scanning: A Comprehensive Survey*. 2018.

How to choose a 3D scanner for 3D printing. *Formlabs*. Viitattu 22.4.2020 <https://formlabs.com/uk/blog/how-to-choose-a-3d-scanner-for-3d-printing/>.

**Siemens.** Product Data Management. *Siemens*. Viitattu 15.5.2020 <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/product-data-management/13214>.

STL File Format. *All3DP*. Viitattu 05.05.2020 <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>.

Time of flight principle. *Terabee*. Viitattu 20.4.2020 <https://www.terabee.com/time-of-flight-principle/>.

*Use of photogrammetry in 3D modeling and visualization of buildings*. **M. Shashi, Kamal Jain.** 2, s.l. : ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 2.

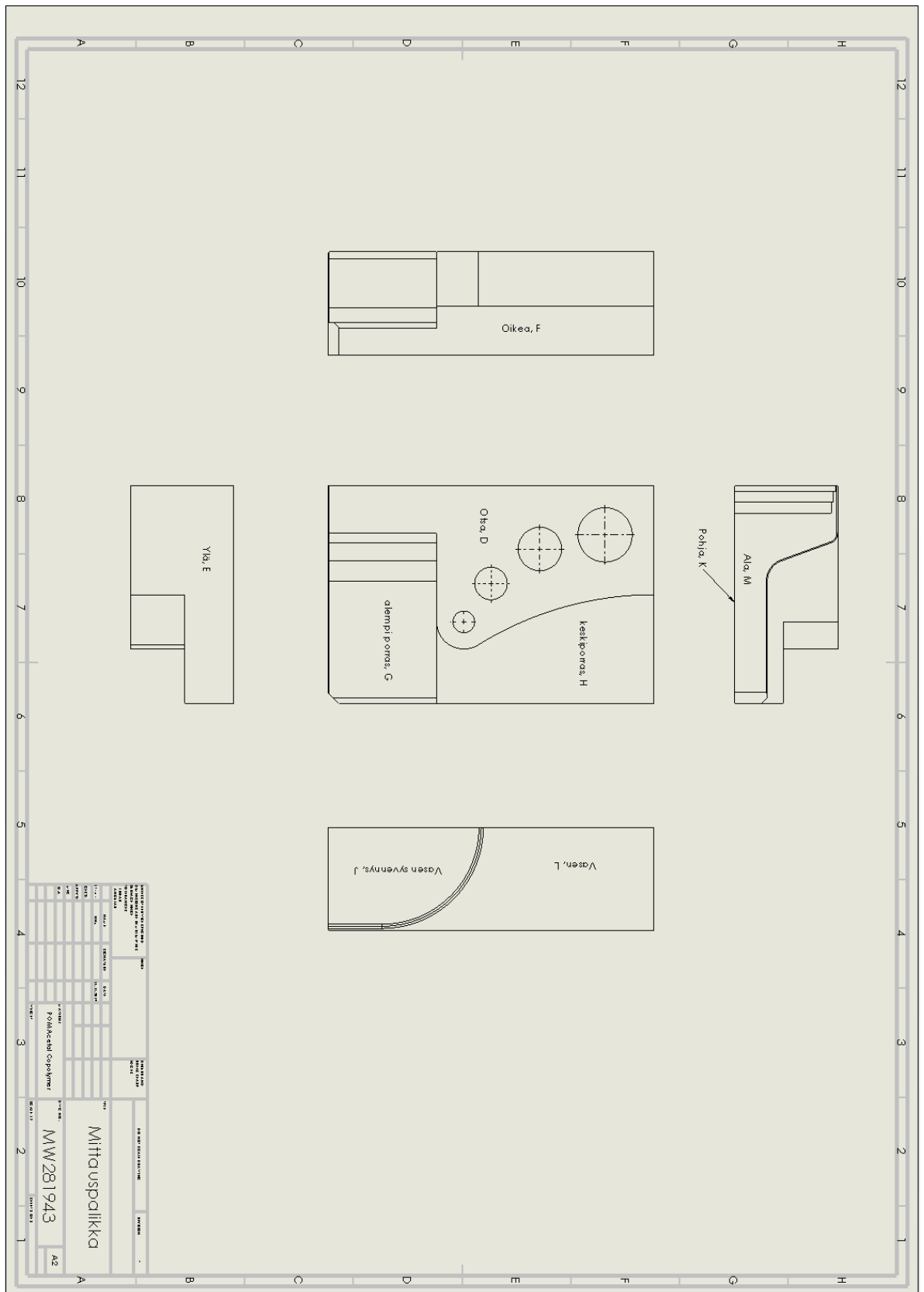
## Skannerin tekniset ominaisuudet (Creaform)

Tarkkuus	Jopa 0,050mm
Volumetrinen tarkkuus	0,050mm + 0,150mm/m
Volumetrinen tarkkuus MaxSHOT Next™   Elite -laitteella	0,050mm + 0,015mm/m
Mittausresoluutio	0,100mm
Verkkoresoluutio	0,200mm
Näytteenottonopeus	1500000 mittausta/s
Valonlähde	Valkoinen valo (99 raitaa)
Paikannusmenetelmät	Geometria ja/tai värit ja/tai paikoitustarrat
Skannausalue	390x390mm
Skannauskorkeus	400mm
Syväterävyys	450mm
Suosittelun osan koko	0,1-4m
Tekstuuritarkkuus	50-200 DPI
Tekstuurin värit	24 bit
Ohjelmisto	VXelements
Tulosteformaattit	.dae, .fbx, .ma, .obj, .ply, .stl, .txt, .wrl, .x3d, .x3dz, .zpr, .3mf
Yhteensopivat ohjelmistot	3D Systems (Geomagic® Solutions), InnovMetric Software (PolyWorks), Metrologic Group (Metrolog X4), New River Kinematics (Spatial Analyzer), Verisurf, Dassault Systèmes (CATIA V5, SOLIDWORKS), PTC (Creo), Siemens (NX, Solid Edge), Autodesk (Inventor, PowerINSPECT)
Paino	1,25
Mitat	89 x 114 x 346 mm
Liitäntä	1 X USB 3.0
Käyttölämpötila	5-40 °C
Kosteusprosentti	10-90%

Sertifikaatit	EC Compliance (Electromagnetic Compatibility Directive, Low Voltage Directive), compatible with rechargeable batteries (when applicable), IP50, WEEE
Patentit	CA 2,600,926, CN 200680014069.3, US 7,912,673, EP (FR, UK, DE) 1,877,726, AU 2006222458, US 8,032,327, JP 4,871,352, EP (FR, UK, DE) 2,278,271, IN 266,573, US 7,487,063, CA 2,529,044, CA 2,810,587, US 8,836,766, JP 5,635,218, CA 2,875,754, EP (FR, UK, DE) 2,751,521, US 9,325,974, CA 2,835,306, CN 201280023545.3, CN 201280049264.5, JP 6,025,830, EP (FR, UK, DE) 2,875,314, CN ZL 201380029999.6, JP 6,267,700, EP (FR, UK, DE) 3,102,908, US 15/114,563, CN 201580007340X



# Mittakappaleen tasot



## Mittadata

				lämpötilat			
				18	22	24	20
Units	Object	Control	Nomina	res 0,5mn	zeiss t-scar	res 0,2mn	CMM
Millimeter	D1	Diameter	50	50,15	49,915	50,142	49,952
Millimeter	D2	Diameter	40	40,196	39,865	40,149	39,9368
Millimeter	D3	Diameter	30	30,219	29,967	30,185	29,9531
Millimeter	D4	Diameter	20	20,189	20,03	20,238	20,0065
Millimeter	L2.1	Length	300	299,764	299,78	300,035	299,9145
Millimeter	L2.2	Length	300	299,813	299,698	299,849	299,8169
Millimeter	L2.3	Length	300	299,712	299,736	300,042	299,8844
Millimeter	L3.1	Length	95	94,505	95,011	94,986	94,832
Millimeter	L3.2	Length	95	94,55	94,972	95,021	94,8626
Millimeter	L3.3	Length	95	94,515	95,01	95,087	94,8636
Millimeter	L3.4	Length	95	94,586	94,989	95,009	94,878
Millimeter	L3.5	Length	95	94,598	94,913	94,918	94,8142
Millimeter	L3.6	Length	95	94,691	94,945	94,948	94,8813
Millimeter	L3.7	Length	95	94,587	94,944		
Millimeter	L4.1	Length	45	45,05	45,296	45,383	45,3875
Millimeter	L4.2	Length	45	44,755	45,099	45,208	45,0572
Millimeter	L4.3	Length	45	45,071	45,224	45,33	45,3688
Millimeter	L4.4	Length	45	44,764	45,076		45,0225
Millimeter	L4.5	Length	45	45,111	45,29	45,399	45,3359
Millimeter	L4.6	Length	45	44,8	45,09		45,0295
Millimeter	L4.7	Length	45	45,16	45,229	45,357	45,2993
Millimeter	L5.1	Length	30	30,312	30,173	30,336	30,2462
Millimeter	L5.2	Length	30	29,988	30,004	29,999	30,0165
Millimeter	L5.3	Length	30	30,449	30,206	30,398	30,2947
Millimeter	L5.4	Length	30	30,105	30,003	30,03	30,0506
Millimeter	L6.1	Length	200	199,821	199,898	200,275	199,8782
Millimeter	L6.2	Length	200	199,899	199,936	200,087	199,9905
Millimeter	L7.1	Length	175	174,784	174,78	174,972	174,8526
Millimeter	R1	Diameter	612,5	306,1335	306,4455	306,038	306,0011
Millimeter	R2	Diameter	50	24,9855	25,0935	25,1145	25,0142
Millimeter	R3	Diameter	20	10,4795	9,985	10,383	9,5357
Millimeter	R4	Diameter	40	20,4645	20,48	20,5025	20,4125
Millimeter	S1	Length	65	64,54	64,996	64,991	
Millimeter	S2	Length	65	64,583	64,994		
Millimeter	S3	Length	65	64,698	64,981		
Millimeter	S4	Length	65	65,04	65,033		



muutos			
	2	-2	-4
<b>res 0,5mm korjattu</b>	<b>zeiss t-scan korjattu</b>	<b>res 0,2mm korjattu</b>	
50,165045	49,9000255	50,1119148	
40,2080588	39,8530405	40,1249106	
30,2280657	29,9580099	30,166889	
20,1950567	20,023991	20,2258572	
299,8539292	299,690066	299,854979	
299,9029439	299,6080906	299,6690906	
299,8019136	299,6460792	299,8619748	
94,5333515	94,9824967	94,9290084	
94,578365	94,9435084	94,9639874	
94,5433545	94,981497	95,0299478	
94,6143758	94,9605033	94,9519946	
94,6263794	94,8845261	94,8610492	
94,7194073	94,9165165	94,8910312	
45,063515	45,2824112	45,3557702	
44,7684265	45,0854703	45,1808752	
45,0845213	45,2104328	45,302802	
44,7774292	45,0624772		
45,1245333	45,276413	45,3717606	
44,81344	45,076473		
45,173548	45,2154313	45,3297858	
30,3210936	30,1639481	30,3177984	
29,9969964	29,9949988	29,9810006	
30,4581347	30,1969382	30,3797612	
30,1140315	29,9939991	30,011982	
199,8809463	199,8380306	200,154835	
199,9589697	199,8760192	199,9669478	
174,8364352	174,727566	174,8670168	
306,2253401	306,3535664	305,8543772	
24,99299565	25,08597195	25,0994313	
10,48264385	9,9820045	10,3767702	
20,47063935	20,473856	20,4901985	

res 0,5mm p	zeiss t-scan p	res 0,2mm p	res 0,5mm p	zeiss t-scan p	res 0,2mm p
0,213045	-0,0519745	0,1599148	0,426499439	0,104048887	0,320136931
0,2712588	-0,0837595	0,1881106	0,679220168	0,209730124	0,471020713
0,2749657	0,0049099	0,213789	0,917987454	0,016391959	0,713745823
0,1885567	0,017491	0,2193572	0,942477195	0,087426586	1,09642966
-0,0605708	-0,224434	-0,059521	0,020196023	0,074832661	0,019845989
0,0860439	-0,2088094	-0,1478094	0,028698816	0,06964564	0,049299889
-0,0824864	-0,2383208	-0,0224252	0,027506066	0,079470889	0,007477948
-0,2986485	0,1504967	0,0970084	0,31492376	0,158698224	0,102295006
-0,284235	0,0809084	0,1013874	0,299628094	0,085290093	0,106878159
-0,3202455	0,117897	0,1663478	0,337585228	0,124280546	0,17535472
-0,2636242	0,0825033	0,0739946	0,277855983	0,08695725	0,077989207
-0,1878206	0,0703261	0,0468492	0,198093324	0,07417254	0,049411586
-0,1618927	0,0352165	0,0097312	0,170626562	0,037116376	0,010256183
-0,323985	-0,1050888	-0,0317298	0,713819884	0,231536877	0,069908675
-0,2887735	0,0282703	0,1236752	0,640904228	0,062743135	0,274484877
-0,2842787	-0,1583672	-0,065998	0,626595149	0,349066319	0,145470015
-0,2450708	0,0399772		0,544329613	0,088793825	
-0,2113667	-0,059487	0,0358606	0,466223677	0,131213895	0,079099786
-0,21606	0,046973		0,479818785	0,104316059	
-0,125752	-0,0838687	0,0304858	0,277602524	0,185143479	0,067298612
0,0748936	-0,0822519	0,0715984	0,247613254	0,271941269	0,236718662
-0,0195036	-0,0215012	-0,0354994	0,064976263	0,071631269	0,118266287
0,1634347	-0,0977618	0,0850612	0,539482814	0,322702651	0,280779146
0,0634315	-0,0566009	-0,038618	0,211082308	0,18835198	0,128509913
0,0027463	-0,0401694	0,276635	0,001373987	0,020096939	0,138401787
-0,0315303	-0,1144808	-0,0235522	0,015765899	0,057243119	0,011776659
-0,0161648	-0,125034	0,0144168	0,009244815	0,07150823	0,008245116
0,22424005	0,35246635	-0,1467228	0,073280799	0,115184668	0,047948455
-0,02120435	0,07177195	0,0852313	0,084769251	0,286924827	0,340731664
0,94694385	0,4463045	0,8410702	9,930512181	4,680353828	8,820225049
0,05813935	0,061356	0,0776985	0,28482229	0,300580527	0,380641764