

Jani Hokkanen

# Tukilaakerin käänteinen suunnittelu ja tulostus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

14.5.2018

Tekijä Otsikko	Jani Hokkanen Tukilaakerin käänteinen suunnittelu ja tulostus
Sivumäärä Aika	26 sivua 14.5.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotantotekniikka
Ohjaajat	Lehtori Tero Karttiala Lehtori Markku Saarnio
<p>Insinööriyö toteutettiin yhteistyössä ammattikorkeakoulu Metropolian kanssa. Työn tavoitteena oli valmistaa valitusta kappaleesta uusi samanlainen kappale käänteistä suunnittelua apuna käyttäen ja vertailla kahta eri koordinaattimittauskoneella tapahtuvaa mittausta.</p> <p>Koordinaattimittaus tehtiin koululta löytyvällä Hexagon Global Performance -laitteella koskettavalla mittapäällä. Mittauksista saatujen tiedostojen avulla kappaleesta tehtiin 3D-malli Catia -mallinnusohjelmalla. 3D-malli siirrettiin tulostusohjelmaan, minkä jälkeen kappale tulostettiin koulun Objet Eden 260V 3D-tulostimella.</p> <p>Työn teoriaosioissa käsitellään koordinaattimittausa ja mittauksen eri tapoja sekä tarkastellaan 3D-tulostusta ja sen periaatteita. Aineistona käytettiin alan kirjallisuutta ja tuotevalmistajien manuaaleja sekä materiaaleja. Myöskin muutamasta aiemmasta kyseiseen aiheeseen liittyvästä insinööriyöstä on otettu tietoja.</p> <p>Työn tuloksena saatiin hyvä mitoiltaan alkuperäistä kappaletta vastaava kappale. Kahden eri mittaustavan vertailu koordinaattimittauskoneella jäi hieman vajavaiseksi, johtuen työn tekemisestä vain koskettavalla mittaustavalla. Tämä tapa oli toki järkevä kyseisessä kappaleessa, jolloin mallinnus on nopeampaa. Vaativammissa kappaleissa paremman lopputuloksen saa mittaamalla kappaleen laseranturilla.</p>	
Avainsanat	Käänteinen suunnittelu, koordinaattimittaus, mallintaminen, 3D-tulostus

Author Title	Jani Hokkanen Bearing Reverse Engineering and Printing
Number of Pages Date	26 pages 14 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Specialisation option	Production Engineering
Instructors	Tero Karttiala, Senior Lecturer Markku Saarnio, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was carried out in co-operation with Metropolia University of Applied Sciences. The aim of the thesis was to reproduce the selected specimen by reverse engineering and to compare two different measurement methods using a coordinate measuring machine.</p> <p>Coordinate measurements were made on Hexagon Global Performance device with a touching probe. A 3D model was created from the measurement data using Catia modeling program. The model was then transferred to the printing program and printed with the Objet Eden 260V 3D printer.</p> <p>The theoretical part of the thesis evaluates related literature from the corresponding field as well as manufacturers' manuals and other materials. Furthermore, another Bachelor theses related to the subject has been used as a reference.</p> <p>As a result of the thesis, a good replica of the original specimen was produced. As the work was done only by the touching measurement method, no comprehensive comparison between the two methods was performed. The used method was, of course, well suited for the corresponding geometry making the modeling faster. In more demanding samples, a better result can be obtained by using a laser sensor for the measurements.</p>	
Keywords	reverse engineering, coordinate measuring, modeling, 3D-printing

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Koordinaattimittaus	2
2.1	Mittausta koskevat vaatimukset	2
2.2	Käsivarrellinen mittalaite	4
2.3	Koordinaattimittauskone	5
2.3.1	Yleinen toimintaperiaate	5
2.3.2	Koskettava mittaustapa	7
2.3.3	Lasermittaus	9
3	Kappaleen mittaaminen	11
4	Mallinnus	14
5	3D-tulostus	18
5.1	Kappaleen tulostaminen	20
5.2	Lopputulos	23
6	Yhteenveto	25
	Lähteet	26

## Lyhenteet

AD	Additive Manufacturing
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CAD	Computer-aided Design
CMM	Coordinate Measuring Machine, koordinaattimittauskone
ILAC	The International Laboratory Accreditation Cooperation
ISO	International Organisation for Standardisation
NC	Numerical Control
OIML	The International Organisation of Legal Metrology
$\mu\text{m}$	Mikrometri, millimetrin tuhannesosa

## 1 Johdanto

Tämä insinööriö tehtiin yhteistyössä Metropolia Ammattikorkeakoulun kanssa.

Työn tavoitteena oli vertailla kahta eri konepajateknistä mittaustapaa, ja käänteistä suunnittelua käyttäen valmistaa jo olemassa olevasta kappaleesta uusi kappale. Työssä keskitytään Hexagon Global Performance -koordinaattimittauskoneella suoritettuun mittaukseen ja sillä saatujen tietojen perusteella tehtävään CAD-mallintamiseen. Lisäksi perehdytään 3D-tulostamiseen ja Objet Eden260V -koneeseen.

Käänteinen suunnittelu tarkoittaa takaisinmallinnusta jo olemassa olevasta kappaleesta, josta selvitetään kappaleen muoto ja malli. Koordinaattimittauskoneella suoritettun 3D-skannauksen avulla voidaan luoda 3D-malli, jonka voi tulostaa 3D-tulostimella uudeksi kappaleeksi.

Aluksi työssä mitattiin kappale koulun käytössä olevalla koneella. Tästä saatiin mitat ja pisteet, jotka voitiin siirtää 3D-mallinnusohjelmaan. Samalla paneuduttiin kahteen eri mittaustapaan, jotka voidaan koordinaattimittauskoneella suorittaa.

Seuraavaksi mittaustulokset tuotiin Catia V5 -ohjelmaan, jolla kappale voidaan mallintaa. Mallintamisen jälkeen tiedosto tallennettiin 3D-tulostimelle sopivaan muotoon ja kappale voitiin tulostaa.

Lopuksi käsiteltiin 3D-tulostuksen (additive manufacturing) toimintaa, materiaaleja sekä erilaisia asetuksia ja menetelmiä, ja kappale tulostettiin koulun käytössä olevalla printterillä.

## 2 Koordinaattimittaus

### 2.1 Mittausta koskevat vaatimukset

Yleisimmät mittausvälineet ovat käsikäyttöisiä, mutta nykyään moniin mittauslaitteisiin on saatavilla automatiikkaa, kuten tietokoneohjattuja ohjelmia ja NC-ohjaimia. Vaikkakin moderni digitalisoitunut tekniikka on yleistynyt, se ei tarkoita että voitaisiin ohittaa mittauksen perusperiaatteita kuten lämpöpiteneminen, laitteiden stabiilius, mittauskosketus ja -asento. Nykyaikaisissakin laite- ja konerakenteissa on silti ratkaistava oikein nämä vanhanaikaiset perusasiat. [1.]

Koordinaattimittaus tarkoittaa 3D-avaruudessa tai 2D-tasossa tapahtuvaa mittauksia. Tietokoneelle mitataan ainoastaan pisteitä, joiden avulla saadaan kappaleesta tehtyä 3D-mallintamiseen tarkoitettua ohjelmalla malli. Mittaaminen on tarkkaa, ja mittaus- ja kalibrointitoiminnassa ympäristöolosuhteilla voi olla suuri merkitys. Mittaustiloihin on olemassa erilaisia olosuhdevaatimuksia riippuen tietenkin kuinka vaativa mittaus on. Taulukossa 1 näkyy eri olosuhdevaatimuksia.

Taulukko 1: Olosuhdevaatimukset mittaustiloissa [1].

Ominaisuus	Korketasoinen kalibrointi	Vaativat mittaukset ja kalibroinnit	Normaalit mittaukset ja vaatimattomat kalibroinnit	Välttävät mittaukset	
Lämpötila työtasossa	20 °C ± 0,5 °C	20 °C ± 1 °C	19 ... 24 °C	15 ... 25 °C	
Lämpötilaerot tilan eri osissa	Maks. 0,6 °C	Maks. 2 °C	Maks. 4 °C	-	
Lämpötilan vaihtelu tunnissa	Maks. 0,1 °C	Maks. 0,3 °C	Maks. 1 °C	Maks. 1,5 °C	
Lämpötilan vaihtelu vuorokaudessa	Maks. 0,6 °C	Maks. 1 °C	-	-	
Ilman suhteellinen kosteus	35 ... 55 %	35 ... 55 %	20 ... 70 %	Maks. 80 %	
Värähtelyt	Amplitudi/ Taajuus	0,25 µm/200 Hz ... 3 µm/5 Hz	1 µm/20Hz ... 3 µm /10Hz	Ei selvästi havaittavaa tärinää	Ei selvästi häiritsevää tärinää
Valaistus		800 ... 1000	800 ... 1000	800 ... 1000	500 ... 1500
Puhtaus	Koko Määrä	< 0,5 µm 3 x 10 <sup>7</sup> kpl/m <sup>3</sup>	< 5 µm 1 x 10 <sup>7</sup> kpl/m <sup>3</sup>	Puhtaudesta huolehditaan hyvin	Puhtaudesta huolehditaan normaalisti
Ilman virtausnopeus		< 150 mm/min	< 300 mm/min	Ei tuntuvaa vetoa	Ei selvästi tuntuvaa vetoa
Melu		< 40 dBA	< 50 dBA	< 60 dBA	< 90 dBA

Tilojen täytyy olla yleisesti ottaen siistejä ja puhtaita. Peruslämpötila mittaamiselle on 20 °C, jolloin mittauksille ei materiaalista riippumatta tarvitse tehdä mitään korjauksia eikä lämpöpiteneiskertoimia tarvitse tietää. Kosteutta on hyvä olla, jolloin pöly pysyy paremmin kurissa ja stabiili lämpötila on helpompi pitää. Liian suuri kosteus on taas iso riski rautametallien ruostumiselle. [1; 3.]

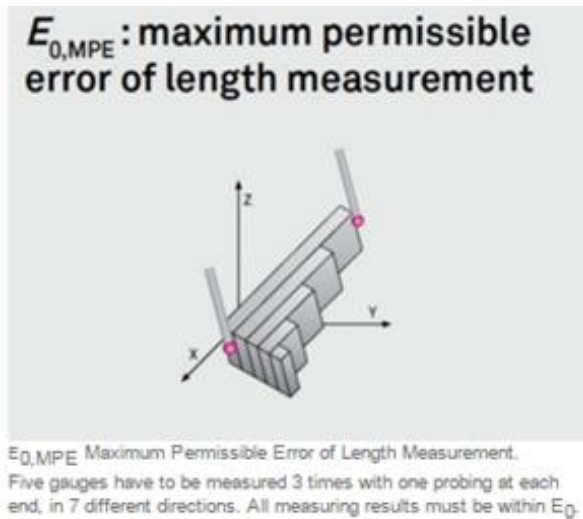
Erilaisia mittaus- ja kalibrointimenetelmiä säädellään eri standardeilla ja niillä on suuri merkitys laitteiden valmistukseen. Suuria kansainvälisiä organisaatioita ovat esimerkiksi ISO, BIPM, OIML ja ILAC. Nämä antavat mittauslaitteille ja -ohjelmille kalibrointiohjeita ja toleranssirajoja, joita on hyvä käyttää pohjana kalibrointiohjeille ja eri hyväksymisrajoille. Näiden suurten organisaatioiden lisäksi on monia pienempiä organisaatioita, jotka vaikuttavat omalla erikoisalallaan, ja niiden ohjeet voivat poiketa suurestikin esimerkiksi yleisistä ISO-standardien mukaisista määritelmistä. Myös eri toimiala- ja laitekohtaiset standardit voivat antaa paljon yksityiskohtaisempia ohjeita tulosten käsittelylle ja mittauksille. Kuvissa 1 ja 2 näkyy pituuden mittaukseen ja toistettavuuteen laadittuja standardeja. [1.]

ISO 10360 viittaa tuotteen tekniseen dokumentaatioon koordinaattimittalaitteiden suorituskykyominaisuuksista. On tärkeää ymmärtää, mikä ISO-eritelmän versio on kyseessä, johon tuoteasiakirjat viittaavat, koska eritelmissä on uudistuksia ja terminologiaa ja testausmenettelyitä on muutettu. [4.]

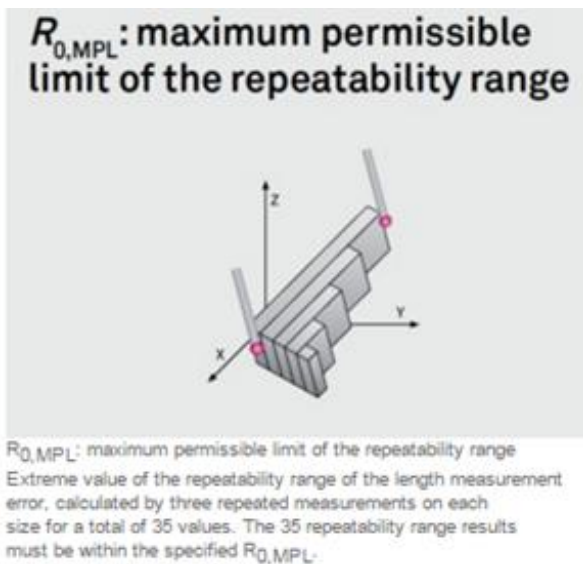
Muutama tärkeä mittauksessa käytettävä ISO Standardi:

- ISO 10360-2: 2009 Geometriset tuotetiedot (GPS) - Koordinaattimittalaitteiden hyväksyntä- ja toistokokeet (CMM) - Osa 2: Lineaaristen mittojen mittaamiseen käytettävät CMM-arvot
- ISO 10360-4: 2000 Geometriset tuotetiedot (GPS) - Koordinaattimittalaitteiden hyväksyntä- ja toistokokeet (CMM) - Osa 4: Mittaustilan mittauksen yhteydessä käytettävät koordinaattimittalaitteet
- ISO 10360-5: 2010 Geometriset tuotetiedot (GPS) - Koordinaattimittalaitteiden hyväksyntä- ja uudelleentarkastustestit (CMM) - Osa 5: Monimutkaiset mittausjärjestelmät [4.]





Kuva 1. Pituuden mittauksen suurin sallittu virhe [4].



Kuva 2. Toistettavuusalueelle sallittu enimmäisraja [4].

## 2.2 Käsivarrellinen mittalaite

Käsivarrelliset mittalaitteet ovat täysin manuaalisia, ja siksi ne ovat huomattavasti halvempia kuin isot tietokoneohjelmoidut CMM-laitteet. Tämän takia niitä myös käytetään todella paljon teollisuudessa ja ne ovat valmistuksessa ja laadunvarmistamisessa merkittävässä roolissa. Näiden mittalaitteiden käsivarsi muodostuu monesta nivelestä, joka muistuttaa kättä. Jokaisen nivelen kulmatietoa tarkkaillaan erilaisin anturein ja käsivarsilaitteissa käytetään samanlaisia mittapäitä kuin CMM-laitteissakin. [1; 3.]

Halvemman hinnan ohella käsivarsimittalaitteen hyvä etu on sen mukautuvuus eri tilanteisiin. Käyttäjän on helppo mitata pisteitä lähes mistä kohtaa kappaletta vain, koska nykyaikaisten mallien liikkuvuus eri asentoihin on hyvä ja mitattava alue suuri. Laitteet ovat myös pienikokoisia, joten niitä voi liikutella ja viedä mitattavien kohteiden luo toisinkin CMM-koneita. Kuvassa 3 on keskikokoinen Hexagonin valmistama käsivarsimittalaite.









Kuva 3. Hexagon Romer Absolute Arm -käsivarsimittalaite [4].

Mittauksen tarkkuus riippuu paljon käyttäjästä, koska käsivarsilaitteilla mittaaminen on täysin manuaalista. Laitteen käyttäjällä on suuri merkitys mittausten tuloksille eikä huolimattomuusvirheisiin ole varaa. Käyttäjien on ymmärrettävä laitteiden toimintaperiaatteet, ja mittauksia on harjoitettava etukäteen, jotta saadaan luotettavat tulokset. [3; 4.]

## 2.3 Koordinaattimittauskone

### 2.3.1 Yleinen toimintaperiaate

Koordinaattimittauskoneet ovat erittäin tarkkoja ja niillä voidaan mitata mikä piste vain koneiden liikkeiden rajaamalta alueelta. Niiden mittausalue voi olla jopa 0–3000 mm ja pienimmät mittausepävarmuudet  $0.5 + L/1000 \mu\text{m}$ . Suurissa teollisuus-CMM-koneissa mittausalue voi olla enemmänkin. Esimerkiksi 5000 mm kuten Mitutoyon Falcio-Apex-merkkisissä koneissa. Koneet mittaavat siis vain avaruudessa olevia pisteitä ja muodostavat erilaisten algoritmien ja perusgeometrian avulla mitatuista pisteistä ympyröitä, tasoja ja suoria. Kuvassa 4 nähdään minimipistemäärät, joilla myös CMM-koneet tekevät kyseiset geometriat. Kone ymmärtää itse, mitä geometrioita käyttäjä mittaa pisteiden perusteella. [1; 3; 5.]

Geometria- elementti	Matemaattinen minimipisteluku
 Suora	2
 Taso	3
 Ympyrä	3
 Pallo	4
 Lieriö	5
 Kartio	6

Kuva 4. Minimipistemäärät perusgeometrioiden laskemiseksi [1].

Mittausten tarve on kasvanut nopeasti, kun eri tuotteiden valmistusmäärät ja mittatarkkuusvaatimukset ovat lisääntyneet. CMM-koneet ovat etenkin geometrysten toleranssien tarkastuksessa nopeita ja hyvin mittatarkkojen osien valmistuksessa tarpeellisia. Koneet ovat suurikokoisia eivätkä ole liikuteltavissa kohteiden luo, kuten käsivarsimalliset mittalaitteet. Kuvassa 5 nähdään Hexagonin valmistama koordinaattimittauskone.



Kuva 5. Hexagon Global Performance, keskikokoinen koordinaattimittauskone [4].

Ne painavat paljon, ja asennuksen yhteydessä täytyy ottaa useita asioita huomioon kuten sähkörsioiden ja paineilmaletkujen sijoittelut. Koneissa on todella tarkat mekaaniset akselistot, joiden avulla koneen luistit voivat liikkua mahdollisimman helposti ja suoraviivaisesti. Koneen mekaniikka toimii paineilman avulla. CMM-koneet ovat kalliita, ja niiden käyttö on vaativaa, minkä vuoksi käyttäjät täytyy valikoida ja kouluttaa hyvin. Laitteita täytyy huoltaa ja pitää puhtaana, jotta mittaustulokset ovat luotettavia. Nämä koneet ovat kuitenkin yleistyneet paljon käsimitalaitteiden ohella korvaten monia tavanomaisia mitalaitteita. [1; 2; 4.]

### 2.3.2 Koskettava mittaustapa

Koskettavassa mittaustavassa CMM-laitteessa on kiinni mittapää, jolla mitattavat pisteet käydään nimensä mukaisesti koskettamalla mittaamassa. Kuvassa 6 nähdään Renishaw-merkkisiä mittapäitä rubiinikärjellä varustettuna. Mittapäitä on kolme eri tyyppiä: kiinteää, kytkevää ja mittaavaa. Kiinteässä mittaustavassa mittapää asetetaan haluttuun paikkaan ja erillisellä painikkeella annetaan koneelle käsky mitata kyseinen piste. Kytkevä mittapää on jousikuormitteinen. Osuessaan kappaleeseen se joustaa ja avaa virtapiirin, joka antaa käskyn mitata piste tästä kohtaa. Tätä mittapäätä voidaan käyttää tietokoneohjatun sekä manuaalisen koordinaattimitakoneen kanssa. Tässä projektissa käytettiin jousikuormitteista mittapäätä CMM-laitteessa. Mittaavassa mittapäässä on kolme vapausastetta, joiden suuntaan mittapää pääsee hieman liikkumaan. Tietokoneavusteinen ohjaus keskittää mittapään pistettä mitattaessa niin, että sen poikkeamat eri suuntiin ovat nolla, ja mittaa pisteen. [3.]



Kuva 6. CMM-laitteen mittapäitä [5].

Mittapää itsessään koostuu kolmesta eri komponentista: pohjasta, varresta ja kärjestä. Yleensä mittauskärkien muoto on pallo, mutta näissäkin voi olla erikoisuuksia. Tavallisin materiaali pallolle on rubiini. Rubiineissa on muutama todella merkittävä etu, ne ovat melko edullisia ja ne on valmistettu suurella tarkkuudella. Muita tärkeitä ominaisuuksia ovat kärjen kovuus ja rubiinin suhteellisen pieni kitkakerroin. Joissain erikoistapauksissa kannattaa käyttää eri materiaalista olevaa päätä kuten alumiinista kappaletta mitattaessa. Rubiini rupeaa keräämään pikkuhiljaa partikkeleita alumiinista, ja ajan kanssa mittapään pallon kertyy kohouma, jota on erittäin vaikea poistaa. [6.]

Varren jäykkyys ja kärjen geometrinen tarkkuus ovat elintärkeitä hyvän ja tarkan mittauksen kannalta. Varsi taipuu kuutiomittaisesti suhteessa pituuteen, eli toisin sanoen varren pituuden kaksinkertaistuessa taipuminen kahdeksankertaistuu ( $2^3=8$ ). Kannattaakin aina mitattaessa valita lyhyin mahdollinen varsi. Varsia on neljää eri materiaalia: ruostumatonta terästä, volframikarbidia, keraamista ja hiilikuitua. Ruostumatonta terästä käytetään tavallisesti varsiin, joiden pituudet ovat alle 30 mm ja kärjen halkaisija vähintään 2 mm. Tällöin yksikappaleiset teräsvarret tarjoavat optimaalisen painon. Volframikarbidipohjia on paras käyttää suuren jäykkyyden vuoksi silloin, kun pallon halkaisija on maksimissaan 1 mm ja varren pituus enintään 50 mm. Kärjen halkaisijan ollessa yli 3mm ja varren pituuden yli 30 mm keraamiset varret tarjoavat jäykkyyttä, joka on verrattavissa teräkseen, mutta ne ovat huomattavasti kevyempiä kuin volframikarbidikärjet. Keraamiset varret voivat rikkoutua törmäyksissä. Hiilikuitu yhdistää maksimaalisen vääntö- ja pitkittäisjäykkyyden erittäin pienellä painolla. Hiilikuitu on ihanteellinen materiaali yli 50 mm:n pituisille varsille. [4; 7.]

Koskettavan mittaustavan ongelmia ovat mittauspäiden koot ja ahtaat ja vaikeat mittauskohdeet. Aina ei löydy oikeaa kokoa tai tarpeeksi pitkää vartta mittaamaan esimerkiksi syvää koloa. Mittapäätä ei saa aina haluttuun asentoon, mikäli mittaus halutaan tehdä jostakin vaikealta pinnalta tai alapuolelta. Pehmeästä materiaalista ei myöskään saa tarkkoja tuloksia, koska se joustaa kärkeä vasten. Mitä pehmeämpää materiaali on, sitä huonompia tuloksia saadaan. Eri mittapäiden vaihtotoimenpide on usein hidasta ja vie runsaasti aikaa. [3.]

### 2.3.3 Lasermittaus

CMM-lasersensorit tarjoavat kosketuksettoman mittauskapasiteetin, joka kerää suuria määriä työkappaleen datan geometriaa suhteellisen lyhyessä ajassa. Lasertunnistin mahdollistaa joustavan mittaamisen ohutseinämäisille työkappaleille, jotka eivät sovi kosketusmittaukseen kosketusantureilla. Koska laseranturi mittaa suuret pistepilvet, se on ihanteellinen anturi mittaamaan vapaamuotoisia pintoja, ohutlevyjä ja ohutseinämäisiä osia. Työkappaleen mittaamiseen käytettävät laseranturin skannausreitit määritellään aloituskohdasta, skannauspituudesta ja skannausleveydestä. Itse mittaus on joissain tapauksissa paljon helpompaa ja nopeampaa lasertunnistimella kuin koskettavalla mittauspäällä. [3; 8.]

Yksivaiheinen lasertunnistin on saatavana vaihtelevilla skannauspituuden ja skannaus-syvyyden yhdistelmillä, ja se on otettava huomioon valittaessa lasertunnistinta. Skannauspituus määrittää skannauksen maksimileveyden, ja skannaus-syvyys määrittää ominaisuuksien maksimaalisen syvyyden. 3D-mittausten lisäämiseksi ja koettimen asentoseman vähentämiseksi laserantureita on saatavana lineaarisella laser-ristityypillä, joka mahdollistaa samanaikaisen skannauksen kolmella lasersäteellä, mikä mahdollistaa monimutkaisten 3D-muotojen tehokkaan mittaamisen. Tämän tyyppistä lasertunnistinta kutsutaan myös ristikkäisskannaukseksi. [8.]

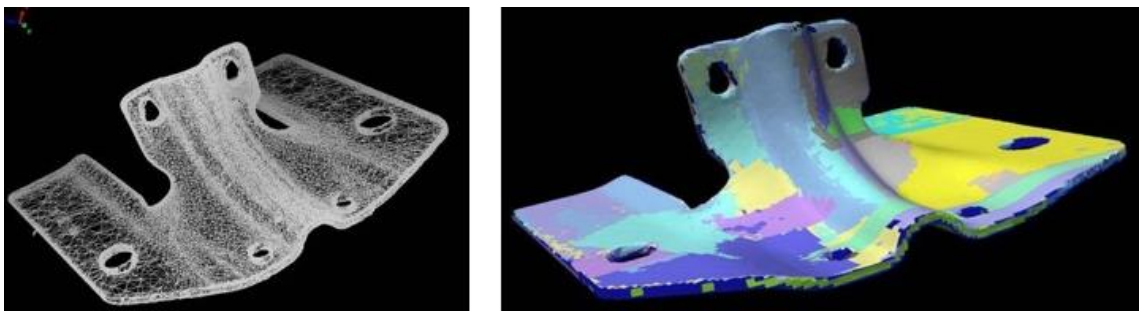
Lasertunnistimia on kolmea eri päätyyppiä: taso-, nauha- ja pistetunnistimia. Nimensä mukaisesti ne heijastavat kappaleeseen tason, lasernauhan ja yhden pisteen kerrallaan. Kuvassa 7 nähdään Mitutoyon lasertunnistin. Kaikkien tyyppien toimintaperiaatteet ovat melko samanlaisia. Lasermittapäässä on lähetin ja vastaanotin. Lähetin lähettää laser-  
valon kappaleeseen, mikä heijastuu kappaleen pinnasta takaisin, ja vastaanotin rekisteröi tämän.



Kuva 7. Mitutoyo-merkkinen CMM-laitteen lasertunnistin [5].

Koska lasermittaus perustuu valoon ja sen heijastukseen, mitattavan kappaleen pinnan tulee olla mattapintainen. Kiiltävästä pinnasta lasersäde ei heijastu oikein, eikä mittaus onnistu. Mitattavat kappaleet voidaan kuitenkin yleensä käsitellä mattamaalilla ennen mittausta. Vaikeat muodot kuten syvät varjopaikat aiheuttavat myös ongelmia, mikäli tunnistimen säde ei pääse sinne, jolloin pistepilvestä ei tule täydellinen. [3.]

Lasermittauksesta ei saada valmista 3D-mallia vaan pistepilvi, kuten kuvassa 8 nähdään. Tämä on kenties yleisimmin väärin ymmärretty asia laserskannauksessa. Skannauksen jälkeen pistepilvi täytyy CAD-ohjelmalla mallintaa kappaleeksi, koska mittauksen jälkeen on olemassa vain paljon pisteitä eikä konkreettista mallia. Tämä toimenpide vie laserskannauksessa suurimman osan ajasta ja voi olla vaikeaa. [4.]



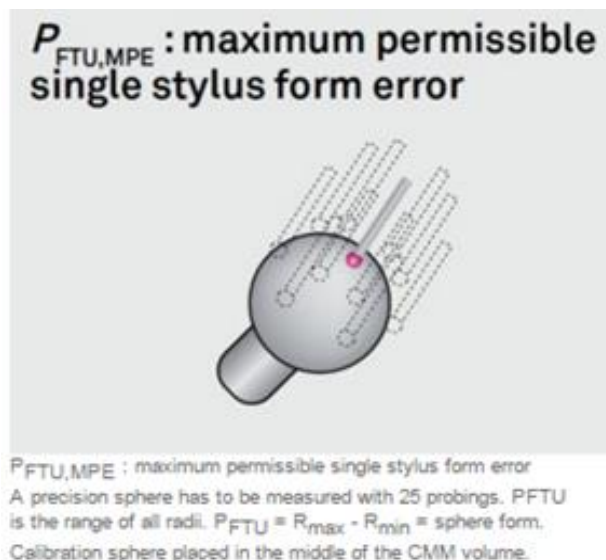
Kuva 8. Lasertunnistimella mitaamalla saatu pistepilvi ja siitä tehty 3D-malli [4].

### 3 Kappaleen mittaaminen

Työ tehtiin koululta löytyvällä Hexagon Global Performance -koordinaattimittauskoneella. Mittauskoneella voidaan mitata kappale kahdella eri tavalla, koskettavalla mittapäällä tai laserskannerilla. Kappaleesta riippuen katsotaan kummalla tavalla työ on järkevämpi tehdä. Tässä tapauksessa kappale oli melko yksinkertainen, joten koskettava mittaustapa sopi tähän hyvin. Myös 3D-mallin piirtäminen koskettavalla mittaustavalla tehdystä mittauksesta on helpompaa.

Työssä käytettiin kappaleena hieman erikoisempaa auton rätiniveltä. Rätinivel on vaihteiston ja kardaanin välissä ”iskunvaimentajana” oleva osa. Aluksi kappale täytyy kiinnittää hyvin, jotta se ei liiku mittauksen aikana. Jos kappale pääsee liikkumaan mittauksen aikana, niin mitattuja pisteitä ei voi enää verrata aikaisempiin. Kappale kiinnitettiin kiinnitysalustaan jousimaisella kiinnityskappaleella, mikä näkyy kuvassa 10.

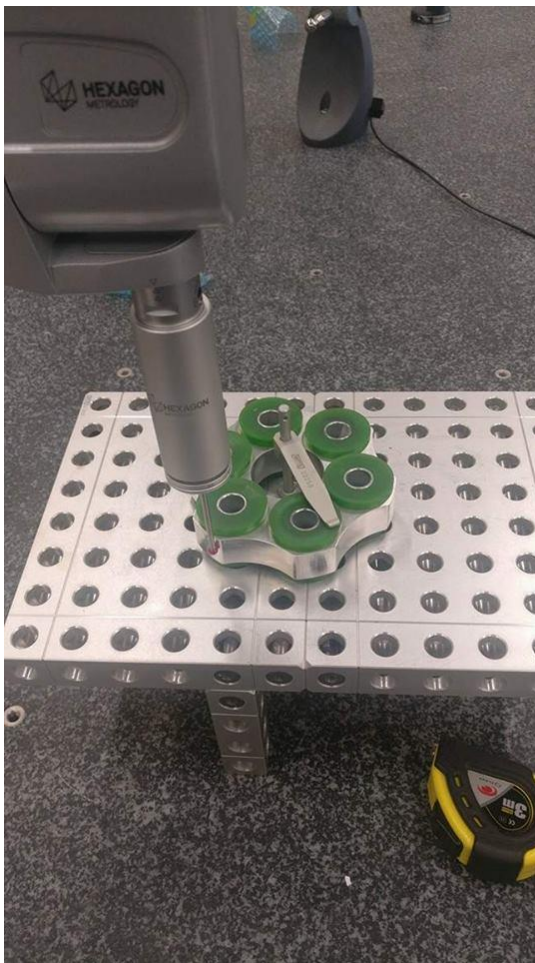
Ennen mittauksen aloittamista mittapäät täytyy kalibroida CMM-laitteen keskeltä löytyvällä kalibrintipallolla, joka on keraaminen. Kuvassa 9 nähdään kalibroinnista saadun tuloksen suurin sallittu virhe. Standardissa ISO 10360 on määritelty kalibroinnille eri raja-arvoja. Näissä standardeissa määritellään myös kalibrintipallon sijainti, joka täytyy olla CMM-laitteen keskellä. [4; 14.]



Kuva 9. Suurin sallittu yksittäinen mittapään muotovirhe [4].



Kalibroitaessa mittapää ajetaan lähelle kalibrintipalloa, minkä jälkeen koneesta voi käynnistää kalibrintiohjelman. Ohjelma määrittää anturin jokaiselle eri asennolle sen minimi- ja maksimipoikkeaman anturin halkaisijasta. Kone suorittaa ohjelman automaattisesti ja antaa tuloksen kalibroinnista, ja mikäli tulos ei ole hyväksyttävä, mittapää täytyy kalibroida uudelleen. Tämän voi myös suorittaa manuaalisesti. Kalibrintipallot ja mittapäiden pallopäät on hyvä puhdistaa ennen kalibrintia ja käyttöä siihen tarkoitettulla aineella ja liinalla. Palloissa voi olla likaa, joka on silmällä vaikea havaita ja tulokset vääristyvät. Kalibrintituloksaan ei välttämättä ole hyväksyttävä, jos palloissa on likaa tai muita epäkohtia.

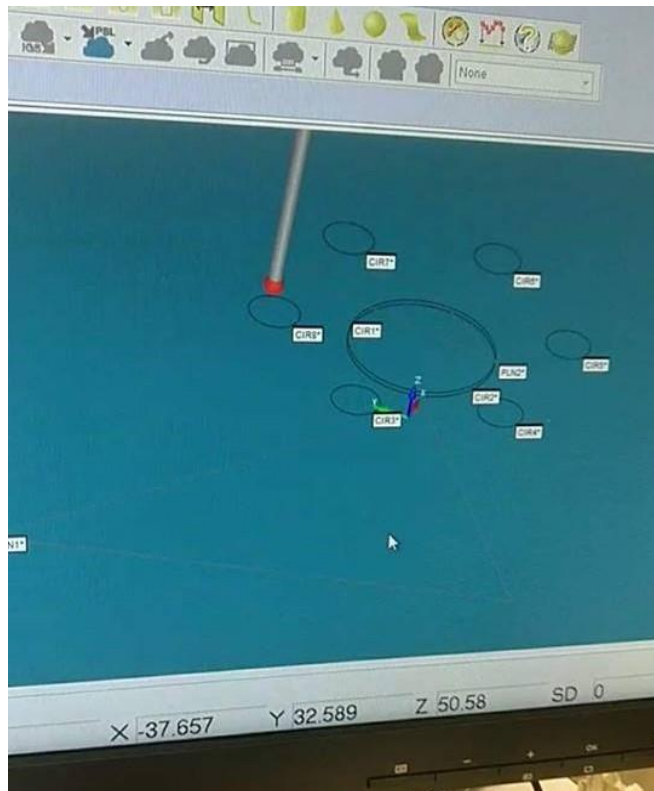


Kuva 10. Tukilaakeri kiinnitettynä alustaan. Mittapää skannaa kappaleen kylkilinjaa.

Aluksi kappaleelle täytyy määrittää jokin nollapiste, joka määritetään yleensä mittaamalla jokin taso, linja ja keskeinen ympyrämuoto. Tähän nollapisteeseen perustuvat kaikki kappaleesta tehtävät mittaukset, joten tämä vaihe on todella tärkeä. Tässä kappaleessa määritettiin nollapisteen tasoksi korkeimpana olevan vihreän holkin yläpinta. Linjaksi

asetettiin tiettyjen vastakkaisten vihreiden holkkien reikien keskipisteestä toiseen oleva matka ja keskeiseksi ympyrämuodoksi keskellä oleva suuri reikä. Tämä nollapiste suunniteltiin niin, että kappaleeseen voidaan mitata sama nollapiste, kun se joudutaan kääntämään ympäri toisen puolen mittauksia varten. Nollapisteen määrittämisen jälkeen kappaleesta mitattiin jokainen reikä erikseen, kuten myös kaikki tasot, ja kappaleen kylkilinja skannattiin. Skannauksessa mittapää ohjelmoidaan kulkemaan kappaleen muotoja pitkin koko ajan tätä koskettaen. Laite lopettaa skannauksen saapuessaan takaisin aloituspisteeseen, tätäkin voi tosin muuttaa. Tämän jälkeen kappale täytyi kääntää toisen puolen mittauksia varten. Kääntämisen jälkeen nollapisteen tasoksi asetettiin kiinnitystelineen pinta, joka oli nyt vasten viimeksi korkeimpana olevaa vihreää holkkia. Linjaksi ja keskeiseksi ympyrämuodoksi asetettiin samat kuin kappaleen ollessa toisinpäin. Nollapiste on erityisen tärkeää mitata samaan kohtaan kappaleen kääntämisen jälkeen, jotta mittaukset voidaan 3D-ohjelmassa yhdistää samaan malliin. Toiselle puolelle tehtiin samat mittaukset kuin ensimmäisellekin.

Ainoat ongelmat mittauksessa syntyivät vihreitä holkkeja mitattaessa. Holkkien väliin mahtui vain pienin mittapää, joka oli jo turhankin pieni kyseiseen mittaukseen, ja se katkesi kalibroitaessa. Sopivaa mittapäätä holkkien halkaisijoiden mittaukseen ei siis ollut. Onneksi nämä mitat eivät olleet niin tärkeät tässä kappaleessa, joten holkkien mitat otettiin mikrometrillä. Mikrometri on huomattavasti epätarkempi kuin CMM-laite, mutta tarpeeksi tarkka tähän tapaukseen. Kuvassa 11 nähdään holkkien reiät sekä keskireikä mitattuina.



Kuva 11. Reikien mittauksia CMM-laitteen mittausohjelmassa.

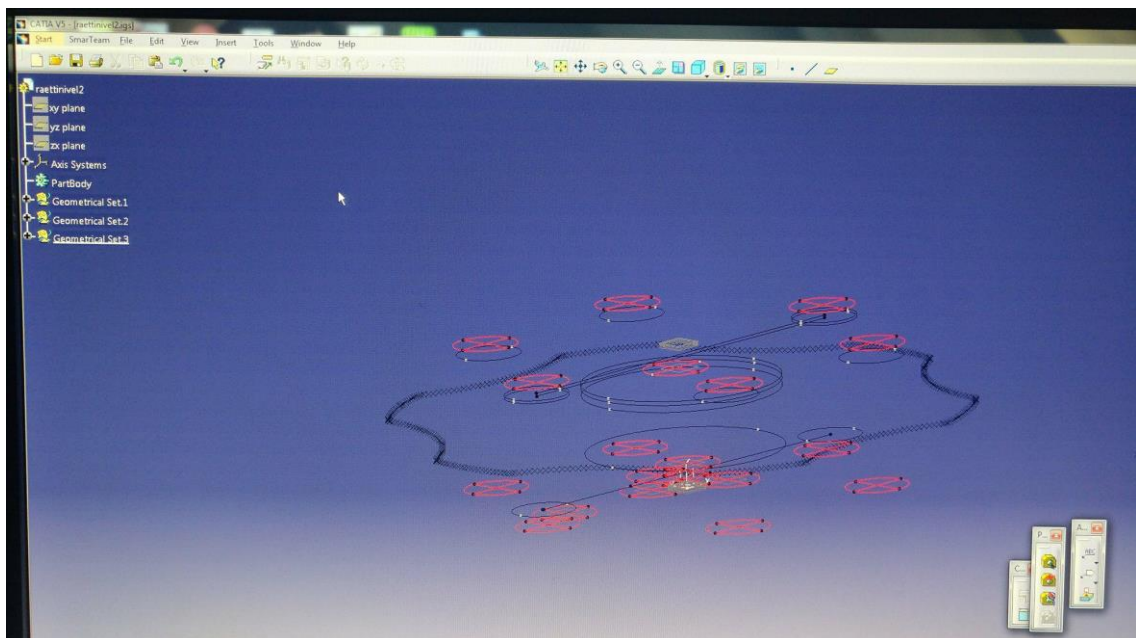
Kun kaikki tarvittavat mitat on mitattu, kappaleesta tehtyjä mittauksia voidaan siirtyä mallintamaan 3D-ohjelmaan. Mittaustiedostot täytyy tallentaa stl-formaattiin, jotta 3D-mallintamisohjelma ymmärtää tiedostot.

#### 4 Mallinnus

CAD-suunnittelulla tarkoitetaan tietokoneavusteista suunnittelua, jonka avulla voidaan luoda esimerkiksi myyntituotteen malli. Tätä voidaan muokata, optimoida tai analysoida helposti eri ohjelmilla. Mallia voidaan käyttää kappaleen valmistukseen eri valmistusoperaatioissa, kuten tulostukseen tai koneistukseen. 3D-mallinnusta käytetään todella monilla eri aloilla, ja se on yleistynyt paljon viime vuosina. Useimmat ohjelmistot sisältävät kaikki suunnittelussa ja valmistuksessa tarvittavat tiedot kyseisestä tuotteesta. Tämä nopeuttaa prosessia huomattavasti verrattuna aikaisempiin menetelmiin, jolloin nämä tiedot olivat selkeästi erillään. [9.]

Kappaleen mallintamiseen käytettiin koululta löytyvää Catia V5 3D-mallintamisohjelmaa. Aluksi tiedostot täytyy tuoda (import) ohjelmaan, näitä tiedostoja oli kolme. Kun mittauksissa nollapiste on tehty jokaiseen tiedostoon samaan paikkaan, pystyy kaikki tiedostot tuomaan samaan mallinnustyöhön ja ohjelma osaa sijoittaa ne oikein. Tämä helpottaa huomattavasti kappaleen mallintamista. Kuvassa 12 on kaikki tarvittavat pisteet oikeanmuotoisen mallin luomiseen. Kappaleen vihreiden holkkien pisteet tosin puuttuvat kuvasta, koska ne mitattiin käsin mikrometrillä.

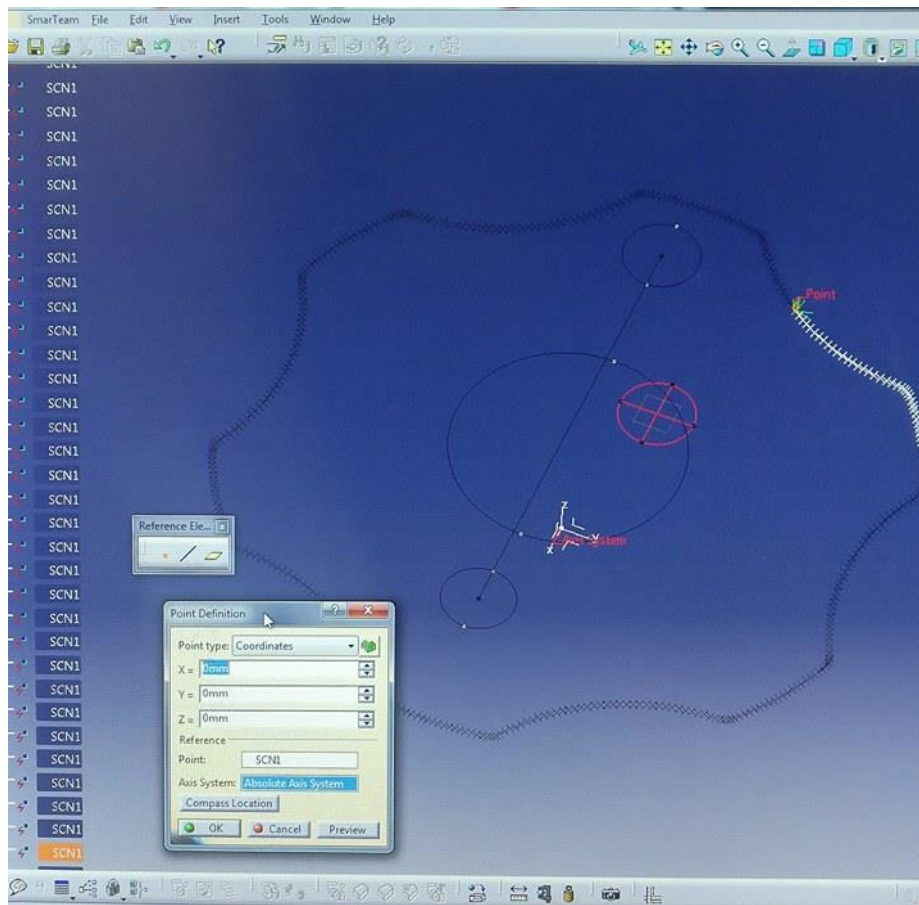
Catiassa parametrit ja piirteet tallennetaan ohjelman tietokantaan aikajärjestyksessä. Kun muokkaa esimerkiksi kokoonpanosivulla yhden kappaleen pituutta, se vaikuttaa kaikkiin kappaleisiin parametrien mukaan. Tämä helpottaa huomattavasti suunnittelussa uutta kappaletta ja sen sopivuuksia. Catia ei ole ehkä helpoimpia sovelluksia aloittelijalle sen tuhansien ominaisuuksien ja eri toimintojen vuoksi, mutta tarjoaa hyvät työkalut eri sovelluksiin. Catiaa käytetään monissa suurissa yrityksissä osasuunnittelussa, kokoonpanosuunnittelussa, hybridi- ja levymetallien suunnittelussa samoin kuin monien muidenkin järjestelmien kanssa. Eri työkaluilla on loppujen lopuksi helppo luoda, validoida ja muokata vapaamuotoisia pintoja sekä mekaanisia muotoa. Lisäksi eri malleista voidaan tehdä simulaatioita, joiden avulla nähdään jo suunnitteluvaiheessa, voiko kyseinen sovellus toimia. [9; 10.]



Kuva 12. Mitatut pisteet tuotuna Catia-ohjelmaan.

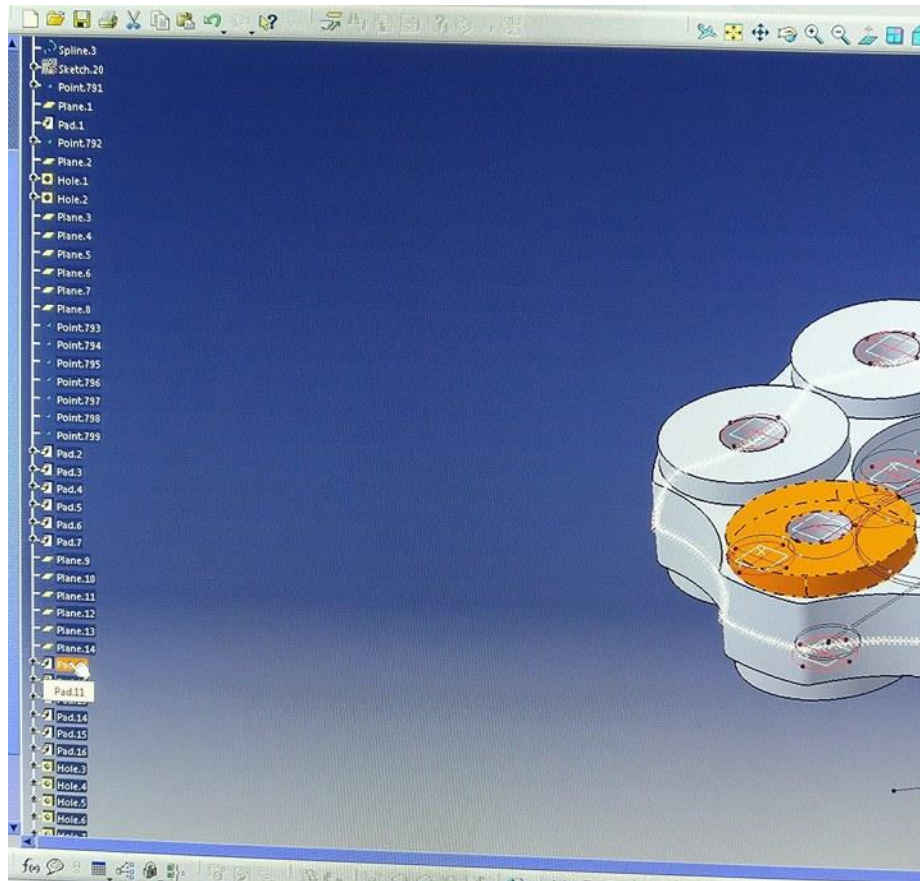
Punaiset ympyrät ovat tasoja ja mustat ympyrät reikiä. Uloin muoto on kappaleen ääri-  
viivat, jotka saatiin mittapäällä skannaamalla. Skannauksen tuloksena tuli siis vain satoja  
pisteitä peräkkäin. Nyt kappale täytyi mallintaa pisteiden perusteella oikeaksi malliksi,  
joka voidaan tulostaa.

Mallintamisen alkuun oli heti suuria ongelmia saada ulkomuotoa tehtyä, koska jostain  
syystä ohjelma ei tunnistanut skannauksesta saatuja pisteitä pisteiksi. Niinpä pitkien  
pohdintojen jälkeen ainoaksi keinoksi jäi merkata jokainen skannauksesta saatu piste  
uudeksi pisteeksi, mikä näkyy kuvassa 13. Uudet pisteet yhdistettiin yksi kerrallaan toi-  
siinsa janoilla, minkä jälkeen ulkolinjan mukaisesti kappaletta pystyi pursottamaan oikei-  
siin tasoihin saakka.



Kuva 13. Skannauspisteiden merkausta uusiksi pisteiksi.

Kylkilinjan pursotuksen jälkeen holkit pursotettiin muotoonsa. Myöskään CMM-laitteella mitattuja pintoja ei Catia tunnistanut valmiiksi tasoiksi, joten holkkeja ei pystynyt pursottamaan suoraan oikean korkuiseksi. Ohjelma tunnisti punaisten ympyröiden reunalla olevat mustat pisteet, joiden avulla pystyttiin tekemään mitattujen pintojen keskelle tasolevyt ohjelmassa. Tasolevyjen avulla holkit pursotettiin oikean kokoisiksi. Lopuksi kappaleeseen tehtiin keskireikä ja holkkien reiät, jotka menivät suoraan hole-toiminnolla. Kuvissa 14 ja 15 nähdään mallinnuksen rakennepuuta ja valmis kappale.



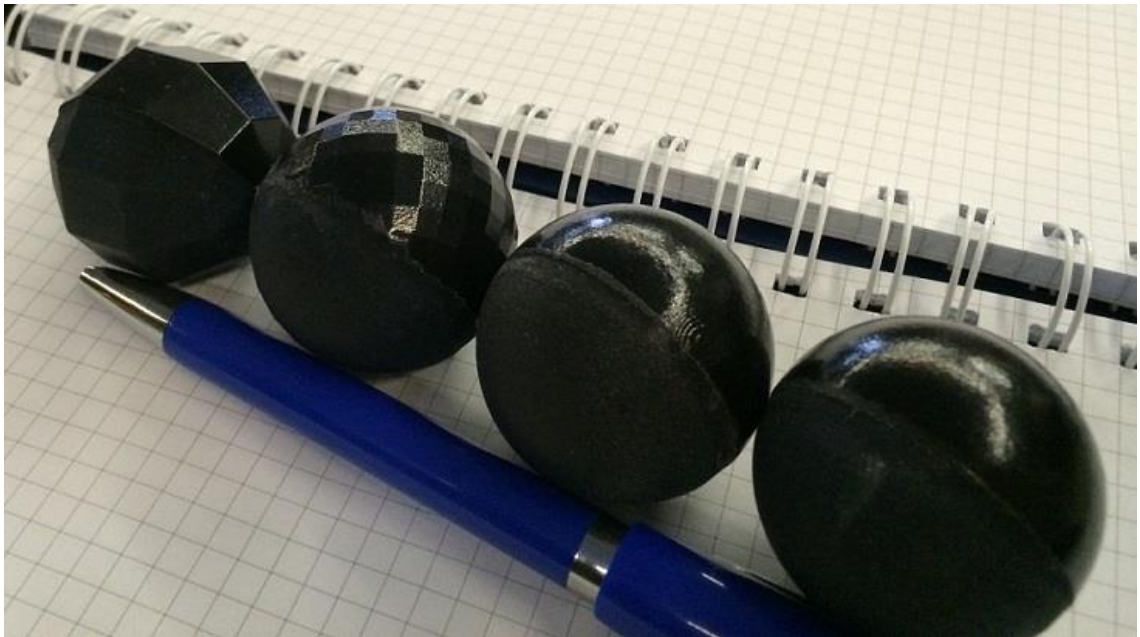
Kuva 14. Kappaleen yhden holkin pursotus oranssilla ja sivussa rakennepuuta.



Kuva 15. Valmis mallinnettu kappale.

## 5 3D-tulostus

Jokaiselle 3D-tulostukselle yhteistä on 3D-malli, joka on välttämätön. Ilman tätä tulostustakaan ei voida tehdä. 3D-malli 'leikataan' ohuiksi kerroksiksi, jotka sitten lähetetään tulostimeen. Tämän takia mallinnettu tiedosto täytyy tallentaa stl-formaattiin. Tässä muodossa mallin pinnat esitetään tasokolmioiden avulla, jolla kaarevatkin pinnat saadaan todella tarkoiksi. Stl-tiedostomuodon tarkkuusasetuksia voidaan säätää, jolloin lopputuloskin muuttuu. Tämä näkyy hyvin kuvassa 16. Tarkemmassa stl-mallissa jaetut kolmiot ovat pienempiä, ja se sisältää enemmän dataa kuin epätarkka malli. Tiedostokokokin on näin suurempi. [12.]



Kuva 16. Sama kappale tulostettuna eri stl-formaatin tarkkuuksilla. Neliöt kappaleen pinnoilla muodostuvat kahdesta kolmiosta [12].

Erilaisia tulostimia on nykyään alkaen pöytätulostimista, jotka sulattavat muovimateriaalia erilliselle tulostusalustalle, suuriin teollisuustulostimiin, jotka käyttävät laseria metallijauheen sulattamiseen korkeissa lämpötiloissa. Tulostus voi kestää useita tunteja riippuen tietenkin tulostuksen koosta. Usein tulostettu kappale käsitellään vielä jälkeinpäin, jotta haluttu viimeistely saavutetaan. Ensimmäisen 3D-tulostusprosessin keksi Chuck Hull jo vuonna 1983. Patentissa hän kuvasi tätä prosessia menetelmänä, jolla voi painattamalla valmistaa ohuita kerroksia ultraviolettivalosta kovettuvasta materiaalista toisen päälle. Myöhemmin hän ymmärsi, ettei hänen tekniikkansa rajoittunut vain nesteisiin vaan mihin tahansa aineeseen, joka kykenee jähmettymään. Hull rakensi perustan sille, minkä me tunnemme nykyään 3D-tulostuksena (AM). 3D-tulostimien määrä on 2010-luvun taitteessa lähtenyt räjähdysmäiseen nousuun. Vuoteen 2009 saakka tulostimien käyttö rajoittui vain teolliseen käyttöön, kunnes yksi yleisimmistä 3D-tulostustekniikan patenteista (FDM) päättyi. Tämän ansiosta yhtäkkiä tulostimen, joka ennen maksoi 200 000 \$, saikin alle kahdella tuhannella. [11.]

3D-tulostusta ja sen vaikutuksia voi nähdä todella monilla eri aloilla kuten autojen tuotannossa, lentokoneiden valmistuksessa, hammaskirurgiassa ja kulutustuotteiden parissa. Tulostimet luovat monimutkaisia osia, nopeuttavat työsyklejä, lisäävät mittausta ja testausta sekä tarjoavat mukautettuja ratkaisuja kehitysprosessien kaikissa osissa. Tu-



lostuksia käytetään paljon myös prototyyppien tekoon, jolloin nähdään nopeasti eri ratkaisuja ja se, kuinka ne toimivat käytännössä. Kolmiulotteiset tulostusratkaisut parantavat tuotteiden laatua, standardeja ja eheyttä. Tulostuksen ansiosta moni ala on kehittynyt ja mennyt eteenpäin. Tulostukset ovat monipuolisia, ja nykyään materiaaleja on kymmeniä. Erilaisia muovin vaihtoehtoja on monia joustavasta kumimaisesta jäykkiin ABS-muoveihin ja nyloneihin. Myös teollisuudessa käytettäviä metalleja on useita kuten pronssi, ruostumaton teräs, alumiini ja kromi. Tulostettaessa metallia, metallijauhe sintrataan laserilla, jolloin jauhe muuttuu kiinteäksi. [11; 13.]

### 5.1 Kappaleen tulostaminen

Kappale tulostettiin koululta löytyvällä Objet Eden 260V -merkkisellä 3D-tulostimella, joka näkyy kuvassa 17. Objet on johtava korkealaatuisten ja kustannustehokkaidenustusuihkutulostusjärjestelmien ja -materiaalien toimittaja. Vuonna 1998 perustetulla yhtiöllä on tuhansia asiakkaita ympäri maailmaa. Objetin pitkälle kehitetyt 3D-tulostusjärjestelmät ja yli 60 materiaalin valikoima antavat ammattilaisille mahdollisuuden rakentaa prototyyppijä, jotka simuloivat tarkasti lopputuotteiden todellista ulkoasua, tuntumaa ja toimintaa sekä jopa monimutkaisia, koottuja tavaroita. Eden 260V tukee neljää 3,6kg:n Jumbo täytepatruunaa. Tämä mahdollistaa miehittämättömän toiminnan jopa 72 tunnin ajaksi. Täytepatruunoita on monia erilaisia kuten fullcure, tango, vero ja durus. Jokaisella on erilaiset ominaisuudet ja omat etunsa. On kumimaisia sekä jäykkiä materiaaleja, korkean lämmön kestäviä, läpinäkyviä sekä tukiaineita. [13.]

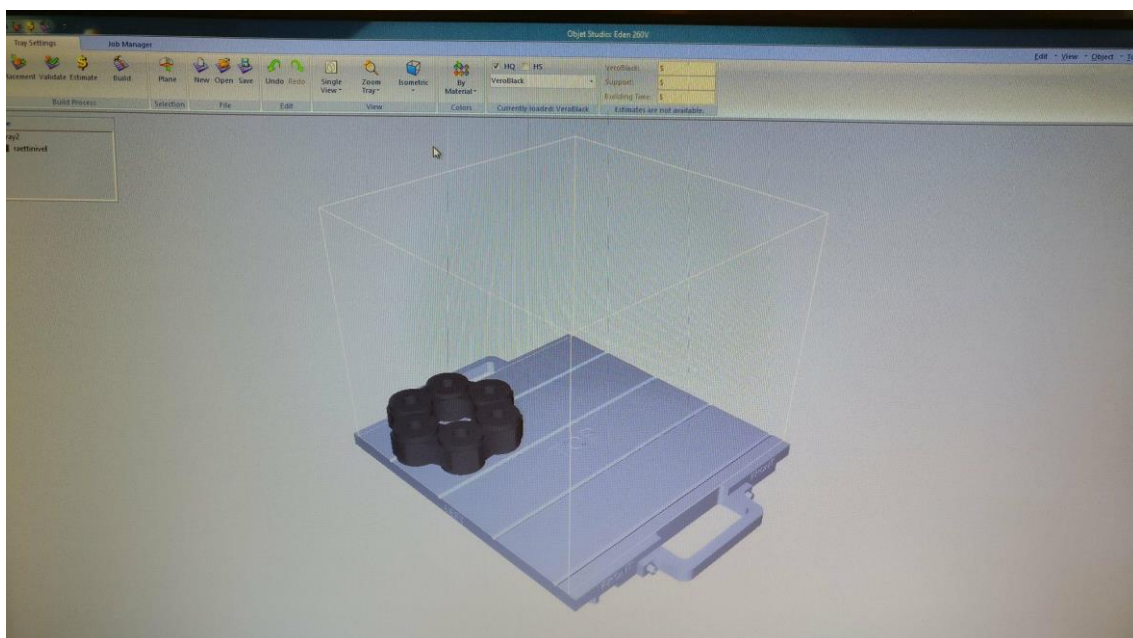


Kuva 17. Koulun Objet 3D-tulostin. Tulostimen koko on 87 x 120 x 73,5 cm ja paino 410 kg.

Kyseinen tulostin on erityisen tarkka puhtaudesta, ja konetta täytyy ylläpitää ja huoltaa tasaisin väliajoin. Tulostettavat materiaalit reagoivat uv-valon kanssa, joka kovettaa ne. Ennen tulostuksen aloitusta laitteen tulostusalue ja täytteen syöttöreiät puhdistettiin rätillä. Myös uv-valon linssi tarkistettiin ja puhdistettiin. Materiaaliksi valittiin fullcure-patruuna, joka laitettiin koneen alaosaan löytyvään lokeroon. Viereen laitettiin myös tukiainepatruuna, jonka kiinnitys on erilainen kuin varsinaisen materiaalin, joten ne eivät voi mennä sekaisin. Kone käyttää tukiainetta automaattisesti paikkoihin, jonne sitä tarvitsee,

kuten sellaisten paikkojen alle, jotka muuten tulostuisivat tyhjän päälle. Koneen asetuksista pystyy myös valitsemaan, tulostetaanko kappale kokonaan vai vain ulkoreunat varsinaisella aineella. Vain ulkoreunat varsinaisella aineella tulostettaessa, kappaleen sisältö tulostetaan täyteen tukiainetta, joka on paljon hauraampaa ja kevyempää sekä myös paljon edullisempää. Varsinainen täyteaine on todella kallista. Materiaalien valitsemisen jälkeen koneella ajettiin testiajo. Testiajo tulostaa paperille yhden kerroksen viivoja, joista näkee suuttimien kunnon sekä tukkeutuneet syöttöreivät.

Mikäli kappaleita on monia ja ne ovat tarpeeksi pieniä, kannattaa ne laittaa peräkkäin samalle tasolle. Tulostustasot näkyvät kuvassa 18. Tällöin tulostus on huomattavasti nopeampaa, kuin laittamalla ne eri tasoihin.



Kuva 18. Tulostettava kappale Objetin tulostusohjelmassa. Kuvassa näkyy neljä tulostustasoa.

Kone tulostaa yhdellä pyyhkäisyllä aina yhden tason läpi, minkä jälkeen se siirtyy uuteen tasoon, mikäli sielläkin on tulostettavia kappaleita. Kun kaikki kappaleet pystytään laittamaan samalle tasolle, kone pystyy tulostamaan kaikki yhdellä pyyhkäisyllä ja aikaa säästyy huomattavasti. Tämän työn kappaleessa ei ollut muita vaihtoehtoja, kuin laittaa kappale mahdollisimman reunaan peittäen kahta eri tasoa. Yhdellä pyyhkäisyllä kone tulostaa erittäin pienen kerroksen, joten tulostuskerroksia voi tulla jopa tuhansia. Kuvassa 19 nähdään, että projektin kappaleen tulostamiseen tarvittiin 1 215 tulostuskerrosta. Kappaleen tulostus kesti muutaman tunnin.



Kuva 19. Tulostusohjelmassa pystyi seuraamaan tulostuksen etenemistä.

Ohjelmasta näkee materiaalien jäljellä olevat määrät, tulostuskorkeuden ja tulostuskerrokset. Vaikka materiaalit olivat aika lopussa näissä patruunoissa, ne riittivät hyvin tulostamaan kappaleen. Tulostuksen jälkeen laitteen syöttöreivät ajettiin tyhjiksi, jottei materiaali jäänyt niihin kovettumaan ja tekemään tukoksia. Kappaleen ylimääräiset tukiaineet saa pois vedellä tai kaapimalla.

## 5.2 Lopputulos

Kappaleesta tuli mitoiltaan erittäin hyvä ja jopa skannauksella saatu ulkoreuna on onnistunut hyvin. Kappaleen toinen puoli jäi mattapintaiseksi tukiaineen takia, mikä näkyy kuvassa 20. Tukiainetta tarvittiin kappaleen alapuolelle, koska muuten holkkien päällä oleva kappaleen keskiosa olisi tulostunut osittain tyhjän päälle. Tukiaine kaavittiin pois pienellä puukolla ja terävällä levyllä. Alapuolen holkkien kyljet ovat hieman karkeita eivätkä aivan yhtä tarkkoja kuin yläpuolen. Kuvassa 21 nähdään alkuperäinen ja projektista saatu valmis tulostettu kappale vierekkäin.



Kuva 20. Valmis kappale alapuolelta, jossa oli tukiainetta.



Kuva 21. Alkuperäinen ja tulostettu kappale.

Kappaleen yläpinnan ja alapinnan eron huomaa hyvin kuvista. Yläpinta on täysin kiiltävä, ja holkkien päältä erottaa hieman eri kuvioita, joita on tullut tulostettaessa.

## 6 Yhteenveto

Työn tavoite oli saada valmis kappale käänteistä suunnittelua apuna käyttäen joko tulostamalla tai koneistamalla. Kahta eri konepajateknistä mittaustapaa oli myös tarkoitus vertailla ja mahdollisesti tehdä ohje mittauksista ja mallinnuksesta.

Tavoitteisiin päästiin, vaikkakin mitään erillistä kuvallista ohjetta ei työstä tehtykään. Käytännön osioissa käydään prosessi kuitenkin vaihe vaiheelta läpi. Uusi valmis kappale onnistui erittäin hyvin, ja jo aikaisessa vaiheessa työtä oli selvää, että kappale tulostetaan 3D-tulostimella eikä koneisteta. Se oli paljon nopeampi ja helpompi ratkaisu, sekä kappaleen muoto ja malli oli hyvä tulostettavaksi. Kahden eri mittaustavan vertailu olisi voinut olla perusteellisempikin, mikäli kappale olisi mitattu myös laseranturilla ja tehty siitä 3D-malli. Tässä työssä kappale kuitenkin mitattiin vain koskettavalla mittapäällä, vaikkakin molempiin tapoihin perehdyttiin ja niistä kerrotaan teoriaosioissa.

Käänteistä suunnittelua apuna käyttäen voi hyvin valmistaa toimivia ja valmiita osia sekä kappaleita. Tästä työstä saatu kappale ei sovellu käyttökohteeseensa (auton kardaanin tukilaakeri) materiaalista johtuen, mittojen puolesta kylläkin.

## Lähteet

- 1 Esala, Veli-Pekka; Lehto, Heikki & Tikka, Heikki. 2003. Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit. Helsinki. Teknologiateollisuus ry.
- 2 Niemelä Matti. 2011. Koordinaattimittauskoneen mittausepävarmuuden määrittäminen. Opinnäytetyö. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Theseus-tietokanta.
- 3 Kesseli Anne. 2006. 3D Digitointi. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu. Mediatekniikan koulutusohjelma. Theseus-tietokanta.
- 4 Hexagon Metrology Oy. Tarkkuusmittauslaitteiden valmistaja. Verkkoaineisto. <http://www.hexagonmi.com/>. Luettu 7.4.2018.
- 5 Mitutoyo. Tarkkuusmittauslaitteiden valmistaja. Verkkoaineisto. [http://www.mitutoyo.fi/fi\\_fi/](http://www.mitutoyo.fi/fi_fi/). Luettu 8.4.2018.
- 6 McMenamin Edward. 2016. CMM Styli. Verkkoartikkeli. <https://www.qualitymag.com/articles/93099-cmm-styli>. Luettu 12.4.2018.
- 7 Osterstock Mark. 2014. Custom CMM Styli. Verkkoartikkeli. <https://www.qualitymag.com/articles/91913-custom-cmm-styli>. Luettu 12.4.2018.
- 8 Hancz Gene. 2015. Expand Your CMM's Capabilities. Verkkoartikkeli. <https://www.qualitymag.com/articles/92781-expand-your-cmms-capabilities>. Luettu 14.4.2018.
- 9 Särkisilta Henri. 2016. 3D-mallinnusohjelmistojen vertailu ajoneuvotekniikan korkeakouluympäristössä. Insinöörityö. Metropolia ammattikorkeakoulu. Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma. Theseus-tietokanta.
- 10 Dassault Systems. Verkkoaineisto. <https://www.3ds.com/products-services/catia/>. Luettu 27.4.2018.
- 11 3D Hubs. 3D-printtaukseen erikoistunut online-yritys. Verkkoaineisto. <https://www.3dhubs.com/>. Luettu 28.4.2018.
- 12 AIPworks. Tutkimus- ja kehityskeskus. Verkkoaineisto. <https://aipworks.fi/>. Luettu 20.4.2018.
- 13 Stratasys. 3D-tulostusratkaisut. Verkkoaineisto. <http://www.stratasys.com>. Luettu 30.4.2018.
- 14 SFS-EN ISO 10360-1. Geometrical Product Specifications. 2011. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.