



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Teuvo Lounakoski

3D-skannauspalvelun suunnittelemi- nen lujuuskokeiden yhteyteen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

4.9.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Teuvo Lounakoski 3D-skannauspalvelun suunnittelemisen lujuuskokeiden yhteyteen 37 sivua 4.9.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat	Tutkimusinsinööri Juha Porvali Liiketoiminnan kehityspäällikkö Matti Serenius, Eurofins Expert Services Oy
<p>Insinöörityön aiheena oli 3D-skannauspalvelun suunnittelemisen turvaohjaamoiden lujuuskokeiden yhteyteen. Tavoitteena oli luoda lujuuskokeissa käytettävä 3D-skannauspalvelu Eurofins Expert Service Oy:lle. 3D-skannauksella on tarkoitus tarkastella lujuuskokeissa syntyviä muodonmuutoksia. Tavoitteena oli selvittää tähän parhaiten soveltuva skannaus-teknologia sekä tehdä markkinatutkimus hyödyntäen lujuuskoepalvelun nykyisiä asiakkaita. Projektin tavoitteet asetettiin yrityksen edustajien kanssa.</p> <p>Insinöörityön aikana suoritettiin tutkimus erilaisista skannausmenetelmistä ja perehdyttiin syvemmin tarkoitukseen sopiviin menetelmiin. Tutkimuksen perusteella valittiin soveltuvat skannerit käytännön testeihin. Käytännön testeihin valitut skannerit perustuivat eri skannausmenetelmiin. Käytännön testeihin valitut skannerit täyttivät asiakkailta saadut vaatimukset skannauksen laadusta.</p> <p>Insinöörityön tuloksena syntyi suunnitelma skannauspalvelun aloittamista varten sekä arvio skannauspalvelun myyntivolyymista. Projektin testitulokset osoittivat, että oikeanlaisella skannauslaitteistolla skannauspalvelu voidaan liittää lujuuskokeiden yhteyteen siten, että se on ajallisesti vielä kannattavaa. Markkinatutkimuksen perusteella osoittautui, että skannauspalvelulle on kysyntää ja siitä saatavat tulokset ovat asiakkaille hyödyllisiä. Tämän insinöörityön pohjalta yritys jatkaa palvelun suunnittelua ja tekee päätöksen palvelun aloittamisesta.</p>	
Avainsanat	3D-skannerit, takaisinmallinnus, laadunvalvonta

Author Title	Teuvo Lounakoski Designing 3D Scanning Service for Strength Testing
Number of Pages Date	37 pages 4 September 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Design Engineering
Instructors	Juha Porvali, Research Engineer Matti Serenius, Business Development Manager, Eurofins Expert Services Oy
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to design 3D Scanning Service for strength testing of heavy machinery cabs. With the help of this 3D scanning service, the company can provide valuable data for its customers. With these data customers can see the permanent deformation caused by the standardized method of testing strength of heavy machinery cabs. This thesis was commissioned by Eurofins Expert Service Oy.</p> <p>The study was carried out as follows. Firstly, literature related to 3D scanning was examined and studied. Secondly, the customers of the company were interviewed and valuable information about their needs and wishes about the future 3D scanning service possibilities were collected. Based on the research and customers' feedback, several 3D scanners were chosen for testing in the testing environment. Finally, the results from testing were collected and processed, after which the best scanner technology for the company's purposes was selected.</p> <p>Based on the test results and marketing research it is worthwhile to continue planning this service. As a result of this thesis, a plan for the new service was developed.</p>	
Keywords	3-D scanners, reverse engineering, quality control

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Eurofins Expert Service Oy	1
1.2	Lujuuskokeet	1
2	3D-skannaus	2
2.1	3D-skannaus ja sen käyttökohteet	3
2.2	Skannausmenetelmät	6
2.3	Skannerin sijainnin määrittäminen	9
2.4	Skannerin käyttäytyminen värähtelevässä ympäristössä	12
3	Järjestelmän käyttökohteet ja markkinatutkimus	13
3.1	Käyttökohteet	13
3.2	Markkinatutkimus	14
3.3	Asiakkaiden tarpeet	16
4	Skannereiden vertailu	17
4.1	Tarkkuus, resoluutio ja skannausnopeus	17
4.2	Skannerin valintaan vaikuttavat tekijät	18
5	Skannereiden käytännön testit	21
5.1	Tutkimusmenetelmät	21
5.2	Tutkimustulokset	21
5.3	Skannausohjelmistot ja -tulokset	27
5.4	Skannerin valinta	32
6	Skannauspalvelun kustannusarvio ja myyntisuunnitelma	33
7	Yhteenveto	34
	Lähteet	36

Lyhenteet

CAD	<i>Computer Aided Design</i> . Tietokoneavusteinen suunnittelu, jota käytetään kappaleiden ja koneiden rakenteiden suunnittelussa.
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i> . Mittalaite, jolla voidaan mitata pisteitä avaruudessa.
DLV	<i>Deflection Limiting Volume</i> . Turva-aluetta kuvaava arvio suuresta koneen käyttäjästä. Turvaohjaamo ei saa läpäistä tätä testauksen aikana.
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> . Rakenteen muodon ja materiaalinkäytön optimoimiseen sekä rakenteen kestävyys tarkasteluun tarkoitettu numeerinen ratkaisumenetelmä.
FOPS	<i>Falling Object Protective Structure</i> . Turvaohjaamon dynaaminen lujuuskoe, jossa simuloidaan turvaohjaamon katolle putoavaa esinettä.
OPS	<i>Operator protective structures</i> . Turvaohjaamon staattinen lujuuskoe, jossa simuloidaan turvaohjaamoon tunkeutuvaa esinettä ikkunasta.
ROPS	<i>Roll Over Protection System</i> . Turvaohjaamon staattinen lujuuskoe, jossa simuloidaan turvaohjaamon ympäripyörähtämistilannetta.

1 Johdanto

Insinööritöä tehtiin yritykselle Eurofins Expert Service Oy. Työn tavoitteena on tutkia 3D-skannausjärjestelmiä ja selvittää niiden hyödyntämistä turvaohjaamoiden lujuuskokeissa. Tavoitteena on kehittää asiakkaille tarjottava lisäpalvelu turvaohjaamoiden lujuuskokeiden yhteyteen. Insinööritö sisältää skannausteknologian tutkimisen, testausten ja valinnan. Lisäksi selvitetään asiakkaiden tarpeet palvelun suhteen ja suoritetaan markkinatutkimus.

Tämä valittiin insinööritöön aiheeksi, koska Eurofins Expert Service Oy halusi kehittää olemassa olevan lujuuskoepalvelun rinnalle uuden lisäpalvelun. Ennen palvelun käynnistämispäätöstä haluttiin perehtyä eri 3D-skannausmenetelmiin ja niiden mahdollisuuksiin lujuuskokeissa. Lisäksi asiakkaiden tarve ja vaatimukset palvelun suhteen haluttiin selvittää. Insinööritö perusteella palvelun aloittamisessa edetään, jos se on taloudellisesti kannattavaa sekä teknologiallisesti toteutettavissa.

1.1 Eurofins Expert Service Oy

Eurofins Expert Service Oy on osa kansainvälistä Eurofins Group -konsernia. Yritys tarjoaa asiakkailleen erilaisia asiantuntija-, sertifiointi- ja tuotehyväksyntä- sekä testaus- ja tarkastuspalveluja. Maailmanlaajuisesti Eurofins Group -konserni toimii 47 maassa noin 45 000 asiantuntijan voimin. Suomessa Eurofins Expert Service Oy toimii Espoossa, Tampereella ja Vihdissä. Yritys on riippumaton testauslaitos, jonka toiminta on oleellisilta osin FINASin akkreditoima. (1.)

1.2 Lujuuskokeet

Insinööritötä hyödynnetään Eurofins Expert Service Oy:n liikennevälineet ja koneet osaston lujuuskokeissa. Eurofins Expert Service Oy:n Vihdin-toimipisteessä suoritetaan ajoneuvoihin liittyviä lujuuskokeita, kuten turvaohjaamoiden, alleajosuojien ja vetokoukujen testausta. Isoin osa testeistä on turvaohjaamoiden lujuuskokeita. Turvaohjaamolla tarkoitetaan traktorin, metsäkoneen tai maansiirtokoneen ohjaamoja, joka suojelee koneen käyttäjää onnettomuustilanteissa.

Turvaohjaamoita testataan työkoneita koskevien EU:n koneturvallisuusdirektiivien mukaan. Turvaohjaamojen testausta suoritetaan metsäkoneille, traktoreille ja maansiirtokoneille. Turvaohjaamojen lujuuskokeissa simuloidaan ympäripyörittämistilannetta (ROPS), katolle putoavaa esinettä (FOPS) ja ohjaamoon tunkeutuvaa esinettä ikkunasta (OPS). Ohjaamoiden lujuuskokeita pystytään suorittamaan Vihdissä koneille, joiden massa tulee olemaan enintään 80 000 kg. Osa lujuuskokeista suoritetaan –18 °C:n lämpötilassa. (2.)

2 3D-skannaus

Yrityksellä ei ollut tarpeeksi pohjatietoa 3D-skannauksesta uuden palvelun aloittamiseksi. Tämän vuoksi insinööriyön alussa perehdyttiin 3D-skannaukseen ja sen tuomiin erilaisiin haasteisiin. Tämä suoritettiin tutkimalla eri skannausteknologioita sekä skannereiden käyttötarkoituksia. Tämän jälkeen syvennyttiin skannausteknologioihin, jotka sopivat yrityksen käyttötarkoitukseen. Lisäksi käytiin läpi skannaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä.

3D-skannauksella tarkoitetaan prosessia, jossa mallinnetaan fyysinen kappale tai ympäristö numeerisesti. Kappaleen tai ympäristön muodoista ja väreistä kerätään dataa 3D-skannerilla. 3D-skannausta käytetään pääasiassa kahteen tarkoitukseen. Ensimmäinen on Reverse engineering, eli uudelleen mallinnus. Toinen käyttökohde on kappaleen muotojen analysointi, eli kappaleen mittojen vertaaminen CAD-malliin tai toiseen skannausmalliin. (3, s. 4.) 3D-skannerin tarkoitus on skannata valittu kohde ja tuottaa sen muodoista numeerista dataa. Tätä dataa voidaan käyttää skannerin omassa ohjelmassa tai suunnitteluohjelmissa. Skannereita voidaan käyttää monissa eri tarkoituksissa, kuten ympäristön skannauksessa, pienien kappaleiden skannauksessa ja suurien kappaleiden skannauksessa. Näissä eri käyttötarkoituksissa käytetään eri skannausmenetelmiä. Skanneria valittaessa tulee määrittää ensiksi skannausmenetelmä ja tämän jälkeen valitaan skanneri. Skannausmenetelmän valinnassa ratkaiseva tekijä on kohteen koko. (4.)

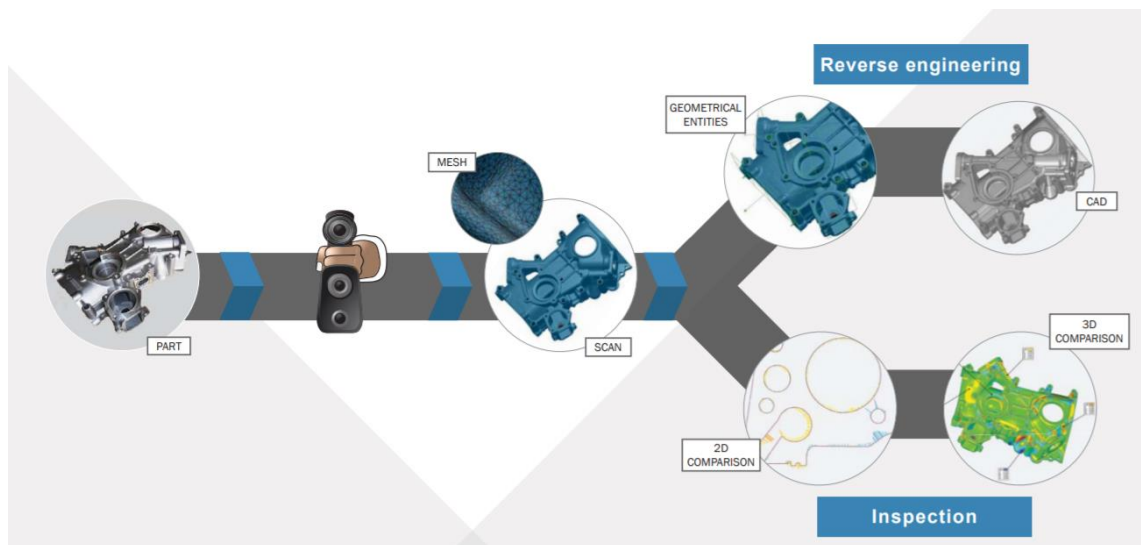
2.1 3D-skannaus ja sen käyttökohteet

Riippumatta skannausmenetelmästä skanneri tuottaa skannatessa pistepilven. Jokaisella pisteellä on paikka xyz-koordinaatistossa. Pisteiden välille muodostuu verkko, ja verkon tarkkuus riippuu pisteiden välisestä etäisyydestä. Mitä pienempi pisteiden välinen etäisyys on, sitä tarkempi skannausmallista muodostuu. Skannereissa tätä merkitään resoluutiona. Tämä pistepilvi on skannattumalli, jota voidaan jatkojalostaa käyttökohteen mukaan. Kuvassa 1 on skannerilla tuotettu pistepilvi ajoneuvon ohjaamosta. Usein skannattu malli käännetään stl-tiedostomuotoon, jolloin sitä voidaan tarkastella suunnitteluohjelmilla. Mallia voidaan myös muokata pistepilvien käsittelyyn tarkoitetuilla ohjelmilla. Näillä ohjelmilla pystytään muun muassa rajaamaan ylimääräinen skannausdata pois.



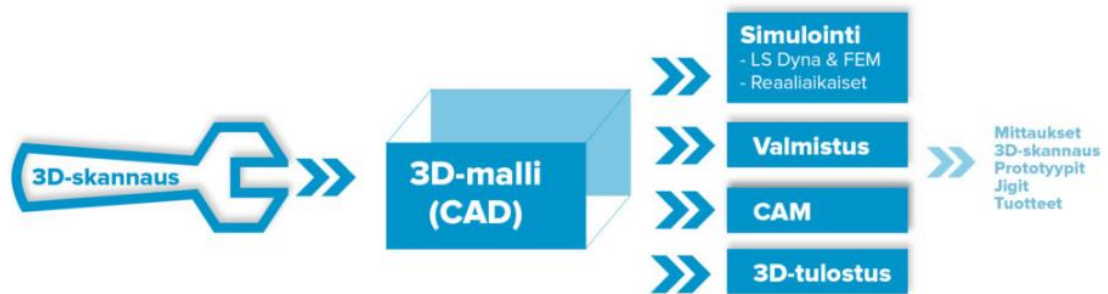
Kuva 1. Skannaus malli stl-tiedostomuodossa (5).

Skannattua pistepilveä voidaan käyttää esimerkiksi laadunvarmistukseen. Skannattua mallia voidaan verrata CAD-malliin tuotteesta. Näin nähdään valmistuksessa aiheutuneet mittavirheet. Näitä havainnoidaan yleensä värikarttana, josta voidaan luoda raportti. Raportista nähdään tärkeimmät mittavirhepisteet sekä värikartan avulla mittavirheet koko kappaleessa. Skannattua pistepilveä voidaan käyttää myös takaisin mallinnuksessa, jos skannatusta kappaleesta ei ole CAD-mallia. Kuvan 2 kaaviossa on laadunvarmistusprosessin sekä takaisinmallinnusprosessin työvaiheet. Skannausmallin luomisen jälkeen laadunvarmistuksessa voidaan tätä verrata CAD-malliin ja takaisin mallinnuksessa voidaan tätä käyttää pohjana uudelleenmallinnuksessa. (3.)



Kuva 2. Skannausmallin käyttökohteita (3, s. 4).

Reverse engineeringillä tarkoitetaan tässä yhteydessä prosessia, jossa olemassa olevasta kappaleesta luodaan 3D-malli. Tätä 3D-mallia voidaan hyödyntää uudelleenvalmistuksessa, jos tuotteesta ei ole saatavilla alkuperäisiä 3D-malleja tai piirustuksia. Skannaus on paljon nopeampi tapa kuin kappaleen käsin mittaaminen. Skannattua pistepilvimallia ei voida suoraan käyttää CAD-ohjelmissa. Pistepilvimalli täytyy muuttaa parametriseksi malliksi, jotta sen käsittely onnistuu CAD-ohjelmilla. Tämä voidaan suorittaa esimerkiksi CAD-ohjelmien lisäosilla. Mallin muuttaminen ei kuitenkaan tapahdu automaattisesti vaan vaatii käsinmallinnusta. Kuvassa 3 nähdään esimerkki käänteisen suunnittelun prosessista. 3D-skannauksen jälkeistä mallia voidaan käyttää uudelleen valmistukseen tai simulointiin. (6.)



Kuva 3. Käänteissuunnittelun prosessi ja mahdollisuudet (6).

Laadunvarmistuksessa tai kuormituksen jälkeisten muodonmuutosten tarkastelussa on skannereiden käytössä monia mahdollisuuksia. Tehdasolosuhteissa skanneri voi automaattisesti skannata valmistetut osat ja tarkastaa osan kriittiset kohdat. Muodonmuutosten tarkastelua voidaan käyttää lujuuskokeiden yhteydessä tai kolarivaurion saaneiden ajoneuvojen rungon suorituksen selvittämisessä. Kuvassa 4 on Polyworks Inspection -ohjelmassa oleva esimerkkikappale, jonka mittoja on tarkasteltu. Ohjelma on tarkastellut esimerkiksi tasomaisuuksia, pyöreyyksiä ja kulmia. Ohjelmaan voidaan syöttää raja-arvot, joiden sisällä eroavaisuuksien tulisi olla ja tämän avulla nähdään nopeasti PASS tai FAIL-tieto kunkin osan mittojen suhteen.



Kuva 4. Polyworks Inspection -ohjelmalla kappaleen mittavirheiden tarkastelu (7).

2.2 Skannausmenetelmät

Skannausmenetelmät voidaan jakaa monella tapaa erilaisiin luokkiin. Tässä insinööri-työssä jaettiin skannerit kahteen tarkasteluluokkaan, tarkastelukohteen kanssa kosketuksissa oleviin skannereihin sekä ei kosketuksissa oleviin. Kuvassa 5 on jaoteltu erilaiset skannaustyyppit, ja näiden alla on esimerkkikuvat näihin tekniikoihin perustuvista skannereista.

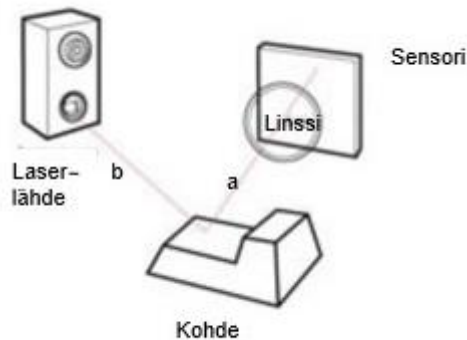
Ei-koskettavat skannerit			
Passiiviset skannerit		Aktiiviset skannerit	
Valokuvaus		Laserkolminointi	Valoskannaus
			
Koskettavat skannerit			
Koordinaattimittakone (CMM)		Mittavarsi	
			

Kuva 5. Skannausmenetelmät jaettuna eri tarkasteluluokkiin (8; 9; 10).

Insinööriyössä perehdytään enemmän ei-koskettaviin skannereihin, koska skannattavat kappaleet ovat suuria ja tarkkuutta ei vaadita niin paljon. Kontaktiin perustuvat skannerit ovat käytössä todella mittatarkoissa osissa, joista tarkastetaan esimerkiksi reikien paikkoja tai tasomaisuuksia. Ei-koskettavat skannerit voidaan jakaa passiivisiin ja aktiivisiin skannereihin. Passiiviset skannerit käyttävät hyväksi ympäristön säteilyä, kun taas aktiiviset tuottavat säteilyä. Passiiviset skannerit ovat valokuvaukseen tai videokuvaukseen perustuvia. Tässä opinnäytetyössä perehdytään vain aktiivisiin 3D-skannereihin, koska passiivisten skannereiden tarkkuus ei riitä muodonmuutoksien havainnoinnissa.

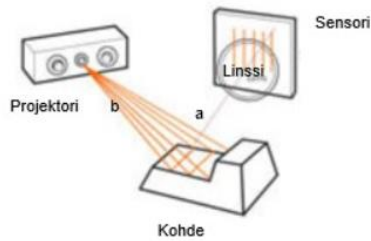
Aktiiviset ei-koskettavat skannerit voidaan jakaa kolmeen eri skannausmenetelmään perustuvaan ryhmään. Näitä skannausmenetelmiä ovat laserkolmiointi-, valo- ja laserpuls-siskannaus. Laserpulssi skannauksella suoritetaan yleensä isojen tilojen skannauksia, kuten rakennusten sisätilojen. Tämän vuoksi tässä opinnäytetyössä perehdytään vain valo- ja laserkolmiointiskannereihin, koska ne sopivat paremmin yrityksen käyttötarpeisiin. (11.)

Lasersäteisiin perustuvissa skannereissa mitataan laser säteen heijastumista kappaleen pinnasta. Kuvassa 6 on havainnollistettu, miten skannerin lasersäde heijastuu kohteesta linssin kautta takaisin sensorille. Skanneri laskee näistä heijastumista digitaalisen pinnan, josta muodostuu skannattu malli. Skanneri voi toimia yhden laserviivaan tai useiden laserviivojen avulla. (12.)



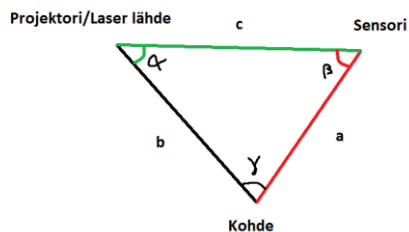
Kuva 6. Laserskannerin toimintaperiaate (12).

Valoon pohjautuvien skannereiden toiminta perustuu pinnan laskentaan heijastumista kuten laserskannereissa. Erona on, että tähän käytetään valoa ja yhdellä kuvauksella saadaan useampia heijastumia. Valoon pohjautuvilla skannereilla päästää melkein samoihin tarkkuuksiin kuin laserskannereilla. Häiriöitä skannaukseen voi aiheuttaa todella kirkas skannaustila. Kuvassa 7 nähdään projektori, joka tuottaa valonsäteet, sekä linssi, joka vastaanottaa heijastumat. Linssejä voi olla useita, sekä ne voi olla korvattu kame-roilla. (12.)



Kuva 7. Valoskannerin toimintaperiaate (12).

Laser- ja valoskannereilla tuotetun skannausmallin yksittäisten pisteiden paikanlaskenta perustuu samaan menetelmään. Riippuen skannerin rakenteesta kappaleen pisteiden paikka skannerin suhteen lasketaan eri tavoilla. Pisteiden paikanlaskenta perustuu trigonometriaan. Esimerkkinä yksinkertaistettu 2D-versio pisteiden paikanlaskennasta. Kuvassa 8 nähtävän kolmion c-mitta eli projektorin/laserin lähteen etäisyys sensorista tiedetään. Myös α -kulma laserin ja sensorin välillä tiedetään. Tästä voidaan trigonometrian avulla laskea kohteen sijainti skannerin suhteen. Kaavoja 1, 2 ja 3 soveltamalla voidaan selvittää kappaleen pisteen sijainti koordinaatiston suhteen. Tätä periaatetta laajentamalla skanneri luo kolmiulotteiseen ympäristöön pisteitä kappaleen sijainnista. (13, s. 18; 14.)



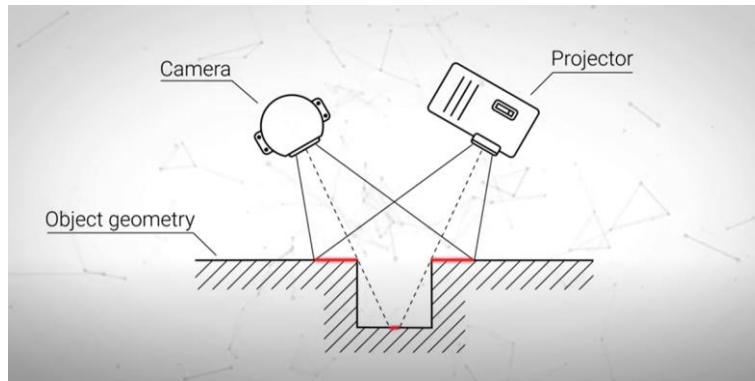
Kuva 8. Esimerkki skannattavan kappaleen sijainnin laskentatavasta.

$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)} \quad (1)$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc * \cos(\alpha) \quad (2)$$

$$c = a * \cos(\beta) + b * \cos(\alpha) \quad (3)$$

Laser ja valoskannereilla skannatessa skanneria täytyy liikuttaa, jotta kappaleesta saadaan kaikki pinnat skannattua. Kuvassa 9 on havainnollistettu, kuinka pienen syvennyksen nurkat jäävät skannatussa kappaleessa skannausalan ulkopuolelle. Syvät ja kapeat kohdat skannattavassa kappaleessa jäävät usein osittain skannaamatta. Tämä johtuu siitä, että vaikka lasersäde pääsee syvään kohtaan, ei se välttämättä pysty heijastumaan sieltä takaisin kennolle.



Kuva 9. Skannausalan ulkopuolelle jäävät alueet (15).

2.3 Skannerin sijainnin määrittäminen

3D-skannauksessa mittalaitteen täytyy olla tietoinen siitä, missä se on mitattavan kappaleen suhteen. Mittalaitteen menettäessä tietonsa sijainnistaan ei se pysty skannaamaan tai skannausmallista ei rakennu oikeanlaista. Laser ja valoskannereiden kohdistus kappaleen suhteen voidaan suorittaa mittavarren, erillisen jäljittimen, kohdistintarrojen tai kohdistintarrojen ja geometrian avulla. Seuraavana selostetaan näiden tekniikoiden toimintaperiaatteet. (4, s. 8.)

Mittavarsiskannerit

Mittavarsiskannereissa asemointi tapahtuu mittavarren sisällä olevilla encodereilla eli asentotunnistimilla, jotka jäljittävät skannerin asentoa mitattavan kappaleen suhteen. Encoder on anturi, joka muuttaa liikkeen sähköiseksi signaaliksi, jonka ohjainlaite lukee. Mittavarren jokaisessa nivelessä on encoder, joka on tietoinen kyseisen nivelen asennosta. Kuvassa 10 nähdään mittavarren sisälle asennetut asentotunnistimet.

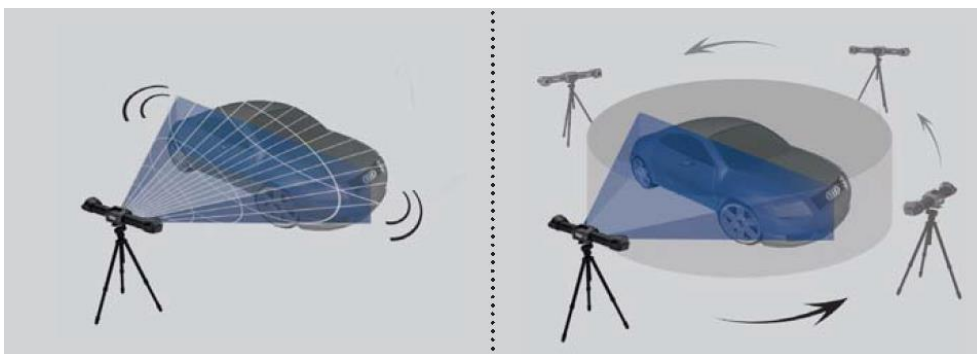


Kuva 10. Mittavarren sisällä oleva encoder (16).

Hyötynä mittavarressa on se, että siihen voidaan asentaa erilaisia skannauspäitä. Kuten kosketuspää ja laserpää. Mittavarsiskanneri ei myöskään tarvitse kohdistuspisteitä. Rajoittavana tekijä mittavarsissa on niiden pituuden rajoittama skannausala. Encoder ei myöskään pysty lukemaan asentotietoa ääriasennossa. Skannatessa vaikuttava häiriö on ympäristön värähtely, koska skannerin paikka siirtyy värähtelyn vuoksi ja encoder ei tätä pysty havaitsemaan.

Jäljittävät 3D-skannerit

Järjestelmä koostuu skannerista sekä ulkoisesta optisesta jäljitinjärjestelmästä. Tämä mahdollistaa suuren skannausalan. Kun skannattavaan kappaleeseen asennetaan kohdistustarrat, voidaan kappaletta sekä optista järjestelmää siirtää vapaasti. Jäljitin tietää, miten malli rakentuu, jos se näkee aina vähintään kolme kohdistustarraa skannattavasta kappaleesta sekä skannerinpäästä. Kuvassa 11 on ulkoinen jäljitinjärjestelmä. Sinisenä näkyvä tilavuus on skannausala, jonka sisällä skannerilla voidaan toimia.

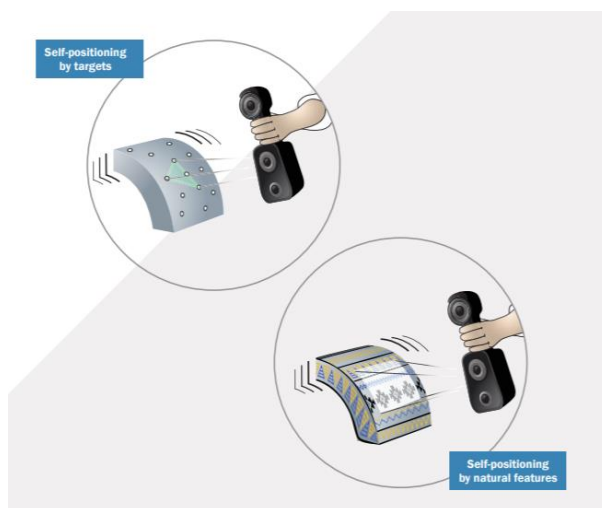


Kuva 11. Ulkoinen jäljitinjärjestelmä (8).

Kohdistintarrat ja itseasemointi

Kohdistintarroihin ja itseasemointiin perustuvat skannerit ovat käsiskannereita, jotka toimivat yleensä laserilla tai valolla. Molemmat järjestelmät analysoivat skannerille palaa-
vaa projektia. Skanneri jäljittää paikkaansa kahden kameran avulla skannattavasta
kappaleesta, sekä mittatarroista. (3, s. 8–12.)

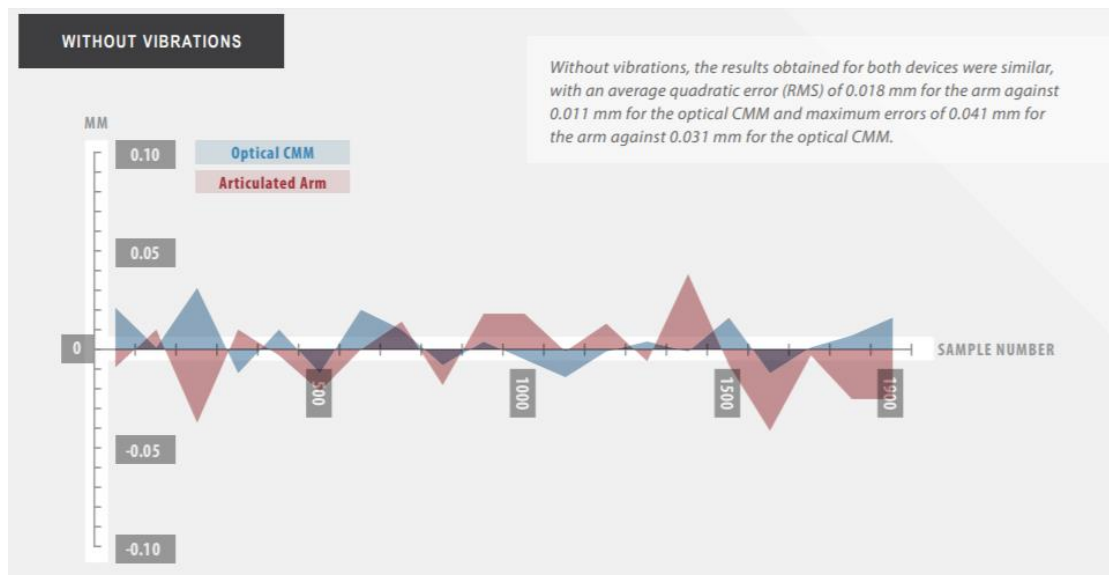
Itseasemointi voidaan toteuttaa joko kappaleeseen asennettavien kohdistintarrojen avulla tai kappaleen pinnanmuotoja ja värejä hyväksikäyttäen. Mahdollista on myös, että käytetään näitä molempia yhtä aikaa. Tämä tekee skannerista täysin kannettavan ja mahdollistaa skannattavan kappaleen siirtelemisen skannauksen aikana. Kohdistintarrat voidaan asentaa joko kappaleeseen tai sen ympärille. Skannattaessa kohdistintarrojen avulla pitää skannerin aina nähdä kolme kohdistintarraa, jotta skannaus on mahdollista. Kun skanneri paikantaa itsensä skannattavan kappaleen geometristen muotojen avulla, vertaa skanneri jokaista skannattua ruutua aina edelliseen ja kohdistaa sen paikalleen. Skannaus ei ole mahdollista tällä menetelmällä, jos skannattavan kappaleen pinnassa ei ole muotoja tai värin vaihteluja, joiden avulla kohdistaa. Yhdistetyssä vaihtoehdossa kohdistintarroja tulisi sijoittaa pinnoille, joilla ei ole näköyhteyttä erikoisiin geometrisiin piirteisiin. (3.) Kuvassa 12 nähdään, miten itseasemointia hyödyntävä skanneri ja kohdistintarroja hyödyntävä skanneri toimivat skannattaessa.



Kuva 12. Itseasemointimenetelmät (3, s. 7).

2.4 Skannerin käyttäytyminen värähtelevässä ympäristössä

Skannattaessa tuotantotiloissa on siellä ympäristön aiheuttamaa värähtelyä. Ympäristöön aiheuttaa värähtelyä esimerkiksi kävelevät työntekijät, lämmitysjärjestelmä, paineilmakompressori, työkoneet tai rakennuksen läheisyydessä sijaitsevat ajoväylät. Nämä värähtelyt siirtyvät suoraan mitattavaan kappaleeseen sekä mittalaitteistoon, mikä voi aiheuttaa mittavirheitä. Kappaleen sekä skannerin tuenta voi vaimentaa tai vahvistaa skannausalustan tuottamaa värähtelyä. Mittavirheet voivat näkyä skannausmallissa pieninä mittavirheinä koko skannausmallissa. Kuvan 13 mittaustuloksissa nähdään mittavarsiskannerin sekä itseään jäljittävän käsiskannerin tarkkuus, kun niille on tehty VDI 2634 -standardin mukainen testi. Skannereiden tarkkuus on testien suorittajan mukaan suunnilleen samaa luokkaa. (17.) Testin on suorittanut itseään jäljittäviä skannereita myyvä taho, joten testien tuloksiin pitää suhtautua varauksella.



Kuva 13. VDI 2634 -standardin mukainen testi (17, s. 4).

Kuvassa 14 nähdään samaisen testin tulokset, kun sen aikana skannerit ja kappaleet altistetaan värähtelylle. Kuvaajasta voidaan nähdä, että mittavarren tarkkuus on huonontunut verrattuna optiseen. Tämä johtuu siitä, että mittavarsi paikantaa itsensä oman varrensensa avulla, kun taas optinen järjestelmä kappaleen muotojen sekä kohdistintarrojen avulla. Kuvaajan huiput syntyvät, kun mittavarsiskannerin jalkaan kohdistuu värähtelyä, joita asentotunnistimet eivät pysty havaitsemaan. (17.)



Kuva 14. VDI 2634 -standardin mukainen testi värinälle altistettuna (17, s. 4).

3 Järjestelmän käyttökohde ja markkinatutkimus

Yritys haluaa käyttöönsä 3D-skannauspalvelun, jotta asiakkaille voidaan tarjota jotain, mitä kilpailijat eivät pysty. 3D-skannauksen avulla asiakkaat pääsevät paremmin sisälle käytännön testien ja FEA-analyysien välisistä eroista. Skannauksen avulla nähdään jokaisen lujuuskokeen jälkeisen vaiheen aiheuttamat pysyvät muodonmuutokset kappaleessa. 3D-skannauksen avulla lujuuskokeiden tulokset pystytään arkistoimaan paremmin, mikä helpottaa tulevaisuudessa niihin palaamista. Tätä arkistoa asiakas voi hyödyntää suunniteltaessa uusia ohjaamoita tai seuraavia versioita samasta ohjaamosta.

3.1 Käyttökohteet

3D-skannauslaitetta on tarkoitus käyttää pääasiassa lujuuskokeiden yhteydessä, minkä lisäksi sillä suoritetaan mahdollisesti muita skannauksia. Lujuuskokeissa on tarkoitus havainnoida testauksen jälkeinen pysyvä muodonmuutos. Muita mahdollisia skannauspalveluita ovat 3D-mallin vertaus prototyyppiin sekä skannausmallien luominen. Lujuuskokeissa skanneria voidaan käyttää turvaohjaamoiden ROPS- ja FOPS-testeissä. Skanneria voidaan lisäksi käyttää alleajosuojien ja vetokoukkujen testauksessa. Muissa suoritettavissa testeissä skanneria ei voida hyödyntää.

Lujuuskokeissa skannaus on tarkoitus suorittaa aluksi ennen testiä. Tätä skannausmallia asiakas voi halutessaan verrata tuotteen CAD-malliin ja selvittää valmistuksessa aiheutuneet mittavirheet. Ensimmäisen skannauksen jälkeen tuotteelle suoritetaan ensimmäinen lujuuskoe eli kappaletta työnnetään sylinterillä tai puristetaan kasaan. Tämän jälkeen kappale skannataan uudestaan ja tätä mallia verrataan aikaisempaan skannausmalliin. Tästä luodaan värikartta, jolla huomioidaan kappaleen muodonmuutokset. Tämän jälkeen voidaan suorittaa kappaleelle seuraava lujuuskoe, jonka jälkeen taas suoritetaan skannaus. Tätä jatketaan riippuen lujuuskokeesta 3–5 kertaa. Asiakkaalle toimitetaan lopuksi raportti kappaleen muutoksista eri skannausvaiheiden välillä sekä skannatut mallit.

Asiakkaille voidaan tarjota myös muita mahdollisia skannauksia. Vihdin toimipisteessä suoritetaan ajoneuvojen ja koneiden testausta ja mahdollisuuksien mukaan skannausta pyritään tarjoamaan mukana muihinkin palveluihin tai täysin erikseen. Mahdollisia muita palveluja ovat muun muassa ohjaamoiden tilavuuksien ja kulkureittien mittaus sekä rengaskuvioiden tarkastelu.

3.2 Markkinatutkimus

Yhtenä osana insinööriötä oli selvittää asiakkaiden kiinnostus 3D-skannausta kohtaan lujuuskokeiden yhteydessä tai erikseen. Markkinatutkimus suoritettiin yrityksen asiakkaille ja siinä painotettiin aktiivisia asiakkaita. Kiinnostuneisuutta selvitettiin asiakkaille lähetettyjen sähköpostien avulla. Sähköpostissa kerrottiin palvelusta ja kysyttiin, olisiko heillä kiinnostusta palvelun käyttöön. Tarkasteltavaksi ajanjaksoksi valittiin viisi vuotta, koska asiakasyrityksien uusien tuotteiden kehitys on vaihtelevaa ja täten testien määrät vaihtelevat vuosittain. Tarkasteltaviksi asiakkaiksi valittiin ROPS- ja FOPS-testien asiakkaat, koska skannerin käyttö tulee pääosin olemaan niiden parissa. Asiakkaat jaettiin aktiivisuuden mukaan neljään eri ryhmään.

- 1 asiakkaat, jotka ostavat palveluita enemmän kuin 20 kertaa viidessä vuodessa
- 2 asiakkaat, jotka ostavat palveluita 11–20 kertaa viidessä vuodessa
- 3 asiakkaat, jotka ostavat palveluita 5–10 kertaa viidessä vuodessa
- 4 asiakkaat, jotka ostavat palveluita 1–4 kertaa viidessä vuodessa.

Asiakkailta saadun kiinnostuksen mukaan 3D-skannauksen suhteen annettiin tälle painoarvo suoritettujen testien mukaan ja sen mukaan, mitä palveluita asiakas käyttää. Tämän avulla luotiin ennuste siitä, kuinka paljon palvelulla on käyttäjiä vuodessa, ja onko sen toteuttaminen kannattavaa. Lisäksi arvioitiin, että lujuuskokeiden ulkopuolisia skannauksia tulisi olemaan noin 10 % koko skannausmäärästä. Saatujen tuloksien perusteella luodusta taulukossa 1 nähdään, että suoritetuista FOPS- ja ROPS-testeistä noin 42 % tultaisiin myös skannaamaan.

Taulukko 1. Skannattujen testien määrä kokonaistestimäärästä asiakkaiden kiinnostuksen perusteella.

	Suoritetuista testeistä skannattaisiin
ROPS	40,1 %
FOPS	42,8 %
Yhdistettynä	41,5 %

Kun skannerin valinta on suoritettu ja testeistä on tuotettu mainosmateriaali, on tarkoitus suorittaa uusintakysely asiakkaille kiinnostuneisuuden suhteen. Tällöin pystytään antamaan asiakkaille arvio myös palvelun tulevasta hinnasta. Tämän avulla saadaan tarkempi kuva, onko palvelulle tarpeeksi kysyntää, jotta se olisi kannattavaa toteuttaa. Mainosmateriaalin avulla pystyttäisiin myös paremmin herättämään asiakkaiden kiinnostus palvelun suhteen.

3.3 Asiakkaiden tarpeet

Osana markkinatutkimusta selvitettiin asiakkaiden vaatimuksia ja tarpeita 3D-skannauksen suhteen. Tämä tehtiin sähköpostikeskusteluilla, puhelimitse sekä etäpalavereilla. Mahdollisista asiakkaista noin 20 % oli halukas keskustelemaan skannereista ja ilmaisi kiinnostuneisuutensa. Näiden asiakkaiden kanssa käytiin keskusteluja skannerin käytön hyödyistä sekä käyttökohteista ja tarpeista.

Asiakkaiden tarpeita selvitettäessä käytiin läpi tarkkuusvaatimuksia, joita skannaukselta halutaan, ja hintoja, joita siitä ollaan valmiita maksamaan. Monille asiakkaista suurena vaikuttavana tekijänä palvelun kiinnostuneisuuden suhteen oli sen tuleva hinta. Tämän vuoksi sovittiin, että asiakkaisiin oltaisiin uudestaan yhteydessä, kun palvelun tarkka hinta on tiedossa ennen laitteiston hankinnassa etenemistä. Asioita, joita asiakkaat ottivat esille keskusteluissa:

- skannaustarkkuus koko ohjaamossa noin 1 mm
- tarkkuus ohjaamon rakenteen hajoamispaikoissa pienempi kuin 1 mm
- skannattu data mahdollista saada CAD-ohjelmaan sekä FEM-ohjelmaa
- kohtuullinen hinta
- selkeä ja helposti arkistoitava raportti tuloksista.

4 Skannereiden vertailu

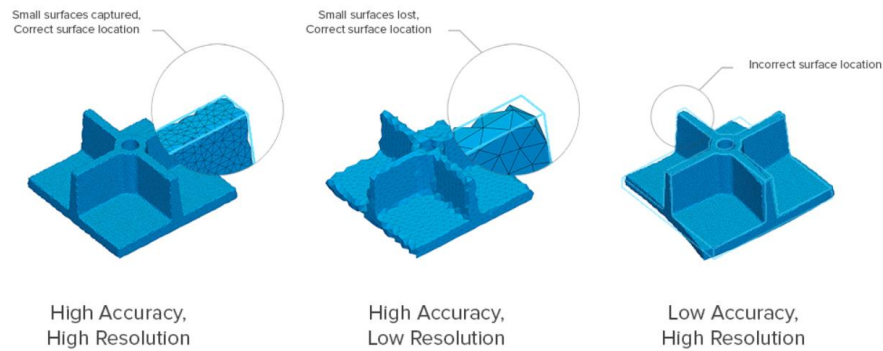
4.1 Tarkkuus, resoluutio ja skannausnopeus

Skannerin tarkkuudella tarkoitetaan skannauksessa muodostuneen pisteen mittapoikkeamaa fyysiseen esineeseen. Skannereiden tarkkuudesta puhuttaessa käytetään mikroneja (1 mikroni = 0,001 mm). Skannereiden tarkkuudet ovat 2–1000 mikronin välillä. Tarkimpia skannereita käytetään mittatarkoituksissa osissa ja vähemmän tarkempia, kun halutaan kohteesta vain yleinen geometria.

Skannerin resoluutiosta puhuttaessa tarkoitetaan kahden skannatun pisteen välistä etäisyyttä 3D-mallissa. Skannerin resoluutio vaikuttaa skannatun kappaleen yksityiskohtiin. Mitä suurempi resoluutio, sitä tarkempi skannattu 3D-malli on. Tarkkuus ja resoluutio eivät ole riippuvaisia toisistaan. Skanneri voi olla tarkka, mutta kerätä vain vähän pisteitä yhdeltä skannaukselta.

Skannereita vertailtaessa pitää huomioida myös *skannausnopeus*. Skannausnopeus määritetään fps (frames per second eli kuvaa sekunnissa) -luvulla. Kun skannattava kappale liikkuu, on iso fps-luku tärkeä – etenkin, jos skannaus halutaan suorittaa nopeasti. (4.)

Kuvassa 15 on havainnoitu, miten skannerin tarkkuus ja resoluutio vaikuttavat toisiinsa. Kun skannerin tarkkuus sekä resoluutio ovat korkeita, saadaan kappaleesta skannattua pienimmätkin yksityiskohdat. Kun skannerin tarkkuus on suuri, mutta resoluutio pieni, menetetään kappaleesta pienimmät yksityiskohdat, mutta pinnat ovat oikealla paikalla. Kun taas tarkkuus on pieni, mutta resoluutio suuri, tulee pintojen paikkoihin heittoa.



Kuva 15. Skannereiden tarkkuuden ja resoluution vaikutus (18).

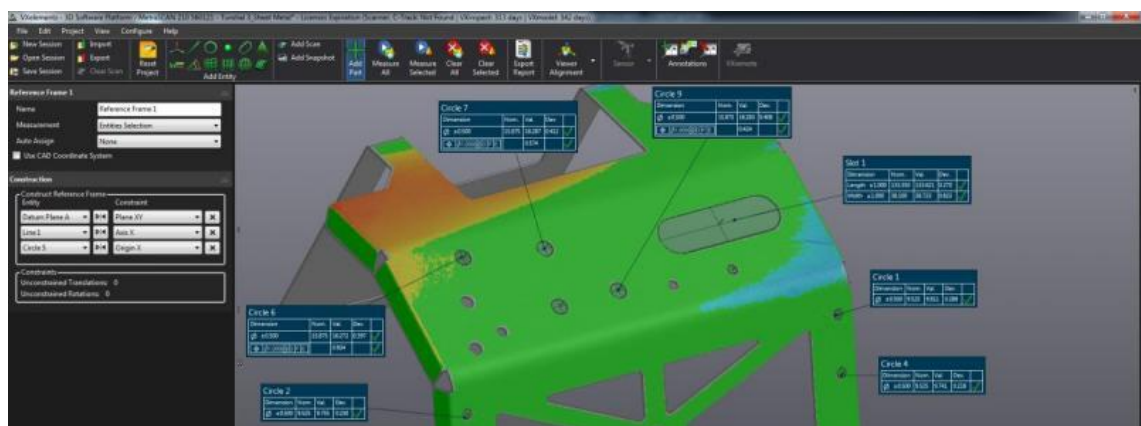
4.2 Skannerin valintaan vaikuttavat tekijät

Huomiota skannerin valinnassa pitää myös kiinnittää skannattavan kappaleen kokoon, käyttöympäristöön ja siihen, mitä skannaukselta halutaan. Heti insinööriyön alussa rajattiin kappaleiden suurien ja monimutkaisten muotojen vuoksi tutkiminen käsiskannereihin, mittavarsiskannereiden ja optisella jäljittimellä varustettuihin skannereihin. Nämä skannausmenetelmät mahdollistavat skannerin käytön myös asiakkaiden tiloissa. Kuvas-
sassa 16 on koottuna esimerkki käsiskanneri Creaformilta, mittavarsiskanneri Hexagonilta ja optisella jäljittimellä varustettu skanneri Creaformilta.



Kuva 16. HandySCAN Black (8), Hexagon RS6 (9), MetraSCAN (8).

Yhtenä tärkeänä valintaperusteena oli skannerin mukana tuleva ohjelmisto. Skannerille haluttiin oma ohjelmisto, jolla pystytään luomaan haluttu mittavirhekartta ja käsittelemään malli valmiiksi asiakkaalle. Täten tarvittavien ohjelmistojen tarve saataisiin minimoitua ja skannausraportin luominen olisi mahdollisimman tehokasta. Tällä mahdollistettaisiin skannauksen kannattavuus. Kuvassa 17 on esimerkki värikartalla toteutetusta muodonmuutoksista. Eri väreillä nähdään erisuuruiset muutokset kappaleessa edelliseen skannausmalliin tai CAD-malliin verrattaessa. Lisäksi malliin voidaan laittaa havainnointipisteistä, joista nähdään pisteen liikkuminen xyz-koordinaatiston suhteen.



Kuva 17. Creaformin VXinspect-ohjelmisto (8).

Asiakkailta saatujen vaatimuksien ja palvelun yleisen suunnittelun myötä skannerille luotiin vaatimukset tarkkuuden, resoluution ja nopeuden suhteen. Yhtenä vaikuttavana osana oli myös skannausalueen koko. Taulukkoon 2 on koottuna luodut vaatimukset.

Taulukko 2. Tekniset vaatimukset.

Valinta peruste	Vaatimus
Tarkkuus (mm)	0,1
Resoluutio (mm)	0,1
Skannausnopeus (fps)	100 000
Skannausala (m ³)	9

Tarkkuuden ja resoluution suhteen pitää huomioida, millaiselle pinta-alalle valmistaja lupaa mainitsemansa laitteen tarkkuuden ja onko tätä tarkastettu minkään standardin mukaan. Skannausnopeus ja skannausala ovat hyvin riippuvaisia käytetystä tekniikasta. Skannausnopeus voi olla pienempi, jos skannattava pinta-ala on suurempi, joten pienemmällä skannausnopeudella toimiva skanneri voi olla yhtä nopea kuin suurella skannausnopeudella toimiva skanneri, jossa on pieni skannauspinta-ala. Skannausala ei ole niin merkittävä tekijä skannerin valinnassa, koska skannausmalleja voidaan yhdistää. Kuitenkin skannausajan minimoimiseksi siirtoja tulisi olla mahdollisimman vähän.

Asiakkaille skannerin tarkkuus ja resoluutio eivät olleet ensisijaisia tekijöitä. Deformaatiokartan osalta toivottiin 1 mm:n tarkkuutta. Kuitenkin haluttiin, että skannerilla olisi mahdollista skannata tarkemmin pieniä yksityiskohtia, esimerkiksi rungosta kohtia, joissa rakenne on pettänyt. Lisäksi haluttiin, että skannerilla olisi mahdollista skannata mittatarkempia kappaleita mahdollisissa tulevaisuuden käyttökohteissa.

Huomioitavaa oli myös skannattavan kappaleen materiaali. Skannerin käyttökohteessa skannattavat kappaleet ovat yleensä metallia, jota ei ole maalattu tai pinnoitettu. Lisäksi skannattavat kappaleet voivat olla -18 °C :n lämpöisiä, kun skannaus suoritetaan. Huomioitavaa oli lisäksi skannerin monikäyttöisyys. Skannerilta haluttiin, että sitä voitaisiin käyttää mahdollisimman monissa eri tilanteissa myös lujuuskokeiden ulkopuolella, joten skannerin tulisi olla mukautuva erilaisiin kohteisiin. Kalibrointi ja lämpenemisaika olivat vaatimuksia, jotka vaikuttivat skannerin käyttönopeuteen. Skannerin tulisi olla nopea, jotta sen käyttö olisi kustannustehokasta.

Näiden vaatimuksien perusteella lähdettiin etsimään markkinoilta mahdollisia skannereita, jotka sopivat kriteereihin. Tärkeää oli myös, että skannerille löytyi tuotetuki. Yhteydenottojen myötä skannereiden jälleenmyyjiin saatiin myös heiltä suosituksia skannereista. Käytännön testeihin valittiin kahden eri valmistajan skannereita. Näillä testeillä oli tarkoitus selvittää skannereiden toiminta käytännön olosuhteissa. Näissä testeissä painotettiin skannausnopeutta ja skannauksen yleistä sulavuutta. Testeillä haluttiin myös selvittää skannausraportin luomisprosessi sekä ohjelman käytettävyyttä. Testeissä käytettiin asiakkaan toimittamaa ohjaamoja, jotta nähtiin skannerin toiminta oikeissa olosuhteissa.

5 Skannereiden käytännön testit

5.1 Tutkimusmetodit

Käytännön testeissä käytettiin asiakkaan toimittamaa ohjaamoa, jolle haluttiin tehdä FOPS- ja ROPS-testi. Päätettiin, että ensimmäisen valmistajan skannereilla suoritetaan skannaus FOPS-testin jälkeen ja tätä verrataan asiakkaan CAD-malliin. Tämän jälkeen suoritettiin ROPS-testin sivutyöntö, jota verrattiin FOPS-testin skannausmalliin. Toisen valmistajan skannerilla suoritettiin skannaus ROPS-testin puristusvaiheen jälkeen ja pitkittäistyönnön jälkeen. Ensimmäistä skannaus verrattiin CAD-malliin ja toista ensimmäiseen skannaukseen. Näistä tuotetaan skannausmallit asiakkaalle sekä raportti hytin muodonmuutoksista.

Painotettavina asioina skannausmenetelmän ja skannerin valinnassa on tässä vaiheessa skannerin käytettävyys, nopeus ja raportin luominen. Skannerin ominaisuudet tarkkuuden ja resoluution suhteen otettiin jo huomioon testiskannereita valittaessa. Testiskannerit täyttivät asiakkaiden vaatimuksen skannaustarkkuuden ja resoluution suhteen helposti. Käytännön testeissä haluttiin myös perehtyä siihen, miten skannereita voisi käyttää muissa käyttötarkoituksissa. Laitteistolta toivottiin myös, että se olisi helposti siirrettävissä ja skannaus olisi myös mahdollista suorittaa esimerkiksi asiakkaan tiloissa.

5.2 Tutkimustulokset

Käytännön testeihin valittiin kahden valmistajan neljä erilaista skanneria. Testeihin valittiin eri tekniikoihin perustuvat skannerit, jotta nähtäisiin, mikä toimisi käyttöympäristössä parhaiten. Testeihin valittiin vain skannereita, joiden skannausjärjestelmän tarkkuus oli sertifioitu standardin mukaan. Creaformin suomen jälleenmyyjä MLT Machine & Laser Technology Oy toi testattavaksi HandySCAN Black- ja MetraSCAN -skannerit. Hexagonilta käytännön testeihin saatiin RS6-skanneri sekä etädemo suoritettiin RS-Squared-skannerilla.

Creaform MetraSCAN

Creaformin MetraSCAN perustuu mittauspähän, jonka sijaintia ja asentoa seuraa optinen jäljitin. Itse mallin luominen toteutuu kahdellatoista lasersäteellä. Ensimmäisenä asiana MetraSCAN skannerin testeissä huomattiin pitkä kalibrointi aika (20 min), joka tulee suorittaa noin viiden päivän välein. Kalibrointi tulee suorittaa mittapäälle sekä optiselle jäljittimelle. Skannerin jäljitin, mittapää ja tietokone olivat yhteydessä toisiinsa johdoilla, mikä aiheuttaa testitiloissa hankaluuksia. Optisen jäljittimen mittausalueen sekä ohjaamon koon vuoksi jouduttiin jäljittimen paikkaa vaihtamaan kaksi kertaa. Mittausta suoritettaessa piti myös koko ajan huomioida, ettei seiso jäljittimen ja mittauspään välillä, koska silloin jäljitin ei tiennyt, missä skanneri oli kappaleen suhteen. Hyvänä puolena skannerissa oli, että se ei tarvinnut ohjaamoon liimattavia jäljitintarroja kuin muutaman. Kuvassa 18 nähdään MetraSCAN- skanneri. Skannerin ympärillä olevista "kiekkojen" jäljitintarroista laite osaa paikantaa itsensä. Kuvassa 19 on optinen jäljitinlaite käyttökunnossa.



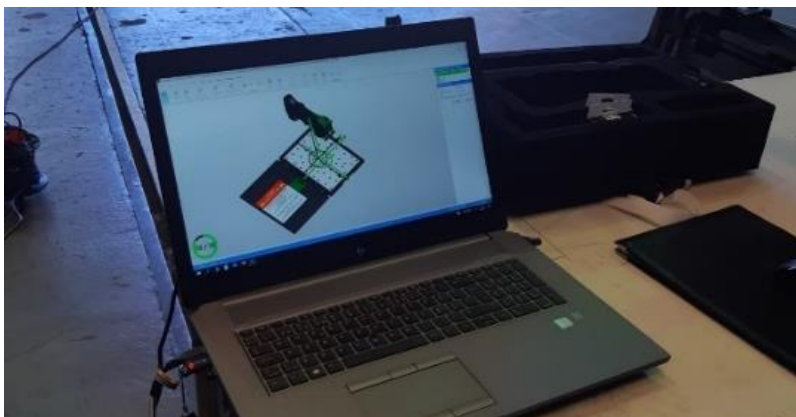
Kuva 18. MetraSCAN-skanneri (8).



Kuva 19. MetraSCAN - optinen jäljitinlaite (8).

Creaform HandySCAN Black

Creaformin HandySCAN Black on käsiskanneri, jonka skannaus perustuu yhteentoista lasersäteeseen. Skannerin paikoittaminen tapahtuu jäljitintarroilla, joita skannerin tulee nähdä samanaikaisesti kolme kappaletta. Kalibrointiajaltaan HandySCAN oli nopeampi kuin MetraSCAN (1 min). Kuvassa 20 nähdään skannerin kalibrointi. Kalibroinnissa käytettiin apuna kalibrointilevyä.



Kuva 20. HandySCANin kalibrointi.

HandySCAN-skannerin ja tietokoneen välillä on vain yksi johto, mikä helpotti skannerin käyttöä testausympäristössä. Yleisesti skannaus ja skannerin käyttö oli helppoa. Skannerin massa on vain 0,91 kg, jolloin sitä on helppo siirrellä huonoissakin asennoissa. Huonona puolena skannerissa oli jäljitintarrojen asentamiseen kuluva aika. Tarroja suositeltiin asentamaan noin 15 cm:n välein. Kuvassa 21 nähdään jäljitintarrat asennettuna ohjaamoon. Isot tarrat olivat MetraSCAN-skanneria varten ja pienet HandySCAN-skanneria. Testattavien ohjaamoiden koko voi olla jopa 3 x 3 x 3 m, jolloin tähän kuluisi paljon aikaa.



Kuva 21. Creaformin skannereiden kohdistintarrat.

Testeissä tarrat liimattiin kylmään pintaan, mikä aiheutti niiden liikkumista seuraavan jäädytyksen jälkeen. Skanneri ei pystynyt lukemaan tiettyjä kohtia muuttuneiden etäisyyksien takia. Kuvassa 22 nähdään kohdistintarrojen irtoaminen skannattavasta pinnasta. Jos tarrat asennettaisiin kuivaan ohjaamoon, niin tämä ongelma poistuisi.



Kuva 22. Kosteuden ja jäädytyksen vaikutus kohdistintarroihin.

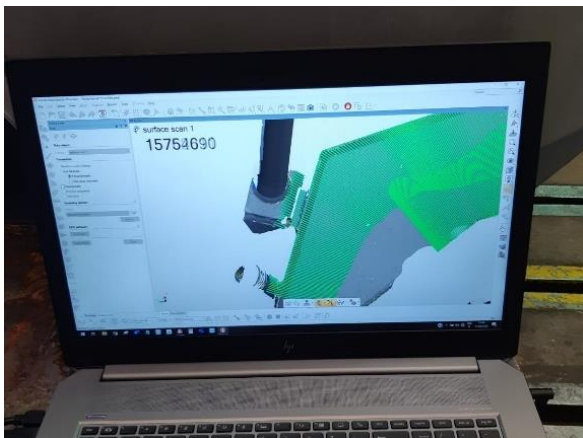
Hexagon RS6

Hexagonin mittavarsiskanneri RS6 on yhteen laserviivaan perustava skanneri. Skannerin paikoittaminen perustuu mittavarren sisällä oleviin asentotunnistimiin, jotka jäljittävät skannerin asentoa. Tämän ansiosta kappaleeseen ei tarvitse asentaa jäljitystarroja. RS6- skanneri ei vaadi kalibroitua, joten se on heti käyttövalmis. Skanneriin on mahdollista saada myös wifi-yhteys, jolloin skannerin ja tietokoneen välillä ei tarvita johtoja, mikä helpottaa testausympäristössä toimimista. Mittavarsi on mahdollista saada 4,5 metriä pitkänä, jolloin isojenkin ohjaamoiden skannaus on mahdollista suorittaa yhdellä siirrolla. Skannaustuloksien kohdistus tapahtuu skannaamalla vähän samaa aluetta, jolloin skannatut mallit voidaan kohdistaa toisiinsa kolmen pisteen avulla. Skannatessa pitää koko ajan huomioida mittavarren asento. Encoderit eivät pysty lukemaan asentoa, jos mittavarsi on ääriasennoissa. Kuvassa 23 nähdään mittavarsiskanneri käytössä. Kuten kuvasta nähdään, skannerin käyttäjä ohjaa toisella kädellä vartta ja toisella itse skanneria.



Kuva 23. Hexagon-mittavarsi ja RS6-skanneri.

Mittavartta voidaan pitää kolmijalalla, kiinnittää magneetilla tai sille voidaan rakentaa oma jalusta. Kuvassa 24 nähdään miten Polyworks-ohjelma luo skannausmallia samanaikaisesti, kun skannausta suoritetaan. Skannattavan mallin tarkkuutta voidaan säätää, jolloin malleista saadaan sopivan tarkkoja kyseiseen tilanteeseen. Tällöin mallit ovat myös kevyitä jälkikäsitellä, kun niin sanottuja ylimääräisiä pisteitä ei ole.



Kuva 24. Skannausmallin rakentuminen skannausta suoritettaessa.

Hexagon RS-Squared

Hexagon RS-Squared -skannerille ei ollut mahdollista saada testikäyttöä Suomessa valitsevan pandemiatilanteen takia, joten sen käyttöä esiteltiin etäyhteydellä Ruotsista. RS-Squared -skannerin mittavarsi on sama kuin RS6-skannerissa, mutta mittapää perustuu strukturoituun valoon. Täten skannerin skannausala saadaan suuremmaksi. Kuvassa 25 nähdään skannerin skannausalue.



Kuva 25. RS-Squared-skannerin skannausalue (9).

Skanneri ottaa kuvan neljä kertaa sekunnissa. Skannerilla pystyttiin skannaamaan suuria alueita kerralla, mutta käytössä näytti siltä, että skannerin liikuttelemista jouduttiin hidastamaan, jotta se pysyi perässä. Lisäksi skanneri vaatii lämpenemisajan, mikä pitää huomioida aina skanneria käyttöön otettaessa.

5.3 Skannausohjelmistot ja -tulokset

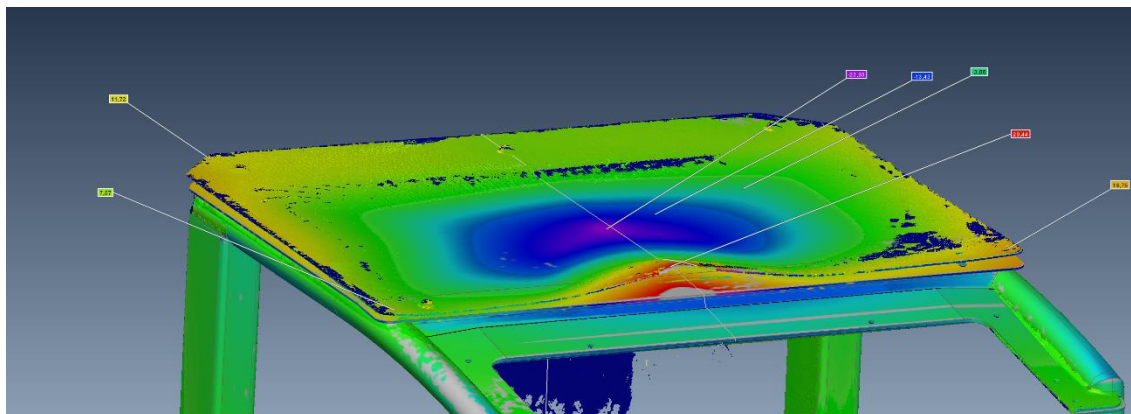
Skannereiden käytännön testeissä haluttiin myös selvittää skannausmallien luomista sekä raporttien luomisen helppoutta. Creaformin skannerit käyttivät skannausmallien luomiseen omaa ohjelmaa ja värikarttojen luomiseen Polyworksia. Creaformilta löytyy myös oma ohjelma skannausten jälkikäsittelyyn ja värimallien luomiseen, mutta jälleenmyyjän mukaan he suosivat Polyworksin käyttöä. Hexagonin skannerit käyttivät skannausmallien luomiseen sekä värikarttojen luomiseen Polyworksia. Hexagonilta löytyi myös oma ohjelma tähän. Suomen myyjä suosi Polyworksin ohjelmistoa ja Ruotsin myyjä Hexagonin omaa. Polyworksin ohjelmisto vaikutti monipuolisemmalla vaihtoehtojen suhteen, sekä automaattisen raportin luominen oli helpompaa. Myöhemmin nähtävät skannaustulokset on käsitelty Polyworks Inspector -ohjelmalla. Malleihin on luotu värillinen mittavirhekartta sekä mittapisteitä.

Skannaustulokset

Skannausten jälkeen voidaan todeta, että skannereilla pystyttiin todentamaan muodonmuutokset ohjaamossa kuten toivottiin. Ohjelmistolla pystyttiin luomaan värikartat, jotta nähtiin muodonmuutokset isossa mittakaavassa sekä tarkastelemaan tiettyjä pisteitä erikseen. Mahdollisissa tulevilla skannauksissa pitää huomioida tärkeimmät kohdat ohjaamosta ja ne kohdat mitä ei tarvitse skannata. Täten pystytään skannausaika minimoimaan. Seuraavana esimerkkituloksia skannauksista ja havaintoja, mitä näistä voidaan huomioida.

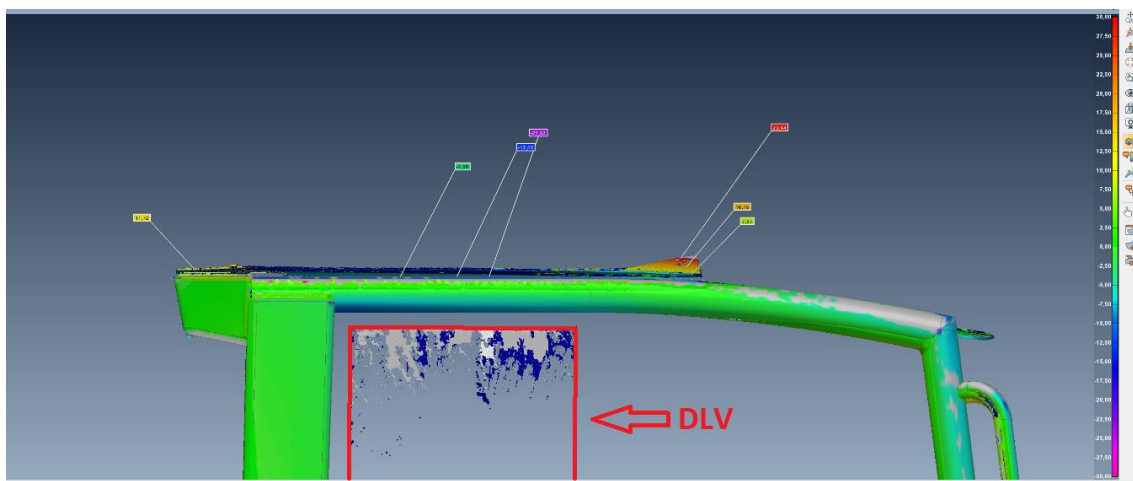
Kuvassa 26 nähdään Polyworksilla muodostettu deformaatiokartta ohjaamon katosta ISO 3449:2005 -standardin (19) mukaisen FOPS-testin jälkeen. Ohjaamon katolle on pudotettu 45 kg:n painoinen kuula, joka on pudotettu korkeudelta, jolta standardin määrittelemä energia saadaan täytetyksi. Skannausmallia on verrattu ohjaamon CAD-malliin.

Keskellä nähdään suurin muodonmuutos mittauspisteen avulla -23,93 mm, ja värien ja toisten pisteiden avulla nähdään muodonmuutos koko katossa. Katon reunoilla nähdään mittapisteitä, joiden siirtymäarvo on positiivinen eli reuna on nousut alkuperäisestä paikastaan. Katon skannaus suoritettiin MetraSCAN-skannerilla.



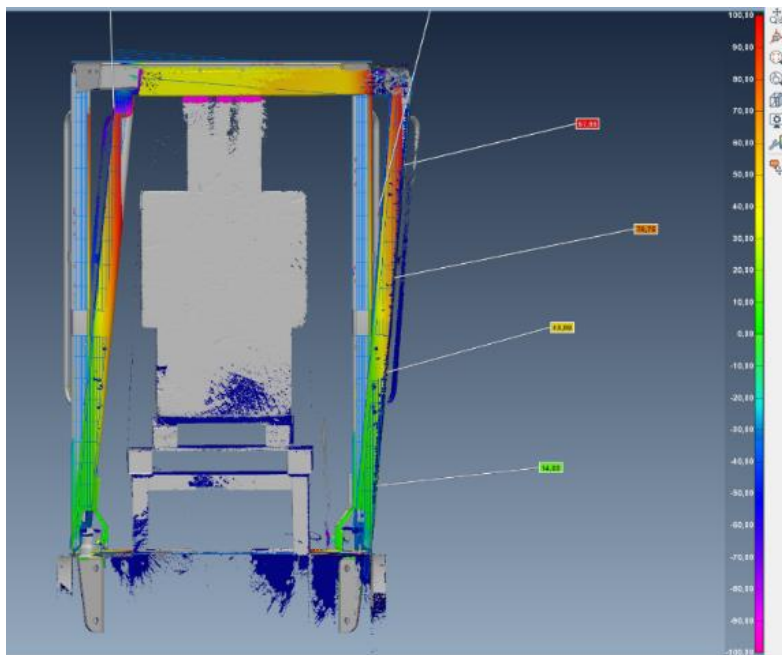
Kuva 26. Ohjaamon katto FOPS-testin jälkeen.

Kuvassa 27 tarkasteltaessa nähdään katon ja turva-alueen (DLV) välinen ero. Jos katto koskettaa turva-aluetta, on testi hylätty. Ohjelmalla voidaan lisäksi luoda leikkauskuvia, joissa nähdään deformaatio tietyllä tasolla. Tämän avulla voidaan esimerkiksi tarkastella turva-alueen kohdalle tulleita muodonmuutoksia.



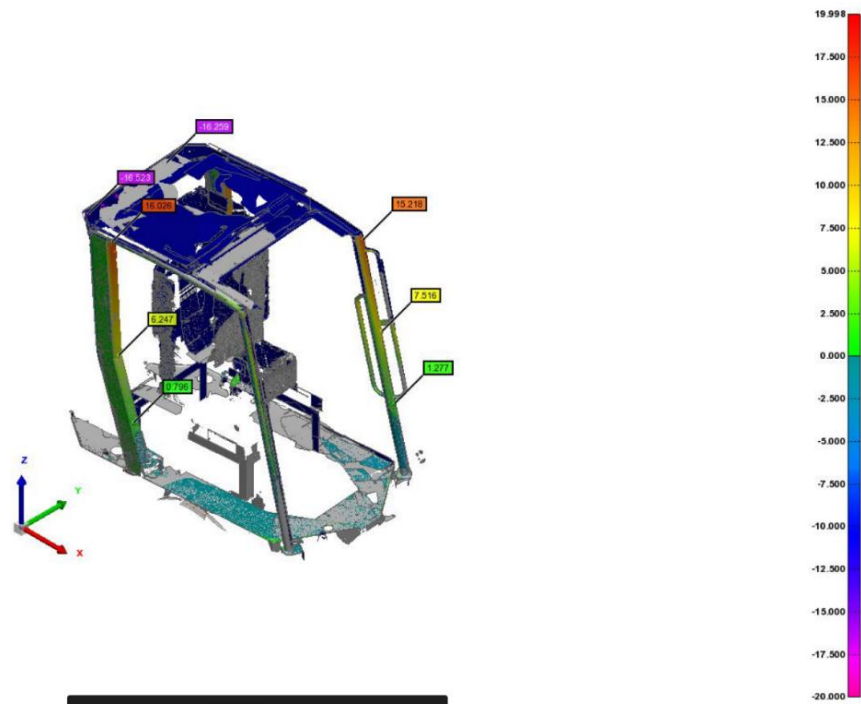
Kuva 27. Ohjaamon katto sivusta FOPS-testin jälkeen

FOPS-testin jälkeen ohjaamolle suoritettiin standardin ISO3471:2008 (20) mukainen ROPS-testi, joka koostuu kolmesta työvaiheesta: sivutyöntö, puristus ja takatyöntö. Eri työvaiheitten välisiä tilanteita haluttiin myös verrata, ja tämä suoritettiin vertaamalla skannattua mallia toiseen skannattuun malliin. Kuvassa 28 nähdään sivutyönnön jälkeinen tilanne CAD-malliin verrattuna. Mallista voidaan havaita, että ohjaamon yläosaan on tullut yli 100 mm:n suuruinen pysyvä muodonmuutos. Mallista voidaan myös huomata, että ohjaamon alakiinnikkeet ovat antaneet periksi eikä pystyputkiin ole tullut muutoksia. Skannaus suoritettiin HandySCAN Black -skannerilla.



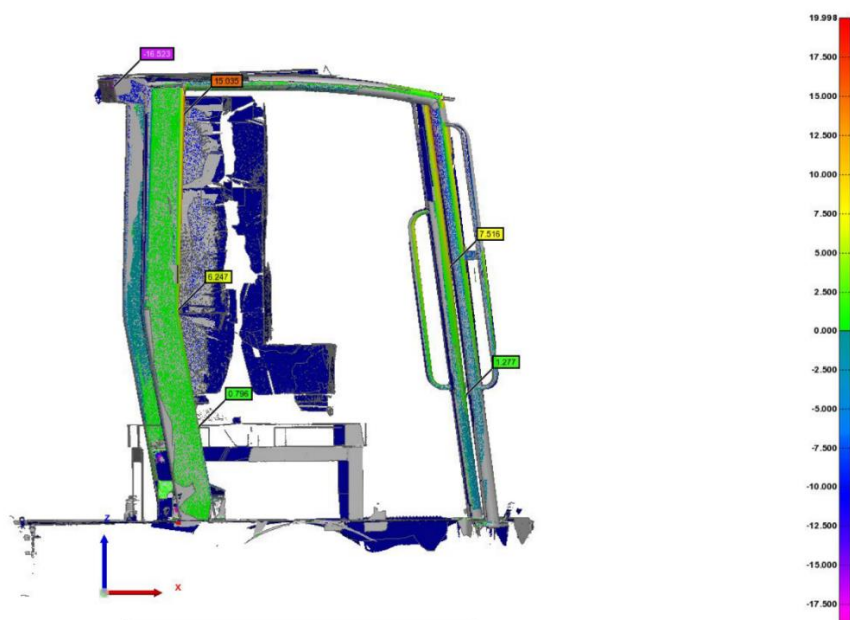
Kuva 28. Ohjaamo sivutyönnön jälkeen.

Kuvassa 29 on takatyönnön jälkeinen tilanne, jota on verrattu puristuksen jälkeiseen skannausmalliin. Kuvassa nähdään, että takatyöntö on aiheuttanut rungon yläosaan –16,523 mm:n suuruisen muodonmuutoksen. Kuvasta nähdään, että runko on lähtenyt taipumaan ohjaamon alakiinnikkeistä eteenpäin. Skannaus suoritettiin Hexagonin RS6 -skannerilla.



Kuva 29. Takatyönnön jälkeinen tilanne verrattuna puristuksen jälkeiseen tilanteeseen.

Kuvassa 30 on takatyönnön jälkeinen tilanne kuvattuna sivusta. Sivukuvasta voidaan huomioda, mistä kohtaa runko on alkanut taipua eteenpäin. Tässä tapauksessa se ei ole niin selkeästi havaittavissa pienten muodonmuutoksien takia. Sivuprofiilista voidaan myös tarkastella, että turva-alue on pysynyt turvaohjaamon sisällä koskemattomana.



Kuva 30. Takatyönnön jälkeinen tilanne sivusta.

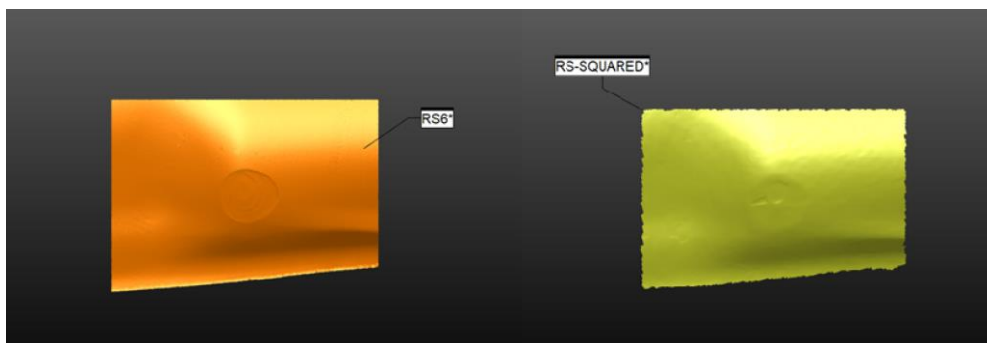
Lämpötilan vaikutus skannaustuloksiin

Käytännön testeissä otettiin huomioon myös $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$:n kappaleen lämpötila. Millekään skannerille kylmä ohjaamo ei aiheuttanut ongelmia. Skannausta suoritettaessa kappale lämpenee ja sen pinnalle kondensoituu vettä. Tästä haluttiin tutkia tarkemmin, miten se vaikuttaa skannaustuloksiin. Hexagonin RS6 -laserskannerilla ja RS-Squared-valoskannerilla skannattiin pinta, johon oli kaadettu vettä. Kuvassa 31 nähdään kappale, jossa vettä on.



Kuva 31. Ohutlevyosa, jolle on kaadettu vettä.

Kuvassa 32 on RS6- ja RS-Squared skannerilla luodut skannausmallit. Huomataan, että RS6-skanneri loi pienen kuopan vesipisaran kohdalle ja pisaran reunat ovat selkeästi havaittavissa. Huomataan, että RS-Squared-skannerin mallissa vesipisaran reunat eivät ole niin selkeästi havaittavissa. Vesipisaran keskellä on kuitenkin joitain poikkeamia pinnassa.



Kuva 32. Vesipisaran skannausmallit RS6- ja RS-Squared skannereilla.

Erot skannaustuloksissa johtuvat käytettyjen skannereiden laserin ja valon erilaisista aallonpituuksista. Eri aallonpituuksilla myös taitekerroin muuttuu toiseen aineeseen mentäessä, minkä takia skannaustulokset eroavat hieman toisistaan. Käytännön merkitys ohjaamon skannauksissa vesipisaroilla tulee olemaan mitätön, koska vesipisarot ovat niin pieniä ja ohjaamosta tarkastellaan isoja muodonmuutoksia. Pinta on myös mahdollista kuivata, jos tietyltä alueelta halutaan tarkempia tuloksia ja halutaan, ettei kondensoitunut vesi vaikuta näihin tuloksiin.

5.4 Skannerin valinta

Tutkimuksen perusteella käytännön testeihin valittiin kolmella eri kohdistustekniikalla toimivaa skanneria. Näissä kaikissa oli omat hyvät puolensa, ja niiden toimintaa haluttiin tarkastella skannerin tulevassa käyttöympäristössä. Näitä tekniikoita olivat siis mittavarsiskanneri, optisella jäljityksellä toimiva skanneri sekä jäljitintarroihin perustuva käsiskanneri. Markkinoilla oli useampia mahdollisia skannereita näistä luokista, mutta ominaisuuksien ja tuotetuen perusteella valittiin Creaformin HandySCAN Black, Creaformin MetraSCAN ja Hexagonin RS6 & RS-Squared. Hexagonilla toimii Suomessa oma yksikkö, jonka kautta skannerille saatiin demoesittely sekä mahdollinen tuotetuki tulisi olemaan saatavissa, jos skanneri hankittaisiin. Creaformin tuotteita Suomessa myy MLT Machine & Laser Technology Oy, jolta saatiin demoesittely skannereiden käytöstä, sekä mahdollinen tuotetuki tulisi heidän kautta.

Teknisten vaatimuksien ja käytännön testien perusteella päätettiin, että skannerin tulisi olla mittavarrellinen. Tähän päädyttiin, koska optisen jäljittämisen siirteleminen ja huomioiminen skannattaessa oli hankalaa testausympäristössä sekä kalibrointiaika oli liian pitkä. Käsiskannerin kohdalla kohdistintarrojen liimaaminen oli aikaavievää, sekä tarrojen mahdollinen irtoaminen skannattavasta pinnasta vaikuttaisi skannaustuloksiin. Testiskannerien jäljitysmenetelmän osalta parhaimmiksi vaihtoehdoiksi valikoitui siis Hexagonin mittavarsi RS6 tai RS-Squared skannerilla. RS-Squared skannerin huonona puoleena oli skannerille vaadittu lämpenemisaika. Vaihtelevissa skannaustilanteissa tämä olisi rajoittava tekijä, ja tämän vuoksi päädyttiin valitsemaan RS6-skanneri.

Tämän jälkeen haluttiin vielä tarkastella, olisiko markkinoilla mahdollisesti muita mittavarsiskannereita. Muilta mittavarsi skannereilta haluttiin sama langaton ominaisuus sekä 4,5 metrin mitta-alue. Skanneri voisi kuitenkin olla hieman epätarkempi. Tällä koetettiin hakea säästöä verrattuna Hexagonin skanneriin. Tällaisia vaihtoehtoja löytyi vain muutamalta valmistajalta Pohjoismaista, mutta niistä puuttui langaton käyttö, eikä jälleenmyyjiltä saatu vastauksia yhteydenottojen osalta. Tämän vuoksi päädyttiin valitsemaan Hexagonin RS6-skanneri 4,5 m:n mittavarrella kustannusarvion ja myyntisuunnitelman tarkasteluun. Tämän opinnäytetyön ulkopuolella vielä palataan muihin vaihtoehtoihin.

6 Skannauspalvelun kustannusarvio ja myyntisuunnitelma

Kustannusarviota tehtäessä käytiin läpi skannerin hankinnan ja skannauksen kiinteät kulut. Näiden pohjalta pystyttiin luomaan arvio siitä, mihin hintaan palvelua pystytään myymään, jotta se olisi kannattavaa. Lisäksi arvioitiin skannaukseen kuluva tuntimäärä, jonka perusteella pystyttiin arvioimaan vaikutusta lujuuskokeiden suoritukseen. Lisäksi huomioon otettiin skannauslaitteiston mahdolliset vuosikulut kalibrointien osalta sekä ohjelmiston päivityksien kulut.

Myyntisuunnitelma toteutettiin ja laskettiin Hexagonin RS6-skannerin alustavien hintatietojen perusteella. Hexagonin RS6-skannerin hinta koostuu laitteiston hankintakuluista ja kiinteistä vuosikuluista. Skannerin hankintahinta sisältää laitteiston, ohjelmiston, tietokoneen sekä laitteiston ja ohjelmiston käyttökoulutuksen. Vuosikulut koostuvat laitteen kalibroinnista. Taulukosta 3 nähdään arviot, mistä laitteiston hankintakulut koostuvat ja mitä kiinteitä vuosikuluja laitteella on.

Taulukko 3. Laitteiston hankintakulut sekä kiinteät vuosikulut.

Skanneri	Skannauspää	Mittavarsi	Ohjelmisto	Lisäosat	Tietokone	Koulutus	Ylläpito
Hexagon RS6	24 000,00 €	36 000,00 €	17 000,00 €	2 560,00 €	3 000,00 €	3 000,00 €	4 100,00 €
Lisätietoa	RS6 skannauspää	4,5 m mittavarsi	Polyworksin ohjelmisto.	CPW, joka mahdollistaa langattoman käytön.	Tehotietoke skannerin käyttöä varten.	Laitteen ja ohjelmiston käyttökoulutus.	Kalibrointi 1-3 vuoden välein.
Kokoneishinta	Vuosikustannukset						
85 560 €	2 050 €						

Polyworksin ohjelmisto on myös mahdollista päivittää joka vuosi uusimpaan versioon, mikä maksaisi 2020 €, mutta tälle ei nähty tarvetta. Kokonaishinta laitteen hankinnalle

tulisi siis olemaan 85 560 €. Vuosittaiset kulut laitteen huollolle olisivat 2050 €, jos laite toimitettaisiin huoltoon kahden vuoden välein.

Myyntisuunnitelmassa käytiin läpi skannauspalvelun käyttöönottoon kuluva yritykseltä menevä raha sekä se, millä aikataululla se saadaan takaisin. Näiden perusteella voitiin tehdä arvio siitä, onko palvelun aloittaminen kannattavaa.

Kuluja palvelun aloittamisessa on skannerin hankintakulut. Huomioon ei otettu työntekijän koulutukseen kuluvan ajan kuluja. Muita kustannuksia palvelun aloittamiseen ei ole, koska palvelu tulee toisen valmiin palvelun rinnalle, jolloin jo mahdolliset muut tarvikkeet ovat jo olemassa.

Aikaisemmin suoritettua asiakaskiinnostuneisuusselvityksen myötä pystyttiin arvioimaan skannerin käyttömäärän suoritettujen testien suhteen. Sekä pystyttiin laskemaan viideltä vuodelta keskiarvo suoritetuista ROPS- ja FOPS-testeistä, joissa laitetta tulitaisiin pääasiassa käyttämään. Tämän myötä pystyttiin luomaan palvelulle hinta, jolla sen toteuttaminen olisi kannattavaa yrityksen näkökulmasta. Asiakkaille tämän insinööritoiminnan jälkeen suoritettavan toisen kyselykierroksen jälkeen saadaan tarkemmat tiedot kiinnostuneisuudesta, jolloin pystytään tarkentamaan palvelun hintaa ja kannattavuutta.

7 Yhteenveto

Insinööritoiminnan tavoitteena oli suorittaa selvitys 3D-skannauksesta ja suunnitella uusi palvelu nykyisten turvaohjaamoiden lujuuskokeiden yhteyteen. Skannaustekniikoiden ja laitteistojen tutkimisen jälkeen suoritettiin käytännön testejä erilaisilla skannereilla, jotta nähtiin niiden toiminta käytännössä. Tämän jälkeen pystyttiin valitsemaan parhaiten tähän käyttökohteeseen soveltuva skanneri. Uuden palvelun suunnittelun perustana oli jo olemassa oleva lujuuskoe palvelu, jonka kanssa 3D-skannausta oli tarkoitus myydä. Markkinatutkimus koostui asiakkaiden haastattelusta ja tarpeiden selvityksestä. Tämän perusteella pystyttiin luomaan palvelulle hinta sekä selvittämään, onko palvelulle oikeasti kysyntää.

Mittalaitteiden tutkimisen myötä onnistuttiin valitsemaan käytännön testeihin soveltuvat skannerit ja nähtiin niiden toiminta oikeassa työympäristössä. Odotukset olivat käytännön testien osalta käsiskannerissa, mutta käytännön testeissä mittavarsiskanneri osoitautui kätevimmäksi tähän tarkoitukseen. Käsiskannereiden kohdistintarrojen paljouden määrä skannaamisen suorittamiseksi oli yllättävän aikaavievää. Käytännöntestien skannausmallien osalta tulokset olivat hyviä, ja niistä pystyttiin tarkastelemaan haluttuja muodonmuutoksia. Skannauksista saadut mallit ja raportit olivat myös ominaisuuksiltaan asiakkaan hyödynnettävissä ja arkistoitavissa.

Markkinatutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että skannerin hankinta olisi perusteltavissa. Palvelulle on sen verran kysyntää jo olemassa olevien asiakkaiden pohjalta, että palvelun hinta saadaan sille tasolle, että asiakkaat ovat valmiita ostamaan sen.

Insinööriyön aikana opittiin eri skannausmenetelmistä ja niiden toimintaperiaatteista. Lisäksi perehdyttiin erilaisiin mahdollisuuksiin, joihin skannereita voidaan käyttää. Insinööriyön aikana käytiin läpi myös uuden palvelun perustamisprosessi.

Tämän insinööriyön avulla yritys sai selvitettyä, mikä skannausjärjestelmä sopii tarkoituksenmukaiseen käyttöympäristöön parhaiten. Lisäksi yritys sai selville asiakkaiden kiinnostuneisuuden palvelun suhteen ja käsityksen, mitä siltä halutaan. Tämän pohjalta yritys voi tehdä päätöksen palvelun aloittamisesta. Insinööriyön ansiosta palvelun alustava erittely on olemassa. Insinööriyön myötä yrityksellä on myös henkilö, joka perehtynyt palveluun ja täten sen käyttöönotto voidaan suorittaa nopeasti.

Lähteet

- 1 Tietoa meistä. 2019. Verkkoaineisto. Eurofins Expert Services. <<https://www.eurofins.fi/expertservices/tietoa-meistae/>>. Luettu 4.5.2020.
- 2 Ohjaamoinen lujuuskokeet. 2019. Verkkoaineisto. Eurofins Expert Services. <<https://www.eurofins.fi/expertservices/palvelut/testaus-ja-tarkastus/liikenne-vaelineet-ja-koneet/ohjaamoiden-lujuuskokeet/>>. Luettu 4.5.2020.
- 3 An introduction to 3d scanning. 2020. Verkkoaineisto. Creaform. <https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/ebook1_an_introduction_to_3d_scanning_en_26082014.pdf>. Luettu 21.5.2020.
- 4 3D-skanneri. 2020. Verkkoaineisto. AN-CADSOLUTIONS. <<https://www.an-cadsolutions.fi/3d-laitteet-ja-materiaalit/3d-skanneri/>>. Luettu 16.5.2020.
- 5 MetraSCAN 3D. 2020. Verkkoaineisto. Sketchfab. <<https://sketchfab.com/3d-models/hummer-interior-scanned-with-metrascan-3d-27929e6c45694005af4629e69bbf793d>>. Luettu 22.5.2020.
- 6 Käänteissuunnittelua digitaalisin työvälinein. 2017. Verkkoaineisto. blog.hamk. <<https://blog.hamk.fi/h3d/kaanteissuunnittelua-digitaalisin-tyovalinein/>>. Luettu 16.5.2020.
- 7 Software. 2018. Verkkoaineisto. Metrology.news. <<https://metrology.news/innovmetric-reports-record-sales-of-polyworks-licenses-in-fiscal-year-2017/>>. Luettu 10.7.2020.
- 8 Metrology. 2020. Verkkoaineisto. Creaform. <<https://www.creaform3d.com/en>>. Luettu 21.5.2020.
- 9 Products. 2020. Verkkoaineisto. Hexagon. <<https://www.hexagonmi.com/products>>. Luettu 21.5.2020.
- 10 Overview. 2020. Verkkoaineisto. Faro. <<https://www.faro.com/products/construction-bim/faro-focus/>>. Luettu 24.8.2020.
- 11 3D scanning: methods, applications and advantages. 2019. Verkkoaineisto. Edge 3D technologies. <<https://www.edge3d.io/what-3d-scanning-types-applications-advantages-and-methods-laser-lidar-contact-based-photogrammetry-triangulation-structured-pulse-light/>>. Luettu 16.5.2020.

- 12 3D-skannauksen teknologiaa pähkinäkuoressa. 2017. Verkkoaineisto. Hamkin blogit. <<https://blog.hamk.fi/h3d/3d-skannauksen-teknologiaa-pahkinankuoressa/>>. Luettu 16.5.2020.
- 13 Genechten, Van. 2008. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning, Training material based on practical applications. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia Editorial
- 14 A guide to 3D scanner technology. 2020. Verkkoaineisto. 3D Systems. <<https://www.3dsystems.com/3d-scanner/scanner-guide>>. Luettu 14.7.2020.
- 15 Range Vision 3D scanners. 2019. Verkkoaineisto. Range Vision. < <https://range-vision.com/en/company/news/learn-more-about-rangevision-3d-scanners-on-our-youtube-channel/>>. Luettu 14.7.2020.
- 16 Features. Verkkoaineisto. 2020. Industrial measurement solutions. <<http://www.measure.com.au/pages.php?id=113>>. Luettu 14.7.2020.
- 17 21st century measuring challenges. 2013. Verkkoaineisto. Creaform. <https://www.ems-usa.com/tech-papers/21st_Century_Measuring_Challenges_2015.pdf>. Luettu 24.5.2020.
- 18 How to choose the best 3D scanner to use with your 3D printer. 2020. Verkkoaineisto. Formlabs. <<https://formlabs.com/uk/blog/how-to-choose-a-3d-scanner-for-3d-printing/>>. Luettu 22.5.2020.
- 19 ISO 3449:2005. Earth-moving machinery – Falling-object protective structures (FOPS) – Laboratory tests and performance requirements. 2006. Geneva: International Organization for Standardization.
- 20 ISO3471:2008. Earth-moving machinery – Roll-over protective structures – Laboratory tests and performance requirements. 2008. Geneva: International Organization for Standardization.