



Murskauskammion mittaus ja laadunvarmistaminen 3D-skannaamalla

Leevi Louhivuori

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2023

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotekehitys & koneautomaatio

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Tuotekehitys & koneautomaatio

LOUHIVUORI, LEEVI:
Murskauskammion mittaus ja laadunvarmistaminen 3D-skannaamalla

Opinnäytetyö 46 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Toukokuu 2023

3D-skannaaminen on kasvattanut suosiotaan valmistavan teollisuuden tuotekehityksessä, jossa sen suurin hyöty saavutetaan takaisinmallinnuksessa (eng. reverse engineering) sekä laaduntarkkailussa. 3D-skannauksen merkittävimminä etuina ovat nopeus ja tarkkuus mitata monimutkaisinkin kappaleen geometria verrattuna perinteisiin käsikäyttöisiin mittavälineisiin. 3D-skannauslaitteistot ovat viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana kehittyneet entistä tarkemmiksi ja kompaktimman kokoisiksi. Tämän ansiosta tutkittava kappale voidaan esimerkiksi mitata jo asiakkaan tiloissa ja näin välttää kappaleen kuljetuksesta aiheutuvat rahtikustannukset.

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin nykyaikaisiin 3D-skannauslaitteistoihin ja -tekniikoihin sekä tutkittiin niiden soveltuvuutta Metso Outotecin kivenmurskaimien kulutusosien mittaamiseen ja laaduntarkastukseen sekä kuluneiden murskainterien muodonmuutosten mallintamiseen. Tutkimus rajattiin Metson GP-sarjan murskauskammioiden tarkasteluihin.

Työssä tutkittiin edellä mainittuihin käyttötarkoituksiin soveltuvia 3D-skannereita teknisten tietojen sekä käytännön testien perusteella. Jälleenmyyjien laite-esittelyiden sekä koekäyttöön saatujen laitteiden ansiosta pystyttiin muodostamaan kokonaiskuva erityyppisten 3D-skannereiden ominaisuuksista ja käyttöön liittyvistä mahdollisuuksista ja rajoitteista.

Lopputuloksena syntyi kattava laitteistovertailu murskauskammion mittauksiin ja laadunvarmistukseen soveltuvista 3D-skannereista. Laitteistovertailun tuloksia on jatkossa mahdollista hyödyntää laitehankintoja koskevissa aloitteissa.

Asiasanat: 3D-skannaus, laadunvarmistus, murskauskammio

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Product Development & Machine Automation

LOUHIVUORI, LEEVI:
Crushing Chamber Measurement And Quality Assurance With 3D Scanning

Bachelor's thesis 46 pages, appendices 2 pages
May 2023

3D scanning has become more common in product development in the manufacturing industry, where its greatest benefit is achieved in reverse modeling and quality assurance. The most significant advantages of 3D scanning are the speed and accuracy of measuring the geometry of a complex object compared to traditional measuring instruments.

The purpose of this thesis was to examine modern 3D scanning equipment and techniques, as well as to investigate their suitability for measuring and quality control of Metso Outotec's crusher wear parts and for scanning deformations of worn wear parts. The research was limited to inspections of Metso's GP Series crushing chambers.

3D scanners from different operating principles and size categories were selected for the study. Based on the devices that were in trial use, it was possible to form an overall picture of the properties of different types of 3D scanners and the possibilities and limitations associated with their use.

The result was a comprehensive hardware comparison of 3D scanners suitable for crushing chamber measurements and quality assurance. In the future, it will be possible to use the results of the equipment comparison in initiatives regarding equipment procurement.

Key words: 3D scanning, crusher, quality assurance

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	METSO OUTOTEC OYJ.....	7
3	KIVENMURSKAUS.....	8
4	MURSKAIMET	9
4.1	GP-sarjan karamurskaimet	10
4.1.1	Toimintaperiaate.....	11
4.1.2	Syöttö	14
4.2	Murskauskammio	15
4.2.1	Rakenne	15
4.2.2	Kuluminen	17
5	KULUTUSOSIEN MITTAUS JA 3D-SKANNAUS.....	20
5.1	3D-skannaus.....	20
5.2	Tutkittavat koekappaleet	22
5.3	Skannauslaitteisto	24
6	MITTADATAN VERTAILU	33
6.1	Uusien terien laadunvarmistus.....	33
6.2	Käytettyjen terien takaisinmallinnus	36
7	YHTEENVETO	39
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	42
	LÄHTEET.....	43
	LIITTEET	45
	Liite 1. Laittevertailu - Tekniset tiedot ja ominaisuudet.....	45

ERITYISSANASTO

Murskaussuhde	Sisään syötettävän materiaalin koko suhteessa ulos tulevaan
Terä	Nimitys kivenmurskaimen kulutusosista, joita vasten materiaali murskataan
Murskauskammio	Sisä- ja ulkoterästä koostuva rakenne
Mantteli	Nimitys karamurskaimen sisäterälle
Tukipinta	Manttelin koneistettu sisäpinta
Kivipinta	Manttelin kuluva valupintainen ulkopinta
CSS	Closed Side Setting, suljetun puolen asetus
OSS	Open Side Setting, avoimen puolen asetus
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
Resoluutio	Mittaustekniikassa pienin mittapisteiden välinen etäisyys
STL	3D-mallin geometriaa määrittelevä tiedosto formaatti
CMM	Coordinate Measuring Machine, koordinaattimittalaite
PolyWorks	Tietokone ohjelmisto 3D-skannaustiedostojen käsittelyyn ja analysointiin
AutoCAD	Tietokoneavusteinen suunnittelun ohjelmisto
Siemens NX	Tietokoneavusteinen 3D-suunnitteluohjelmisto
PolyCam	3D-skannaus aplikaatio matkapuhelimiin

1 JOHDANTO

Kiviainesteollisuudessa yksi prosessin laatua kuvaavista mittareista on ”cost per ton”, eli kustannukset murskattua tuhatta kiloa kohden. Mitä pienemmät kustannukset prosessista syntyvät, sitä korkeampi kate lopputuotteelle saadaan. Käyttötarkoituksen mukaan valitun murskauslaitteiston lisäksi prosessin hyötysuhdetta voidaan nostaa tarkkaan suunnitelluilla kulutusosilla.

Kulutusosat eli terät ovat nimensä mukaisesti murskaimessa kovimman kulumisen kohteena olevat osakokoonpanot. Murskattava syöte rikotaan terien välissä, minkä takia ne on ajoittain vaihdettava uusiin. Niiden kestoikä vaihtelee viikoista jopa vuosiin, murskattavan materiaalin ominaisuuksien mukaan. Terien kuluessa tasaisesti saavutetaan paras käyttöaste. Epänormaali kuluminen laskee murskaimen kapasiteettia ja lopputuotteen laatua sekä lisää tuotantokustannuksia terien lyhyen käyttöasteen johdosta. Käytetyn terän kulumisprofiilin perusteella voidaan analysoida kulumista tapauskohtaisesti ja sen myötä optimoida terien muotoa yhä paremmaksi.

Tässä opinnäytetyössä on tutkittu Metso Outotecin toimeksiannosta eri 3D-skannereiden ja skannausmenetelmien soveltuvuutta Metson GP-sarjan karamurskainterien kulumisprofiilin tarkasteluun sekä uusien terien laadunvarmistukseen. GP-sarjan murskauskammio koostuu ulko- ja sisäteristä, ja näiden kuppimaista muotoa on jälkikäteen erittäin haastavaa mitata perinteisillä käsikäyttöisillä mittalaitteilla. Nopea ja tarkka tapa tarkastella terien geometriaa on käyttää nykyaikaisia 3D-skannaus menetelmiä. Näin mitattavasta kappaleesta saadaan nopeasti tallennettua miljoonia mittapisteitä ja jälkikäsitteilyn avulla mittatarkka 3D-malli.

3D-skannauslaitteistolta vaadittu mittatarkkuus ja muut ominaisuudet riippuvat mihin kohteeseen sitä sovelletaan. Laadunvarmistamisessa uusien murskainterien valmistustoleranssit edellyttävät tarkempaa mittaustulosta, kun taas käytetyn terän kulumisprofiilia skannatessa tärkeämmiksi ominaisuuksiksi nousevat mittalaitteen langattomuus ja kannettavuus.

2 METSO OUTOTEC OYJ

Metso Outotec Oyj on johtava kaivos- ja kiviainesalan sekä metallinjalostuksen parissa toimiva suomalainen pörssi-yhtiö, joka syntyi vuonna 2020 Metso Mineralsin ja Outotecin yhdistyttyä. Yritys työllistää yli 15 000 henkilöä ja sillä on toimintaa yli 50 maassa. Metso Outotecin tuotevalikoima sisältää kattavat ratkaisut kiviainesten käsittelyyn, mineraalien jalostukseen ja metallin jalostukseen ympäri maailmaa, joiden avulla voidaan vähentää energian- ja vedenkulutusta sekä parantaa liiketoiminnan tuottavuutta. (Metso Outotec 2023a.)

Tampereen tuotannossa valmistetaan esimurskaukseen käytettäviä leukamurskaimia sekä väli- ja hienomurskaukseen karamurskaimia. Tämän lisäksi tehdasalueella toimii suunnittelu, huoltokorjaamo sekä kivilaboratorion ja koelaitoksen kattava tutkimuskeskus. Laaja murskainvalikoima mahdollistaa lopputuotteen jalostamisen asiakkaiden tarpeiden mukaan karkeasta sepelistä hienoon hiekkaan. Metso Outotecin kehittämä siirrettävä tela-alustainen Lokotrack-murskauslaitossarja toimii tehtaan avaintuotteena. Sen teollinen sarjatuotanto alkoi vuonna 1987, ja se oli luokkansa ensimmäinen koko maailmassa. Lokotrack on kompakti, helposti liikuteltava laite, joka sisältää murskaimen lisäksi syöttimen, moottorin ja tarvittavan määrän kuljettimia. (Metso Outotec 2023b.) Kuvassa 1 esiteltynä Lokotrack LT120E, jossa C120 leukamurskain varusteltuna iskuvasaralla.

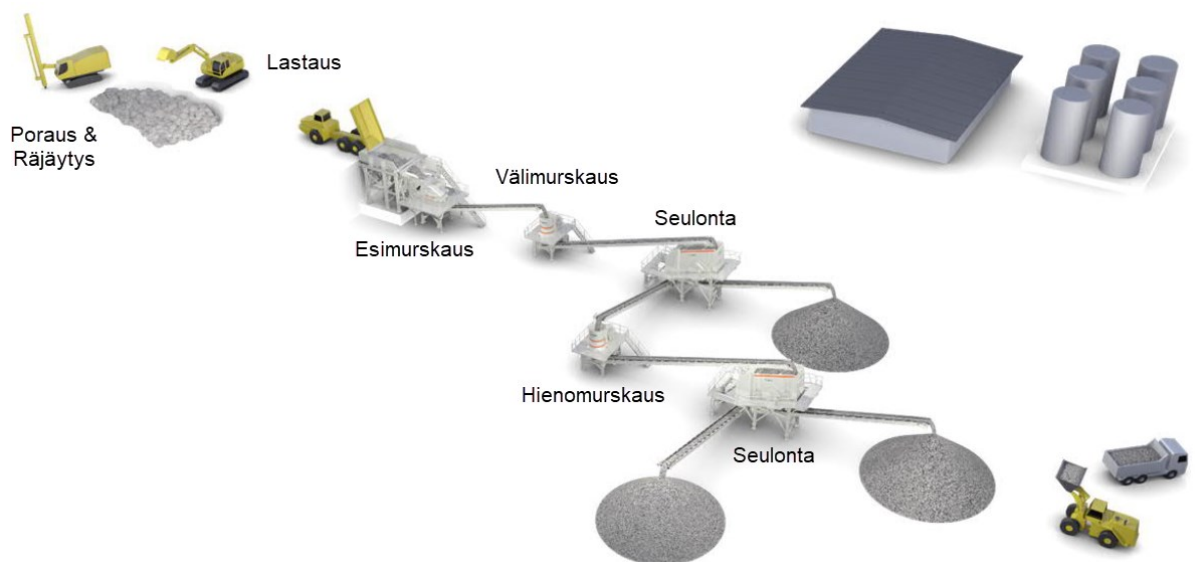


KUVA 1. Lokotrack LT120E (Metso Outotec 2023).

3 KIVENMURSKAUS

Murskausprosessin suunnitteluvaiheessa tulee ottaa huomioon, että jokainen murskauspaikka ja operaatio on erilainen. Murskaimia on saatavana paitsi kiinteinä, myös liikuteltavina ja siirrettävinä versioina. Tämä mahdollistaa murskaimen liikuttelun ja kuljettamisen murskauspaikoilla. Valittaessa teknisesti parasta ratkaisua omiin vaatimuksiin voi valinta osoittautua hankalaksi. Tätä varten on kehitetty työkaluja ja ohjelmistoja, jotka ottavat huomioon eri murskainten vahvuudet ja rajoitukset sekä käyttövaatimukset. Näiden avulla erilaisten murskainlaitteistovaihtoehtojen vertailu yksinkertaistuu ja asiakkaan päätöksenteko helpottuu. (Metso Outotec 2023c.)

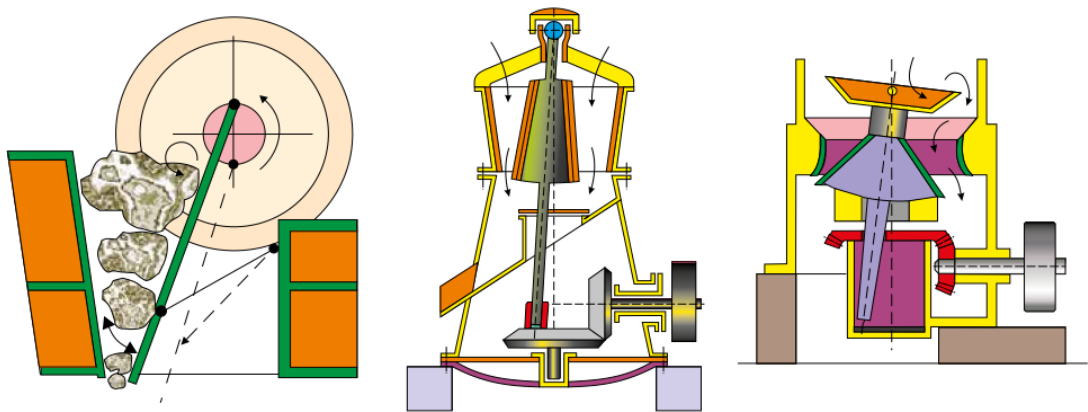
Murskausprosessi jaetaan tavallisesti 2–3 vaiheeseen, koska yksittäisen murskaimen murskaussuhde ei yleensä yksin riitä. Näin kivilouheesta saadaan jalostettua lopputuotteelle haluttu kappalekoko ja muoto. Murskausvaiheita ovat esi-, väli- ja hienomurskaus, joilla saadaan muodostettua murskausketju. Murskaimien lisäksi tarvitaan seuloja, joiden avulla esimerkiksi hieno aines voidaan erottaa louheesta ennen murskainta. (Hakapää & Lappalainen 2011, 198.) Kuvassa 2 esimerkki kiinteästä murskauslaitoksesta.



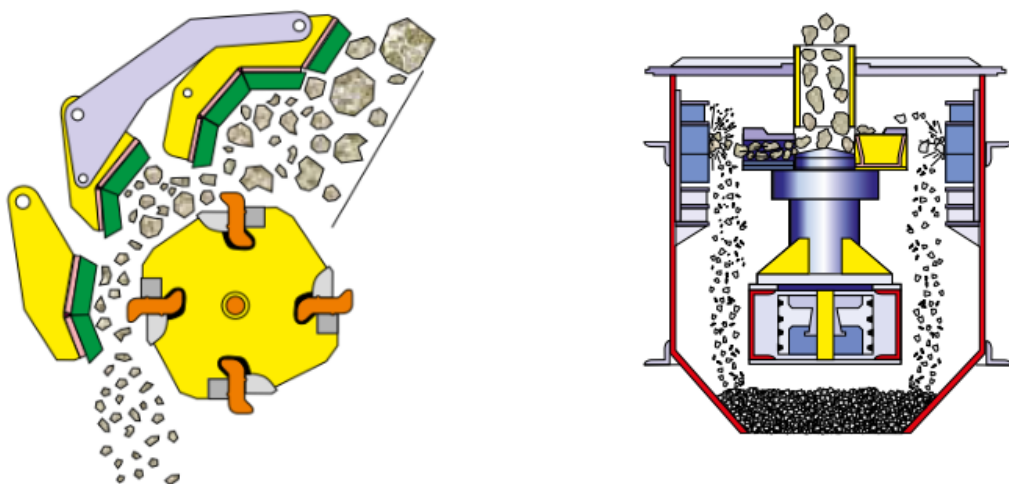
KUVA 2. Kiinteä murskauslaitos (Viilo, K. 2022).

4 MURSKAIMET

Murskaimet voidaan luokitella murskaustapansa perusteella kahteen pääryhmään; puristumurskaimiin ja iskumurskaimiin. Puristumurskaimissa materiaalia puristetaan, kunnes se murtuu. Puristusperiaatteella toimivia murskaimia ovat leuka-, kara- ja kartiomurskaimet. Iskumurskainten toimintaperiaate perustuu materiaalin pienentämiseen voimakkailla iskuilla. Tähän ryhmään lukeutuvat iskupalkki- ja keskipakomurskaimet. (Metso Outotec 2023d). Kuvassa 3 ja 4 on esitelty edellä mainittujen murskaintyyppien toimintaperiaatteet yksinkertaistettuna.



KUVA 3. Leuka-, kara- ja kartiomurskain (Metso Outotec 2023d).

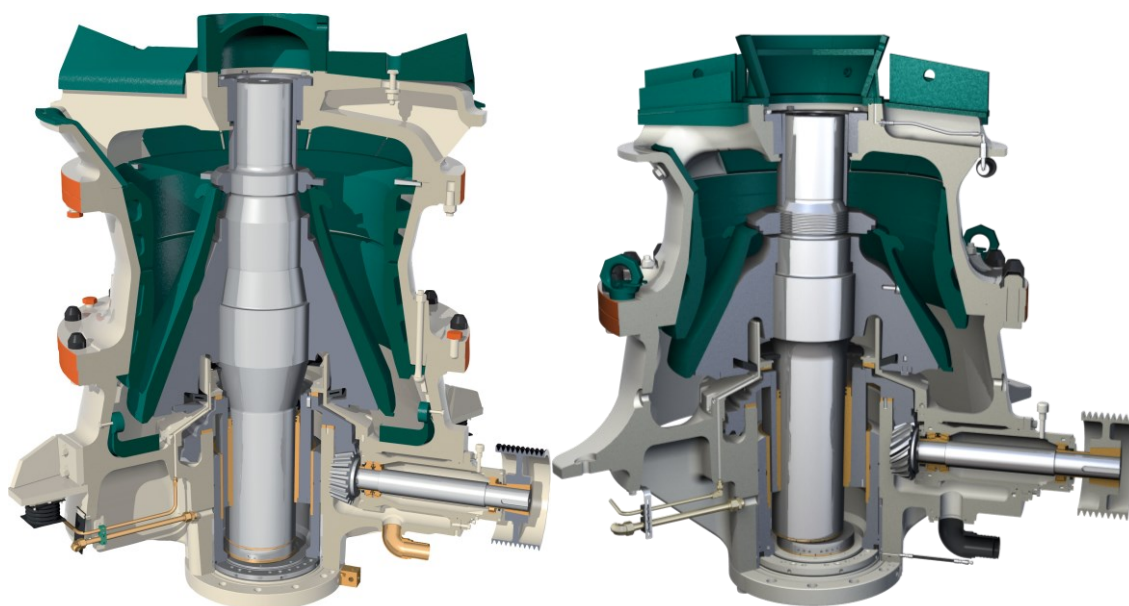


KUVA 4. Iskupalkki- ja keskipakomurskain (Metso Outotec 2023d).

Tämän opinnäytetyön tutkimuksen aihe rajattiin Metson GP-sarjan kulutusosien mittaamiseen ja tutkimiseen. Seuraavissa luvuissa tutustutaan GP-murskaimen rakenteeseen ja toimintaperiaatteeseen.

4.1 GP-sarjan karamurskaimet

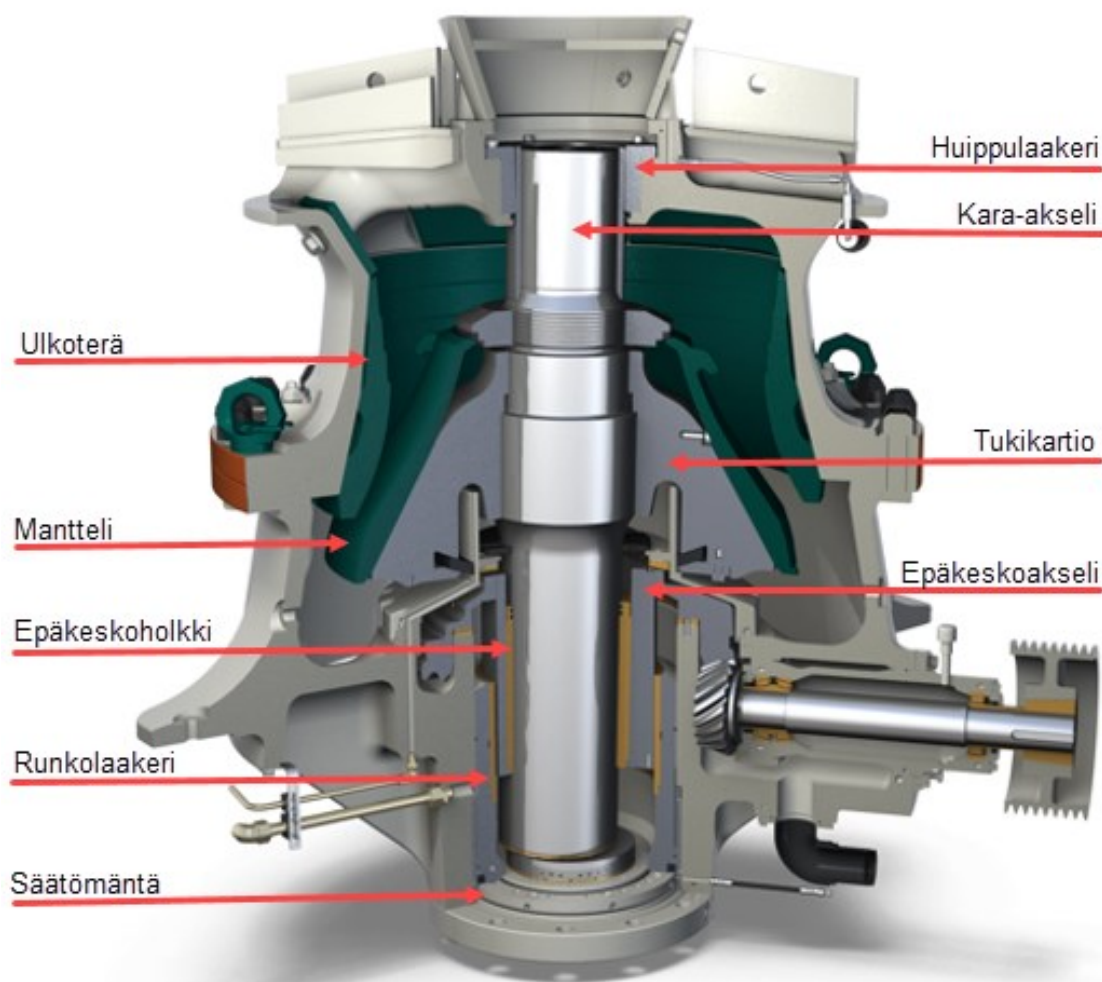
GP-Sarjan karamurskaimet on suunniteltu murskaamaan laajan skaalan materiaaleja, pehmeästä aineksesta erittäin kovaan kiveen ja malmiin. Kiviainestuotannossa ja kaivostoiminnassa kyseisen sarjan murskaimet soveltuvat parhaiten väli- ja hienomurskaukseen. Sarja koostuu kahdesta eri konetyypistä. Välimurskaukseen tarkoitettut S-mallit, jotka erottaa kolmiosaisesta runkorakenteesta, kokoonsa nähden suuremmasta syöttöaukosta sekä jyrkemmästä kitakulmasta. Toinen konetyyppi on ilman S-kirjainta nimetyt monikäyttömallit, joilla onnistuu väli- ja hienomurskauksen lisäksi myös erittäin hieno murskaus. Näissä malleissa on puolestaan kokoonsa nähden pienempi syöttöaukko, kaksiosainen runkorakenne sekä loivempi kitakulma. GP-sarjan karamurskaimia on saatavana eri kammiorakenteilla. Eri murskauskammiolla ja isku- sekä pyörintänopeuden asetuksia muuttamalla murskaimet voidaan säätää moneen eri murskaussovellukseen. (Metso Outotec 2023e.) Metsolla on tällä hetkellä valikoimissaan tarjolla seitsemän eri kokoluokan karamurskainta, joista suurimmat on esitelty kuvassa 5.



KUVA 5. GP500S & GP550 karamurskaimet (Metso Outotec 2023f).

4.1.1 Toimintaperiaate

Karamurskaimissa materiaali murskataan murskauskammiossa ulkoterän ja akselikokoonpanoon kiinnitetyn sisäterän eli manttelin välissä (Kuva 6). Kara-akseli on laakeroitu molemmista päistä ja se liikkuu oskilloivasti hammaspyörillä pyöritettävän epäkeskoakselin ja -holkin ohjaamana. Kammiota ympäröivien kulutusosien, eli ulkoterän ja manttelin välissä oleva syöte on jatkuvassa puristuksessa, joka johtaa materiaalin rikkoutumiseen. Lisäksi kammiossa esiintyy murskauspartikkeleiden välistä murskausta eli autogeenimurskausta. Tämä vaikuttaa lopputuotteen muotoon, sekä vähentää kulutusosien kulumista. (Hakapää & Lappalainen 2011, 202.)



KUVA 6. Karamurskaimen poikkileikkaus (Metso Outotec 2023f).

Suurin tuotekoko määritellään suljetun puolen asetuksen (CSS) perusteella, jolla on suora vaikutus kapasiteettiin ja tuotejakaumaan. Asetusta kasvattamalla maksimi tuotekoko kasvaa, tuotejakauma muuttuu karkeammaksi ja kapasiteetti nousee. Suljetun puolen asetus mitataan manttelin alaosaan ulkoterän alaosaan, kun ne ovat murskaussyklin aikana lähimpänä toisiaan (kuva 7). Avoimen puolen asetus eli OSS (kuva 8) puolestaan kuvaa samaa etäisyyttä murskaussyklin päinvastaisessa ääriasennossa. (Vakkuri, H 2010.)

Maksimi tuotekoko on noin 1,6...2 kertaa CSS, eli esimerkiksi 10 mm asetuksella suurin tuotekoko on suunnilleen 16-20 mm. CSS määrittää murskaimen murskaussuhteen, joka on GP-välimurskaimella tyypillisesti 3-5 ja GP-hienomurskaimella 1,5-3. (Metso Outotec 2023g.)



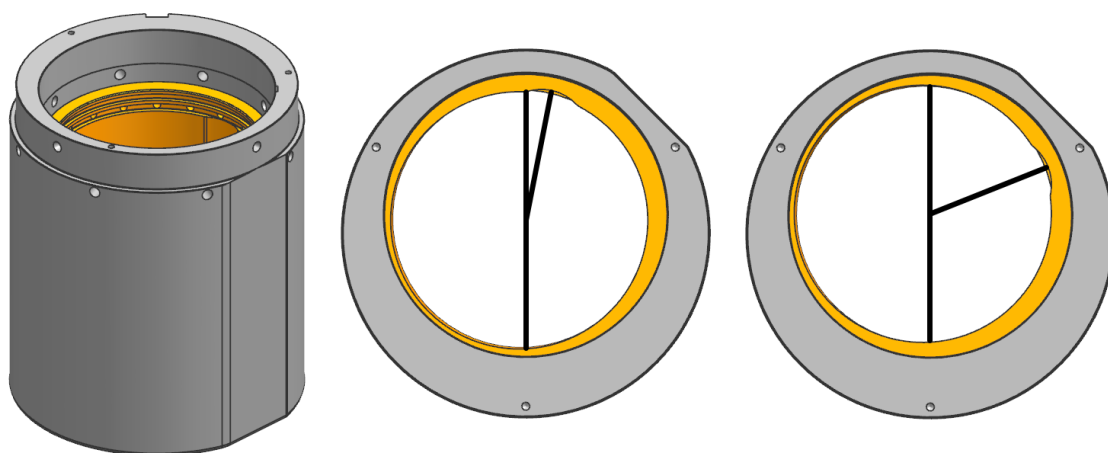
KUVA 7. CSS, Closed Side Setting (Vakkuri, H. 2010).



KUVA 8. OSS, Open Side Setting (Vakkuri, H 2010).

GP-sarjan karamurskaimissa asetusta voidaan muuttaa pohjassa olevan säätömännän (kuva 6) avulla. Säättämällä öljyn määrää männän alla kara-akselia voidaan joko nostaa tai laskea hydraulisesti murskaimen ollessa kuormitettuna. Ylikuormitustilanteissa murskainautomaatio laskee automaattisesti kara-akselia, mikäli murskattavaksi kelpaamatonta materiaalia päätyy kammioon. Näin sopimaton materiaali pääsee poistumaan kammioista ja haluttu asetus palautuu ennalleen. (Vakkuri, H 2010.)

Iskun pituudella ja suljetun puolen asetuksella vaikutetaan karamurskaimen kapasiteettiin. Murskauskammiossa iskun pituus on suljetun puolen asetuksen (CSS) ja avoimen puolen asetuksen (OSS) etäisyyksien erotus. Iskun pituutta voidaan säätää joko muuttamalla epäkeskokohtain asentoa epäkeskoakselin sisällä (kuva 11) tai vaihtamalla epäkeskokohtain toiseen. Mitä suurempi epäkeskeisyys näiden komponenttien välillä on, sitä suurempi isku saadaan. (Vakkuri, H 2010.)



KUVA 9. Epäkeskokohtain ja -akselin aseman muutos.

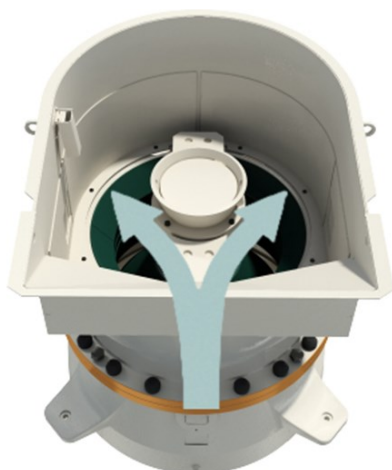
4.1.2 Syöttö

GP-sarjan karamurskaimia voidaan käyttää ns. pulssisyötöllä, mutta paras murskaustulos saadaan käyttämällä tukahdutussyöttöä (kuva 10), jossa kammio on täynnä murskattavaa materiaalia ja syöttö jatkuva. Tukahdutussyötön aiheuttama siilopaine kammiossa kasvaa ja murskauspartikkeleiden välinen murskaus lisääntyy parantaen lopputuotteen laatua. (Metso Outotec 2023g.)



KUVA 10. Syötteen taso (Metso Outotec 2023f).

Syötteen tulee jakautua kuvan 11 tavoin tasaisesti ympäri murskauskammiota, eikä siinä saa ilmetä erottelua, jossa esimerkiksi hienempi materiaali sijoittuu toiselle puolelle kammiota. Kaikista hienojakoisin materiaali (0-5 mm) tulisi seuloa syöttestä, jotta se ei aiheuta pakkaantumista kammiossa. Pakkaantuessaan hieno aines tiivistyy kasaan niin paljon, että sen tiheys kasvaa huomattavasti. Tämä saattaa aiheuttaa korkeita jännityksiä murskaimessa ja siten rasittaa esim. laakereita. (Metso Outotec 2023g.)



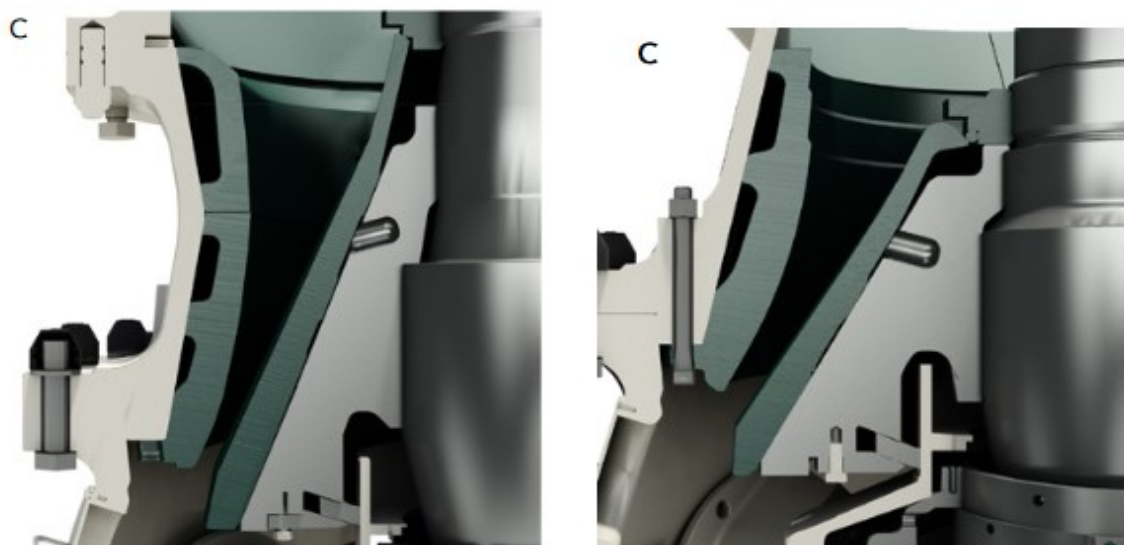
KUVA 11. Syötteen jakautuminen (Metso Outotec 2023f).

4.2 Murskauskammio

Oikea kammioduuli perustuu syötekokoon ja haluttuun tuotekokoon, ja on yksi tärkeimmistä valinnoista, kun halutaan tuottaa huippulaatuista lopputuotetta mahdollisimman matalilla kustannuksilla. Käyttötarkoituksen mukaan valittu kammio hyödyntää koko murskauspinta-alansa sekä takaa parhaan käyttöiän ja vakaan kapasiteetin. GP-sarjan välimurskaimiin on tarjolla kahta eri kammiovaihtoehtoa ja hienomurskaimiin jopa seitsemää.

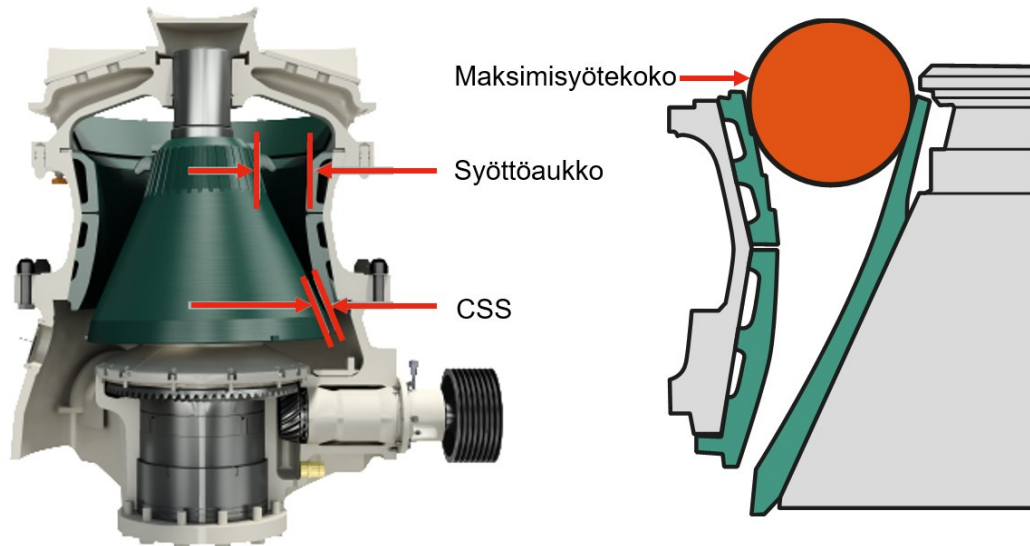
4.2.1 Rakenne

Välimurskaimen ominaispiirteenä on pystympi kammio verrattuna hienomurskaimeen, sekä kahteen osaan jaettu ulompiterä. Hienomurskaimessa kitakulma on loivempi ja terien välinen murskauspinta-ala pienempi (Vakkuri, H 2010.) Kammioiden rakenteelliset erot havainnollistettu kuvassa 12.



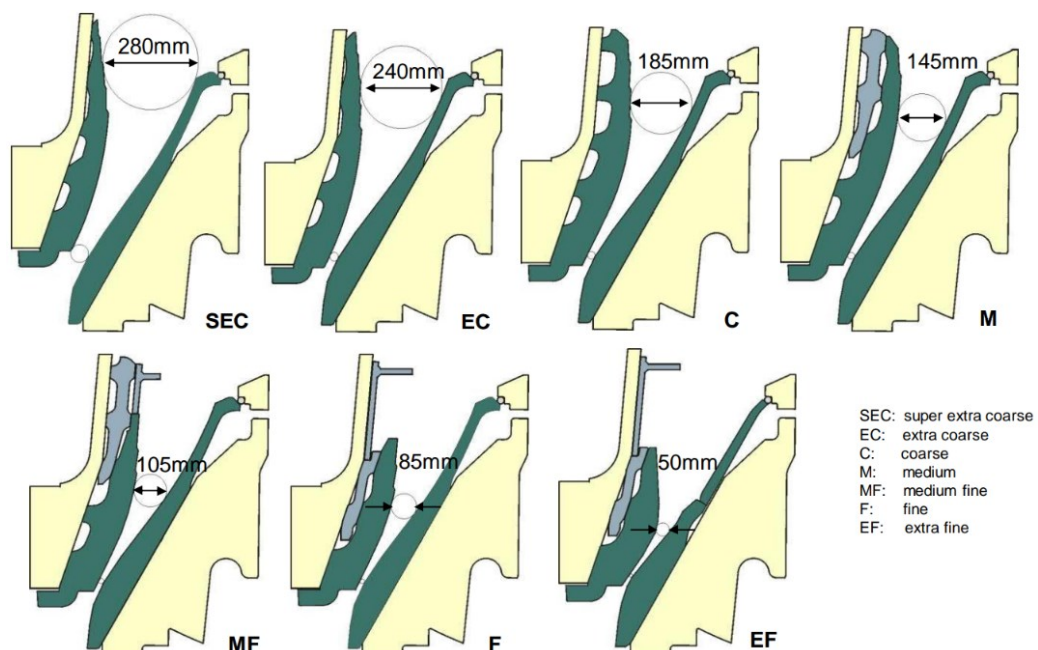
KUVA 12. Väli- ja hienomurskaimen kammiovertailu (Metso Outotec 2023f).

Kammion syöttöaukko (kuva 13) määrittää murskaimen maksimisyötekoon. GP-sarjan murskaimissa tämä on lähes sama kuin suurin aukko CSS-asennossa. Murskausterien kuluessa syöttöaukon koko pysyy vakiona, joka mahdollistaa prosessin vakauden koko terien käyttöänsä ajan. (Vakkuri, H 2010.)



KUVA 13. Syöttöaukko ja maksimisyötekoko (Metso Outotec 2023f).

Kuvasta 14 nähdään, kuinka eri kammioduulien ansiosta yksittäinen karamurskain voidaan varioida useaan eri prosessin vaiheeseen. Metso tarjoaa GP-sarjan karamurskaimiin useita eri kammio vaihtoehtoja halutun syötekoon ja asetuksen perusteella.

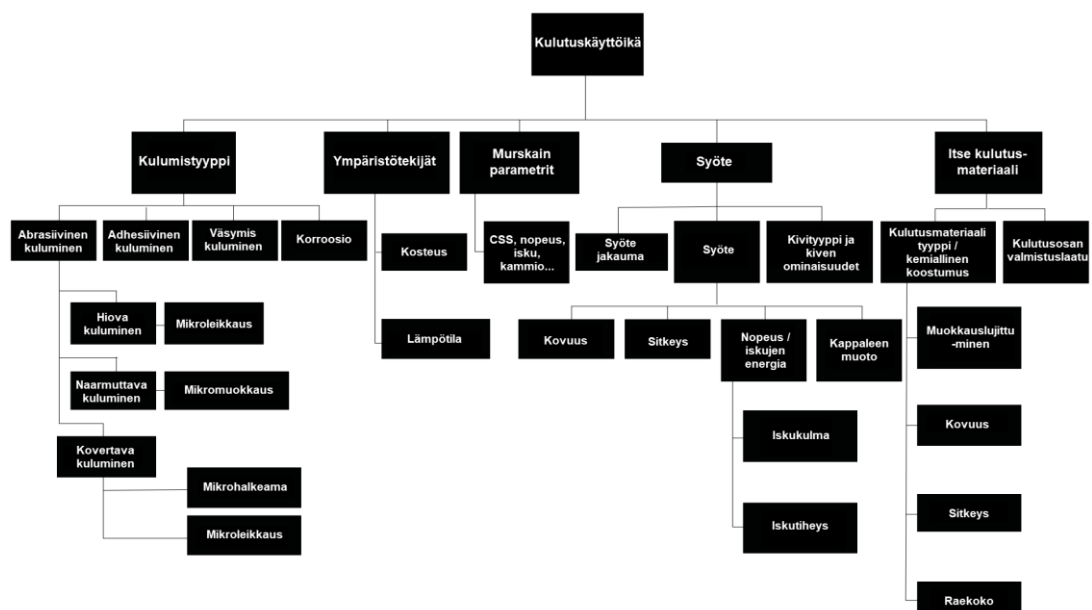


KUVA 14. Esimerkkikuva kammioduuleista (Viilo, K 2022).

Kulutusosat kuten mantteli ja ulkoterä valmistetaan austeniittisestä mangaaniteräksestä. Se on erittäin sitkeä materiaali hyvällä iskunkestävyydellä. Mangaaniteräksen kulutuskestävyys perustuu muokkauslujittumiseen, jossa sen pinta kovettuu joutuessaan kovien iskujen tai puristuskuormituksen kohteeksi. Muokkauslujittumisessa pohjamateriaali säilyy sitkeänä, mutta pinta kovettuu. Kovettuneen pinnan paksuus ja kovuus riippuu käyttösovelluksesta ja mangaaniteräksen seostuksesta. Metso tarjoaa mangaaniteräksestä valmistettuja kulutusosia erilaisilla seostuksilla, jotta ne sopivat asiakkaiden erilaisiin käyttösovelluksiin ja käytettäväksi erilaisilla kivilaaduilla. (Metso Outotec 2023d, 166.)

4.2.2 Kuluminen

Kulutusosien käyttöikään vaikuttavat päätekijät ovat kuvion 1 mukaan kulumistyyppi, ympäristötekijät, murskaimen käyttöparametrit sekä syötemateriaalin ja kulutusosien ominaisuudet. Syötemateriaalin kuluttavuus on yksi merkittävimpiä terien kulumisnopeuteen vaikuttavia tekijöitä. Karamurskaimen murskauskammiossa esiintyy eniten abrasiivista kulumista. Syötemateriaalin abrasiivisuus eli kuluttavuus voidaan määrittellä kivilaboratoriossa abraasiotestillä. Samoilla testilaitteilla voidaan myös mitata kiviaineksen murskautuvuus, jonka avulla saadaan määriteltyä esimerkiksi murskaukseen vaadittava energia. (Metso Outotec 2023d, 164 -166.)



KUVIO 1. Kulutusikään vaikuttavat tekijät (Metso Outotec 2023d).

Kulutusosien käyttöiän maksimoimiseksi murskauskammion syöttö tulisi olla jatkuvaa ja tasaisesti kammioon jakautuvaa. Materiaalin epätasainen jakautuminen kammiossa saattaa johtaa ulkoterän epätasaiseen kulumiseen. Kammio tulisi olla jatkuvasti täynnä, jotta kivipartikkeleiden välinen murskaus olisi maksimaalista ja kulumismuoto säilyisi normaalina. Ylisuuri syöte (kuva 15) laskee murskaimen kapasiteettia ja saattaa aiheuttaa tarpeettomia kuormituksia. Liian pieni syöte lisää kulumista terien alaosassa heikentäen kulutusosien käyttöastetta. (Metso Outotec 2023g.)



KUVA 15. Esimerkkikuva ylisuuresta ja liian pienestä syötteestä (Metso Outotec 2023g).

Karamurskaimen terien käyttöikä saattaa vaihdella viikosta jopa kymmeneen vuoteen. Tämä selittyy eri kivilajien kuluttavuuden suuresta vaihtelusta. Kapasiteetin heikentyminen, huonolaatuinen lopputuote ja lisääntynyt tehon tarve murskaimessa ovat yleensä selkeitä oireita kulutusosien epänormaalista kulumisprofiilista tai epätasaisesta kulumisesta. Tästä johtuen kulutusosat joudutaan vaihtamaan ennenaikaisesti, joka johtaa huonoon kulumisprosenttiin. (Peltomäki, K 2023.) Kuvassa 16 käytöstä poistettu mantteli, jossa on epänormaalia kulumismuotoa.



KUVA 16. Kuppiintunut mantteli (Metso Outotec 2012).

Karamurskaimen terien normaali kulumisprofiili on havainnollistettu kuvassa 17. Ulkoterä ja mantteli kuluvat toisiinsa nähden tasaisesti ja terien kulumista voidaan kompensoida kara-akselia nostamalla, jotta asetus säilyy oikeana koko terien käyttöajan. Normaali kulutusprofiili saavutetaan valitsemalla tapauskohtaisesti oikea kammioduuli. Kulumista voidaan arvioida vertaamalla kuluneiden terien geometriaa ja painoa vastaaviin käyttämättömiin teriin. Laskelmissa tulee myös ottaa huomioon terien käyttö, eli kuinka monta tonnia niillä on murskauttu suhteessa kulutettuun materiaaliin. Teriä ei kuitenkaan tule kuluttaa ns. puhki, jotta tukikartio tai runko eivät vahingoitu.



KUVA 17. Esimerkki terien normaalista kulumisprofiilista (Metso Outotec 2023g).

Kuvassa 18 esimerkki epänormaalista kulumisesta, jossa mantteli ja ulkoterä kuluvat keskeltä eli "kuppiintuvat". Seurauksena materiaalivirtauksen hidastuminen kammiossa sekä materiaalikeskittymät. Tämä nostaa paineita murskaimen sisällä ja murskainautomaatio alkaa avaamaan asetusta ylikuormituksen välttämiseksi. Asetuksen auetessa isommat murskaimen läpi pääsevät kivipartikkelit joudutaan ohjaamaan takaisin prosessikiertoon ja seulotun lopputuotteen määrä pienenee. (Peltomäki, K. 2023.)

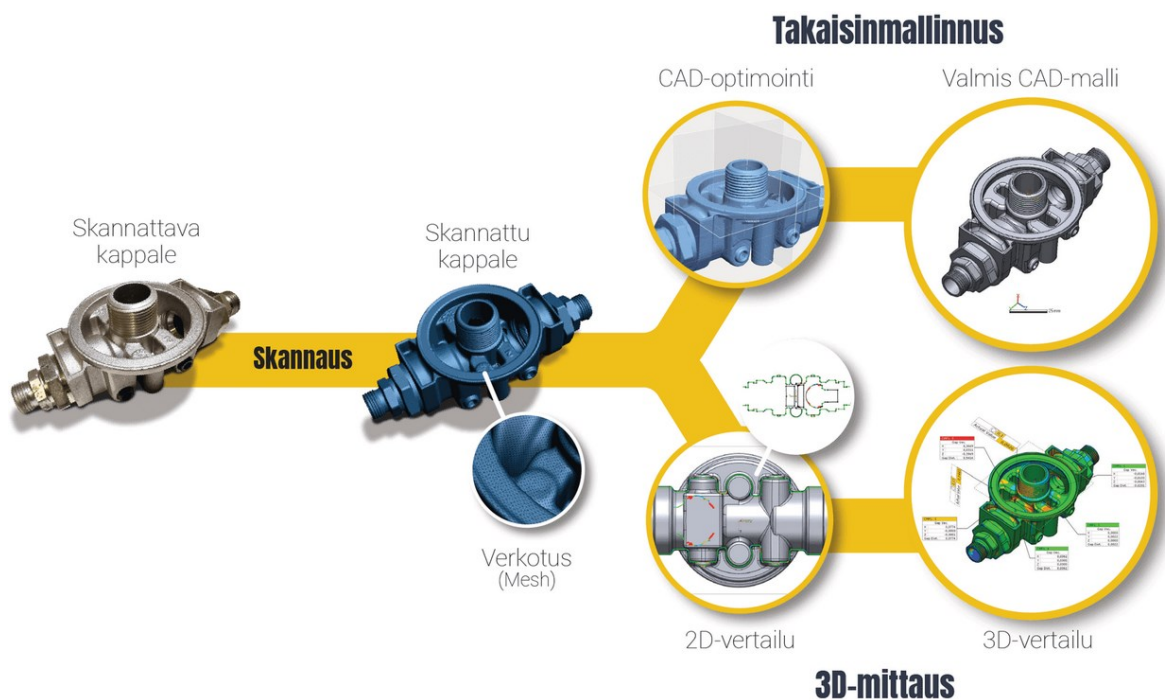


KUVA 18. Esimerkki terien epänormaalista kulumisprofiilista (Metso Outotec 2023g).

5 KULUTUSOSIEN MITTAUS JA 3D-SKANNAUS

5.1 3D-skannaus

3D-skannaus on nopea ja tarkka menetelmä tallentaa kappaleen geometria 3D-malliksi, jonka mittoja ja muotoja voidaan jälkikäteen tarkastella CAD-ohjelmilla. Skannauksesta saatava data koostuu miljoonista mittapisteistä, jotka yhdessä muodostavat niin sanotun pistepilven. Jälkikäsittelyn avulla pistepilvestä verkotetaan kappaleen pintoja mukaileva kolmiulotteinen pintamalli. 3D-skannaus soveltuu erinomaisesti kaarevien pintojen ja monimutkaisten geometrioiden mittaamiseen ja tarkasteluun, jotka normaalisti vaatisivat paljon aikaa ja mittapisteitä perinteisiltä mittavälineiltä. 3D-skannaus on kasvattanut suosiotaan etenkin valmistavassa teollisuudessa, jossa sitä hyödynnetään mm. takaisinmallinnuksessa (eng. reverse engineering) sekä laaduntarkkailussa, kuten kuvassa 19 on havainnollistettu.



KUVA 19. 3D-skannauksen kulkukaavio (ATI-Teräs 2023).

Metalli- ja konepajateollisuudessa yleisemmin käytetyt 3D-skannerit voidaan jakaa kolmeen eri toimintaperiaatteeseen. Merkittävimmät erot näissä muodostuvat skannaustarkkuudesta, -nopeudesta, -alueesta sekä tarkasteltavan kohteen ympäristöstä. Alla kyseisistä toimintaperiaatteista lyhyesti.

Laserkolmiomittaus

Kyseistä toimintaperiaatetta käyttävä skanneri heijastaa lasersäteen skannattavalle pinnalle, josta se palaa takaisin skannerin sensorille. Laserin lentoradan ja trigonometrisen kolmiomittauksen perusteella saadaan lasersäteen kulmapoikkeama, joka on suoraan verrannollinen skannerin ja pinnan etäisyyteen. Etäisyyksien perusteella skanneri luo paikkapisteitä, joista saadaan jälkikäsitellyllä luotua kolmiulotteisen pinnan. Laserkolmiomittauksen etuna on sen korkea resoluutio ja tarkkuus. Heikkoutena on herkkyys kiiltävän, läpinäkyvän tai tummien pintojen aiheuttamille häiriöille. (Aniwaa 2021.)

Strukturoitu valo

Strukturoitu valo toimii myös trigonometrisen kolmiomittauksen avulla, mutta lasersäteen sijaan käyttää valonsäteillä kappaleen pinnalle projektoituja lineaarisia kuvioita. Kuvion viivojen muodonmuutosten perusteella järjestelmä kykenee laskemaan etäisyyden skannerista kohteen pintaan. Toimintaperiaatteen tärkeimmät edut ovat nopeus ja tarkkuus, mutta heikkoutena herkkyys valaistusolosuhteille sekä haastavuus toimia kirkkaassa päivänvalossa. (Aniwaa 2021.)

Laserpulssi, TOF (Time Of Flight) & LiDAR (Light Detection And Ranging)

Laserpulssi mittaa lasersäteen lentoaikaa kohteeseen ja siitä takaisin sensorille. Lentoajan ja valonnopeuden perusteella saadaan määriteltyä tarkka etäisyys skannerin ja kohteen välillä. Laserpulssiskanneri kykenee 3D-skannaamaan erittäin suuria kohteita ja ympäristöjä, mutta ne ovat kuitenkin melko hitaita eivätkä läheskään yhtä tarkkoja kuten strukturoidulla valolla tai kolmiomittaus periaatteella toimivat skannerit. (Aniwaa 2021.)

5.2 Tutkittavat koekappaleet

3D-skannauslaitteistojen vertailussa yhtenä tutkittavana koekappaleena oli Metson GP330 karamurskaimen käyttämätön sisäterä eli mantteli. Terä on noin 1,3 metriä halkaisijaltaan ja painaa noin 725 kg. Kappaleen valupinnat on maalattu puolikiiltoisella vihreällä maalilla, mutta tulevaisuudessa väritys vaihtuu puolikiiltoiseen mustaan.



Kuva 20. Koekappaleen koneistettujen pintojen skannaus.

Kappale asetettiin kuormalavalle kuvan 20 mukaisesti, jotta kohteesta saatiin skannattua yhdellä kertaa laaduntarkkailun näkökulmasta kriittisimmät paikat, eli karkeasti koneistetut pinnat. Tässä tapauksessa osa ulkopinnasta jäi skannaamatta, mutta sillä ei ollut merkitystä tämän tutkimuksen kannalta.

Toisena tutkittavana koekappaleena oli käytetty GP330 murskaimen mantteli. Kuluneet terät ovat usein ruosteisia, likaisia, pölyisiä ja jossain määrin rasvaisia (kuva 21), minkä takia tällainen pinta tuottaa haasteita kohdistustarroja käyttäville skannereille. Kohdistusmerkkejä on saatavana myös magneettisena, mutta magnaanimateriaalista valmistettu kulutusosa ei itsessään ole magneettinen.



KUVA 21. GP330 käytetyn manttelin 3D-skannaus

Käytetty terä asetettiin lavalle pystyyn, jotta siitä saatiin yhdellä kertaa skannattua kulumistutkimuksessa oleellisin asia, eli ulkopinnan muodonmuutokset. Mantteli on lavalla ylösalaisin, jotta myös sisäpuolen tukipinta tuli skannattua ja saatiin muodostettua selkeä poikkileikkauskuva. Poikkileikkauskuvia tulisi saada useammasta kohtaa, jotta nähdään, onko terä kulunut tasaisesti joka puolelta. Kuluneen terän poikkileikkausta verrataan alkuperäisen CAD-mallin poikkileikkaukseen.

5.3 Skannauslaitteisto

Työn alkuvaiheissa tutustuttiin markkinoilla oleviin 3D-skannauslaitteistoihin, jotka soveltuisivat toimeksiantajan tarpeisiin. Tutkimukseen valikoitui erilaisilla toimintaperiaatteella toimivia skannereita, jotta saataisiin selkeä käsitys siitä mihin mikäkin laite kykenee tehdas- ja/tai kenttäolosuhteissa. Tutkittavien koekappaleiden perusteella rajattiin 3D-skannerilta vaadittavat ominaisuudet, jotka huomioitiin eri jälleenmyyjä lähestyttäessä. Sähköpostikeskusteluiden tuloksena järjestettiin laite-esittelyitä Metson Tampereen toimipisteen tiloissa, minkä ansiosta laitteistovertailuun saatiin 3D-skannereita monesta eri koko- ja hintaluokasta.

Työssä tutkittujen laitteiden tekniset tiedot sekä ominaisuudet taulukoitiin liitteeseen 1, jotta laitteiden välinen vertailu helpottuisi. Vertailutaulukkoon listattiin valmistajien ilmoittamien teknisten tietojen lisäksi tämän tutkimuksen kannalta oleellisimpien ominaisuuksien vertailu, kuten laitteen langattomuus, kohdistustarrojen/-merkkien tarve, IP-luokitus ja käyttöympäristösuositukset sekä hinta.

Liimattavia kohdistustarroja tai magneettisia kohdistusmerkkejä käytetään usein 3D-skannauksessa kappaleen ja skannerin väliseen paikoitukseen. Näitä käyttävän skannerin tulee yleensä havaita vähintään 3 kohdistusmerkkiä skannausalueellaan, jotta se osaa paikottaa kolmiulotteisen pistepilven. Kohdistusmerkkien tarve korostuu usein kappaleissa, jotka sisältävät paljon symmetrisiä muotoja. IP-luokituksen ja käyttöympäristö suositusten perusteella voitiin arvioida skannerin soveltuvuutta ulkokäyttöön.

FARO – Focus S150

Faro Focus S150 on laserkeilaintyyppinen 3D-skanneri, minkä toimintaperiaate perustuu laserpulssitekнологiaan. Laserkeilausta käytetään usein suurien kokonaisuuksien ja ympäristöiden taltioimisessa sisä- ja ulkotiloissa. Käsi­käyttöisistä skannereista poiketen skannaus tapahtuu staattisesti asettamalla skanneri kolmijalan päälle. Skanneri pyörii 360 astetta akselinsa ympäri tallentaen ympäristönsä. (Faro 2021.) Yksittäisen kohteen skannauksessa laserkeilaus suoritetaan minimissään kolmesta eri pisteestä kohteen ympäriltä (kuva 22).

Kyseinen laitteisto koostui 3D-skannerista, kolmijalasta sekä kuljetussalkusta, joka sisälsi skannerin oheistarvikkeet kuten akut, laturin ja muistikortin. Koko laitteiston yhteispaino on noin 10 kg. Skanneri toimii itsenäisesti ilman tarvetta lisälaitteille kuten kannettavalle tietokoneelle. Skannerissa on pieni kosketusnäyttö, josta säädetään asetuksia sekä skannausten lopputulosta voi tarkastella. Skannausdata siirretään laitteen muistikortilta tietokoneelle jälkikäsiteltäväksi.



KUVA 22. Faro Focus S150 laserkeilain aseteltuna koekappaleen ympärille.

Creaform – HandyScan 700

HandyScan 700 on Kanadalaisen Creaformin valmistama käsikäyttöinen 3D-skanneri joka hyödyntää laserkolmiomittausteknologiaa. Creaform mainostaa kyseistä laitetta erittäin käyttäjäystävällisenä kannettavana ratkaisuna, joka tarjoaa tarkkoja ja korkean resoluution skannauksia. Käyttökohteina mm. takaisinmallinnus, laaduntarkkailu ja dokumentointi. Käyttöönotto tapahtuu alle 2 minuutissa, mutta vaatii toimiakseen johdolla yhdistämisen tietokoneeseen sekä kohdistusmerkkien käytön kappaleessa. Kohdistusmerkkien ansiosta skanneri paikottaa itsensä, mikäli kappale on symmetrinen sekä kappaletta voidaan tarpeen mukaan käännellä skannausten välissä. Skannaus suoritetaan noin 300 mm päästä kappaleesta ikään kuin spraymaalamalla kappaletta (kuva 23). Kannettavan tietokoneen näytöltä seurataan skannauksen etenemistä Creaformin VXelements ohjelmiston kautta. Skanneri itsessään painaa alle kilon, ja se toimitetaan kestävässä kuljetussalkussa. (Creaform3d 2016.) Salkku sisältää oheistarvikkeita kuten johdot, laturin ja kohdistustarrat.



KUVA 23. HandyScan 700 testiskannaus

GOM – Atos II Triple Scan

Atos 2 Triple Scan on Saksalaisen GOM:in valmistama teollisuuskäyttöön kehitetty metrologialuokan 3D-skanneri. Skanneri kiinnitetään liikuteltavaan jalustaan tai esimerkiksi robottikäsiin. Se toimii strukturoidun valon toimintaperiaatteella, jossa sininen valokuvio heijastetaan mitattavaan kohteeseen eri kulmista. Skanneri hyödyntää kappaleeseen kiinnitettäviä kohdistusmerkkejä, jotka mahdollistavat myös kappaleen liikuttamisen mittausten välillä. Atos on kehitetty tehokkaaseen laadunvalvontaan tuotanto- ja valmistusprosesseissa. Se on korkean resoluution optinen digitoija, joka tuottaa nopeasti tarkkaa kolmiulotteista mittadataa. Atosin suorituskyky on erinomainen jopa kiiltävillä pinnoilla sekä tarkkoja rakenteita ja reunoja sisältävissä kohteissa. Atos Triple Scan yhdistettynä fotogrammetriatekniikkaa käyttävään Tritop-koordinaatimittausjärjestelmään voidaan laitteistolla mitata erittäin tarkasti jopa kymmenien metrien kokoisia objekteja. (GOM 2018.) Skannauslaitteisto koostui kuvassa 24 näkyvästä skannerista, etäisyys- ja korkeussäädettävästä telineestä sekä tietokoneesta. Skannausdataa seurataan ja käsitellään GOM:in ohjelmiston kautta.



KUVA 24. Atos II Triple Scan säädettävässä telineessään.

EinScan HX

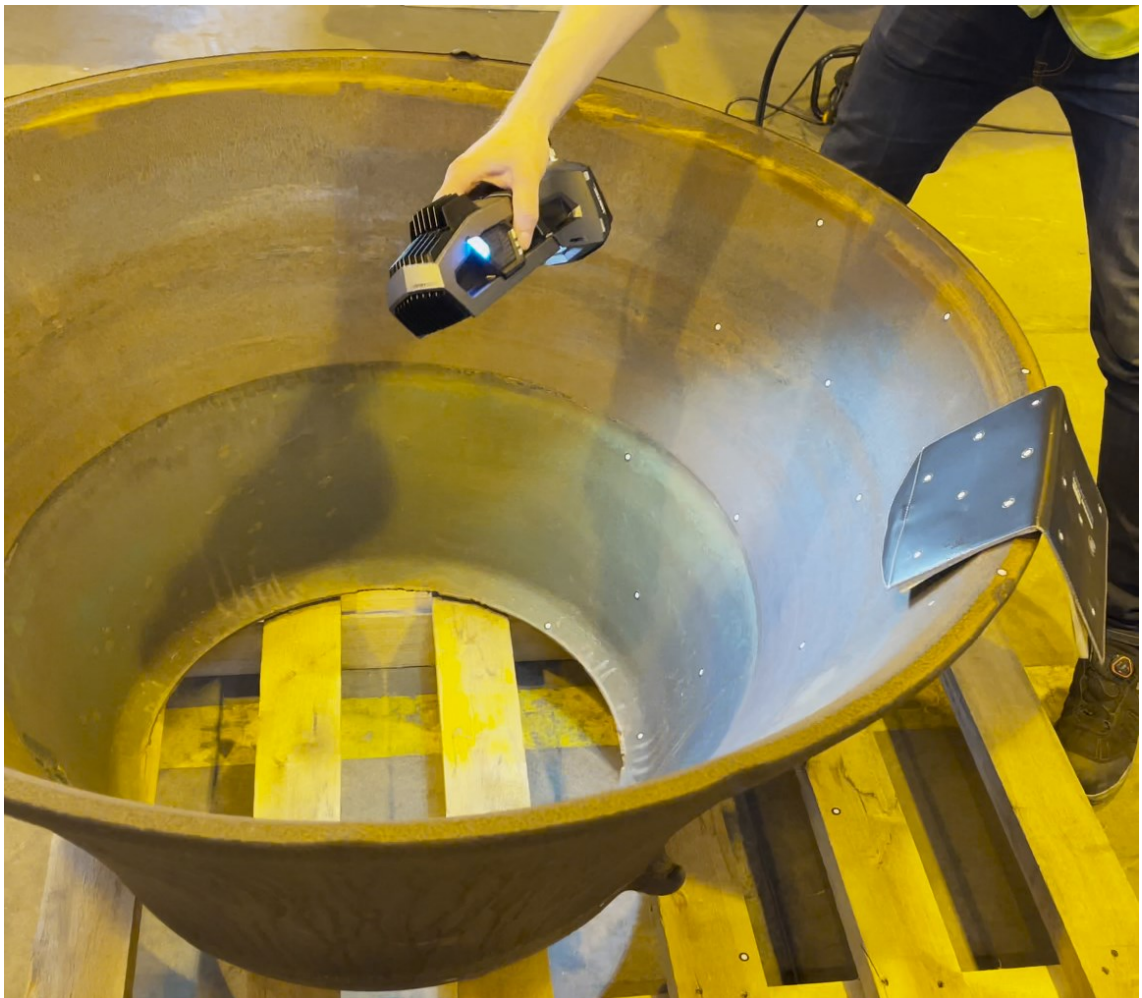
Kiinalaisen Shining 3D:n valmistama EinScan HX edustaa käsi­käyttöisiä 3D-skannereita. Käyttäjän valinnan mukaan se käyttää joko strukturoidun valon tai laserkolmiomittaukseen perustuvaa toimintaperiaatetta. Tästä syystä sitä voidaan kutsua ns. hybridiskanneriksi. LED-valo skannaus mahdollistaa kappaleen tekstuurin taltioimisen sekä nopean 3D-skannauksen ilman tarvetta kohdistusmerkkien käytölle. Laserskannaus antaa hieman tarkemman tuloksen ja on vähemmän herkkä ympäristön valolle antaen paremman suorituskyvyn myös heijastavilla ja tummilla pinnoilla. EinScan HX:ssä on valmistajan mukaan käyttäjäystävällinen ohjelmisto, sekä sen käyttö on helppoa riippumatta käyttäjän aikaisemmasta skannaustavasta. Käsiskannereiden tapaan skannaus tapahtuu ”maalamalla” noin 500 mm etäisyydeltä kappaleesta (kuva 25). Skanneri painaa ainoastaan 710 grammaa mutta vaatii toimiakseen langallisen yhteyden esim kannettavaan tietokoneeseen. (EinScan 2023.)



KUVA 25. EinScan HX käsiskanneri.

Creaform – Go!SCAN SPARK

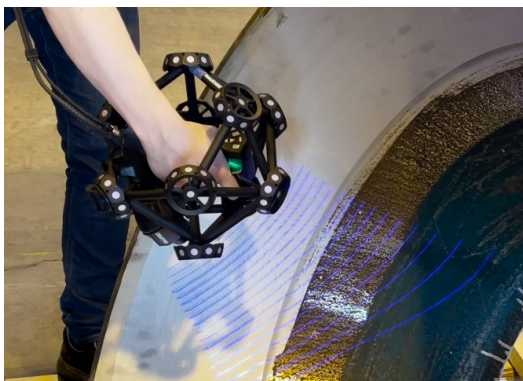
Creaformin nopein ja käyttäjäystävällisin käsikäyttöinen 3D-skanneri, joka mahdollistaa korkealla resoluutiolla ja väreillä skannauksen ilman valmisteluja. LED-pohjaiseen strukturoituun valoon perustuva tekniikka mahdollistaa nopean skannauksen ja laite tuottaa valmiin STL-mallin heti skannauksen jälkeen. Laite on kehitetty tuotekehityksen ja suunnittelun työkaluksi esimerkiksi käännteiseen suunnitteluun. Skanneri painaa 1,25 kg ja on täysin kannettava järjestelmä, mutta tarvitsee toimiakseen langallisen yhteyden tietokoneeseen, minkä avulla saadaan reaaliaikainen skannausdatan visualisointi. Skanneri toimii ilman kohdistusmerkkejä, sillä se paikoittaa itsensä kappaleen geometriaa ja värejä hyödyntäen. Kohdistusmerkkejä saattaa tarvita ainoastaan, jos kappale on erittäin symmetrinen. (MLT-Finland 2023a.) Kuvassa 26 näkyvän manttelin symmetrinen muoto vaati kohdistusmerkkien käytön tässä tapauksessa.



KUVA 26. Go!SCAN SPARK käsiskanneri.

Creaform – MetraSCAN3D

MetraSCAN on Creaformin uuden sukupolven kannettava CMM 3D-skanneri (kuva 27), joka tarjoaa erittäin hyvän mittatarkkuuden kaiken värisissä materiaaleissa kuten moniväriset, musta, kiiltävä yms. Laite toimii laserkolmiomittaus-toimintaperiaatteella ja sopii erinomaisesti laadunvarmistukseen ja käänteiseen mallinnukseen. Sen käyttökohteita ovat mm. tuotannon työkalujen, jigien, osakokoonpanojen ja kappaleiden mittatarkastukset. MetraSCAN:in optinen mittaustekniikka mahdollistaa korkean mittatarkkuuden myös työpaja- ja tuotanto-olosuhteissa, eikä se vaadi kiinteää asennusta. MetraSCAN ei aina tarvitse skannaukseen kohdistustarroja, koska laitteiston mukana tuleva erillinen maahan asetettava C-Track kamerayksikkö (kuva 28) seuraa skanneria ja hoitaa kappaleen kohdistamisen. Laitteisto on myös mahdollista parittaa HandyPROBE koskettavan mittapään kanssa, joka tarjoaa entistä paremman mittatarkkuuden. (MLT-Finland 2023b.)



KUVA 27. MetraSCAN skanneriyksikkö.



KUVA 28. MetraSCAN & C-Track kamerayksikkö.

Artec – Leo

Artec Leo on Luxemburgissa valmistettu maailman ensimmäinen langaton tekoälyohjattu 3D-skanneri, minkä toiminta perustuu sturkturoidun valon tekniikkaan. Sen täysin itsenäinen toiminta on suunniteltu tekemään skannauksesta mahdollisimman helppoa ja vaivatonta. Nvidia Jetson TX2-prosessorin, 5 tuuman sisäänrakennetun HD-näytön sekä vaihdettavan akun ansiosta se antaa täyden vapauden 3D-skannauksessa ilman johtojen asettamia rajoituksia. 3D-mallin rakentumista pystyy skannatessa seuraamaan reaaliaikaisesti Leon kosketusnäytöstä (kuva 29), minkä ansiosta Artec Leon käyttäminen on yhtä yksinkertaista kuin videon ottaminen. Se on myös ensimmäinen 3D-skanneri, joka tarjoaa laitteessa itsessään olevan automaattisen prosessoinnin. Huippuluokan geometrian ja tekstuurien seurannan ansiosta Artec Leon käyttö ei vaadi referenssitarroja. Tämän ansiosta laite soveltuu erinomaisesti kappaleille, joitten pinnoille tarrojen liimaaminen olisi mahdotonta. (Rensi 2023.)

Yrityksistä huolimatta laite-esittelyä ei saatu järjestettyä Metso Outotecin tiloissa. Eräs maahantuojaja tarjosi mahdollisuutta tulla tutustumaan Artec Leo:n käyttöön heidän Porvoon toimistolle, mutta ajan puutteen ja resurssipulan vuoksi sitä ei voitu tämän tutkimuksen aikana järjestää. Soveltuvuutta toimeksiantajan käyttöön ei siis voitu antaa käytännön testiskannauksen perusteella, vaan arvio perustui teknisten tietojen lisäksi internetistä löytyviin tuotetestausvideoihin.



KUVA 29. Artec Leo käsiskanneri (Artec3D 2023.)

Apple – iPhone 12 Pro Max

Applen vuonna 2020 julkaisema iPhone 12 Pro Max sai kameraoptiikan lisävarusteeksi kuvassa 30 näkyvän LiDAR-sensorin, minkä tarkoitus on tukea kameran etäisyyden mittausta, jotta kameran tarkkuus säilyy myös hämärissä olosuhteissa. LiDAR-sensori toimii laserpulssteknikalla ja se mahdollistaa myös 3D-skannaamisen matkapuhelimella. Ammattikäytön LiDAR-sensorilla toimivissa laserkeilaimissa laser pyörii vaaka- ja pysty akselinsa ympäri muodostaen 360 asteen panoraama skannauksen. Tämä vaatii monia liikkuvia osia sekä tarkkoja toleransseja, jota iPhoneen LiDAR-järjestelmässä ei ole. (Tara, R 2022.)



KUVA 30. iPhone 12 Pro LiDAR-sensori & Gimbal-vakaaja (Engineering.com 2022)

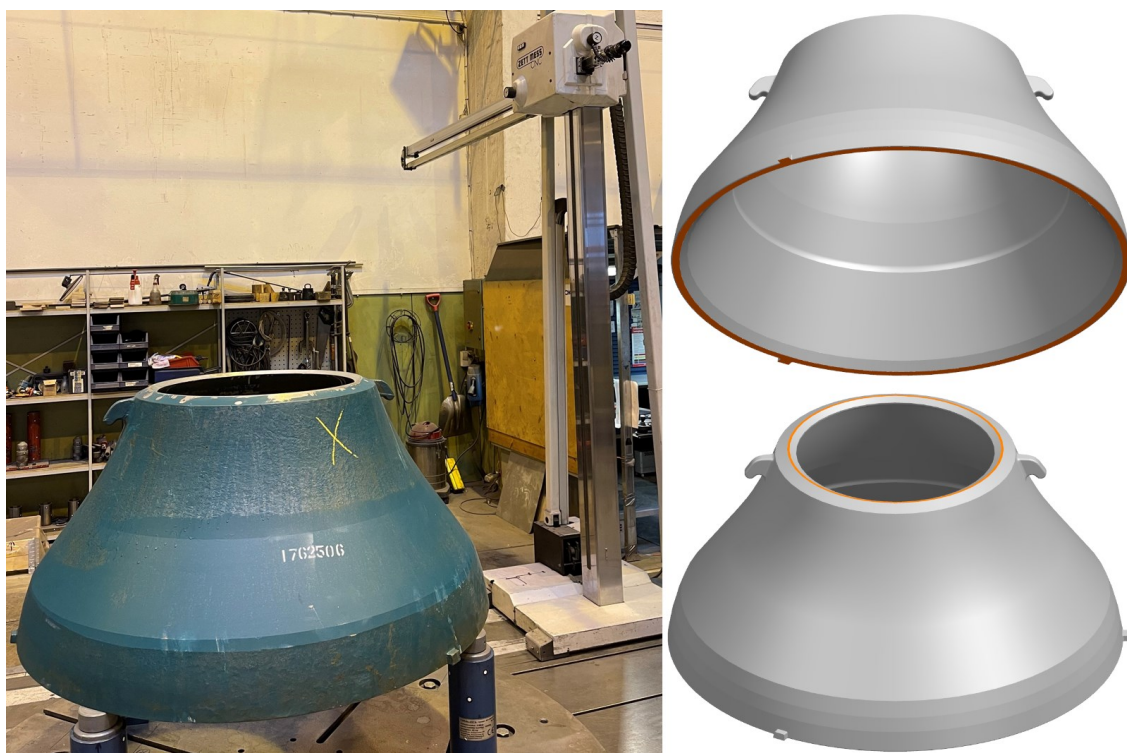
Koska iPhonea ei ole suunniteltu 3D-skanneriksi, ei sen skannaustarkkuutta tai -resoluutiota ole julkisesti listattu laitteen teknisiin tietoihin, mutta testiskannauksien perusteella tarkkuus ja resoluutio olivat selvästi alhaisimmat verrattuna vertailuissa käytettyihin 3D-skannereihin. Skannauksissa käytettiin apuvälineenä kuvassa 30 näkyvää gimbal-vakaajaa, millä saatiin vähennettyä käden heilahtelusta ja kävelyliikkeestä aiheutuvaa häiriötä.

6 MITTADATAN VERTAILU

Tutkimukseen valikoitujen 3D-skannereiden skannausdatan vertailu jaettiin kahteen kategoriaan, koska käyttämättömän terän laaduntarkkailussa ja -varmistamisessa mittalaitteelta vaadittu tarkkuus on huomattavasti korkeampi kuin kuluneen terän muodonmuutosten tutkimisessa. Suurinta osaa tutkimukseen saaduista laitteista testattiin silti kummastakin näkökulmasta, jotta saatiin kontrastia tulosten välille.

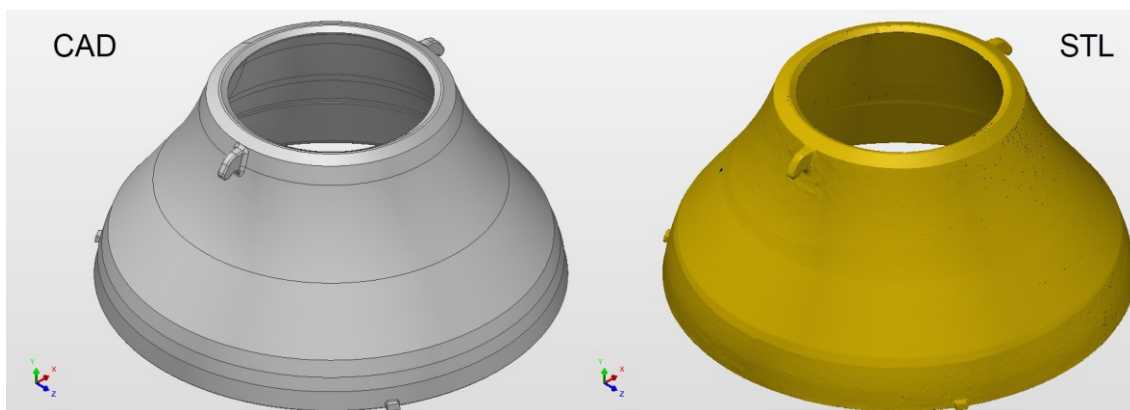
6.1 Uusien terien laadunvarmistus

Laadunvarmistuksen testiskannauksissa koekappaleena toimiva käyttämätön GP330 mantteli 3D-skannattiin kuudella eri laitteella. Terän ylä- ja alapinta (kuva 31) ovat kummatkin koneistettuja pintoja, joten niiden kohtisuora etäisyys toimi vertailumittana. Kappale tarkastusmitattiin lopuksi saksalaisvalmisteisella Zett Mess koordinaattimittauskoneella. Tämän antamia tuloksia käytettiin tutkimuksen referenssimittoina, johon 3D-skannereilla saatuja tuloksia verrattiin.



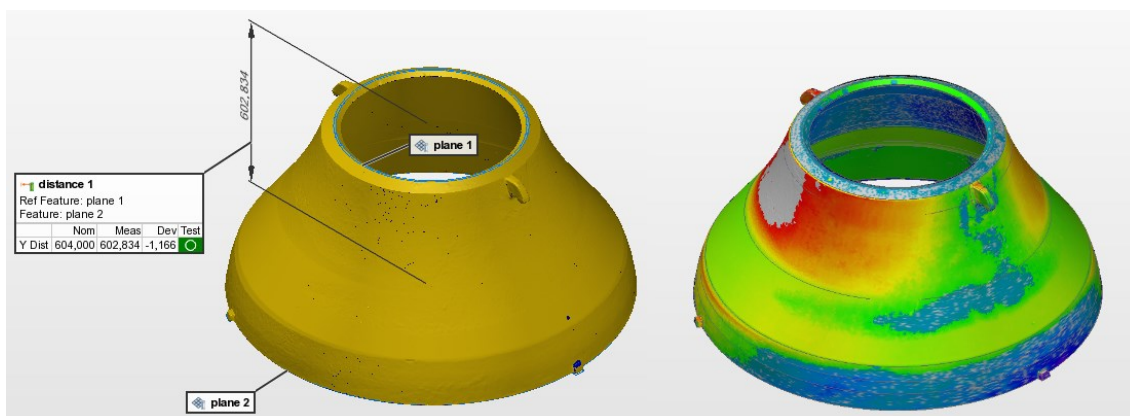
KUVA 31. Kappale koordinaattimittakoneella & mitattavat tasopinnat

Mittatarkastelut tehtiin toimeksiantajan tarjoamalla Polyworks MS 2022- sekä AutoCAD Mechanical 2022-ohjelmistoilla. Polyworks:issa skannattua STL-tiedostoa verrataan alkuperäiseen CAD-malliin (kuva 32) paikoittamalla ne päällekkäin. Ohjelma vertaa CAD-mallista käyttäjän valitsemia piirteitä ja pintoja pyrkien löytämään ne skannatusta STL-tiedostosta.



KUVA 32. GP330 manttelin CAD-malli & 3D-skannattu STL-tiedosto.

Kuvassa 33 havainnollistettuna kuinka CAD-mallin avulla nähdään mitattujen pintojen välisen etäisyyden lisäksi kappaleen nimellismitta, poikkeama sekä mahdolliset toleranssit. Polyworks:illa saa myös luotua kappaleesta lämpökartan (eng. heatmap), joka näyttää pinnan poikkeamat värein kuvattuna.



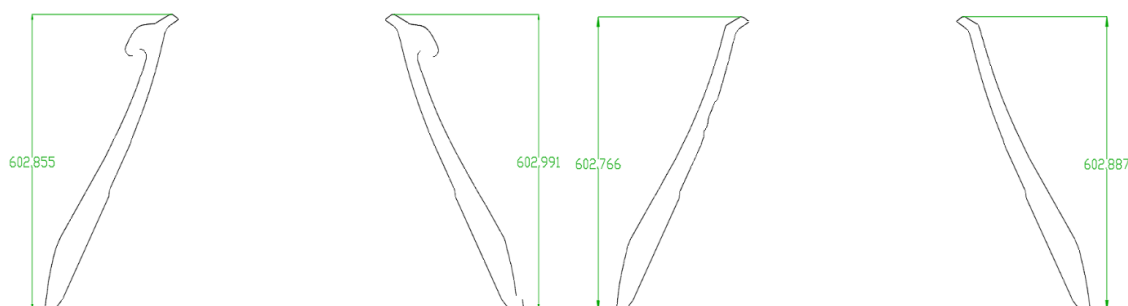
KUVA 33. Polyworks mittatarkastelu.

Polyworks:in määrittelemien tasopintojen välistä mittaa vertaillaan taulukko 1:ssä koordinaattimittakoneen määrittelemien tasopintojen etäisyyteen.

TAULUKKO 1. Tasopintojen välisten etäisyyksien vertailu.

	Referenssimitta CMM	GOM Atos 2	Creaform MetraSCAN	Creaform HandyScan 700	Faro Focus S150	EinScan HX	iPhone 12 Pro Max
Tasojen kohtisuora etäisyys (mm)	602,796	602,834	603,001	603,74	601,129	599,897	604,651
Poikkeama (mm)	+/-	<u>0,038</u>	<u>0,205</u>	0,944	-1,667	-2,899	1,855

STL-kappaleesta tehtiin poikkileikkaukset CAD-mallin koordinaatiston X- ja Z-akseleilta. Poikkileikkausten avulla saatiin paikoitettua neljä tarkkaan määriteltyä mittauspistettä kappaleen pyörähdysakselin kehältä. AutoCAD:issä niistä mitoitettiin kuvan 34 mukaisesti terän ylä- ja alapintojen välinen kohtisuora etäisyys. Koordinaattimittakoneella mitattiin etäisyydet samoista kohdista kappaleen kehää. Neljästä mittatuloksesta laskettiin keskiarvo, jota vertaillaan taulukko 2:ssa.



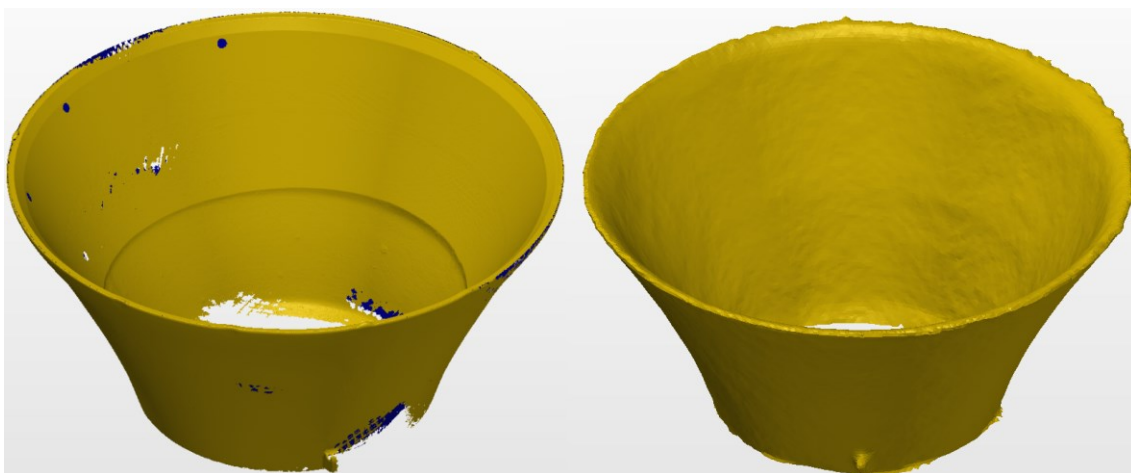
KUVA 34. Poikkileikkauksen mittatarkastelu AutoCAD:issa.

TAULUKKO 2. Mittapisteiden välisten etäisyyksien tarkastelu.

	Referenssimitta CMM	GOM Atos 2	Creaform MetraSCAN	Creaform HandyScan 700	Faro Focus S150	EinScan HX	iPhone 12 Pro Max
Pisteiden kohtisuora etäisyys (mm)	602,834	602,875	602,978	603,320	601,358	600,095	607,185
Poikkeama (mm)	+/-	<u>0,041</u>	<u>0,144</u>	0,486	-1,476	-2,739	4,351

6.2 Käytettyjen terien takaisinmallinnus

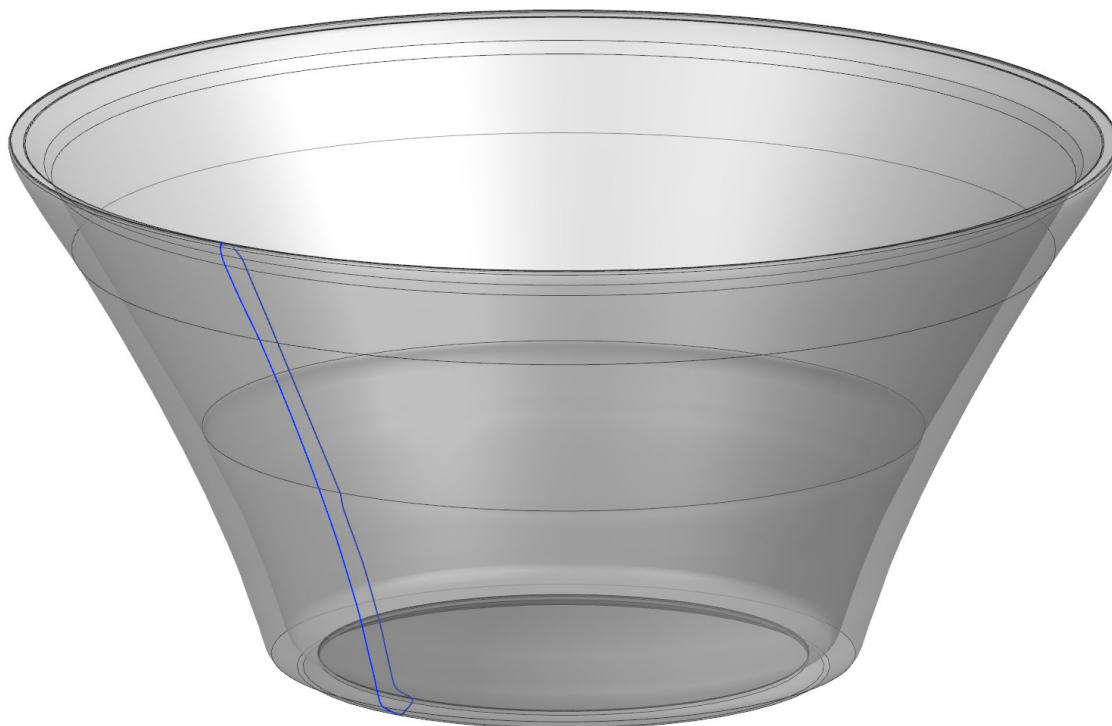
Manttelin kulumisprofiilin mallintamiseen valikoitui viisi erilaista laitetta. Kulunutta terää skannatessa ei ole välttämätöntä saada skannattua koko manttelia, vaan tärkeintä on saada taltioitua suurin osa kivipinnasta eli ulkopinnasta sekä sisäpinnasta eli tukipinnasta. Tämä nopeuttaa jälkikäsittelyä, sillä skannaustiedostot sisältävät paljon dataa ja ovat erittäin suurikokoisia. Kappaleen tukipinta tulee skannata, jotta sen avulla voidaan kuluneen terän poikkileikkaus linjata alkuperäisen CAD-mallin kanssa 2D-tarkastelua varten. Mikäli kappale haluttaisiin skannata kauttaaltaan, pitäisi se kääntää lavalla ympäri skannausten välissä. Tästä aiheutuisi turhan paljon ylimääräistä työtä tavoitteisiin nähden. Kuvasta 35 nähdään skannatun kappaleen pinnan muotojen eroavaisuudet kaikista tarkimman 3D-skannerin sekä heikoimman tarkkuuden omaavan iPhone:n välillä.



KUVA 35. STL-tiedostojen vertailu.

Datan jälkikäsittely tehtiin Polyworks:issa, minkä jälkeen kappaleesta otettiin poikkileikkaukset 45 asteen välein sen pyörähdysakselin mukaisesti. Poikkileikkauksia toisiinsa vertailemalla voitiin todentaa terän kuluneen tasaisesti koko kehältä.

Poikkileikkausprofiilista pystyy helposti luomaan ns. vesitiiviin pyörähdyskappaleen. Tämän avulla kulunut terä uudelleen mallinnettiin Siemens NX:ssä (kuva 36), missä sille määriteltiin materiaalin tiheys massan laskentaa varten.



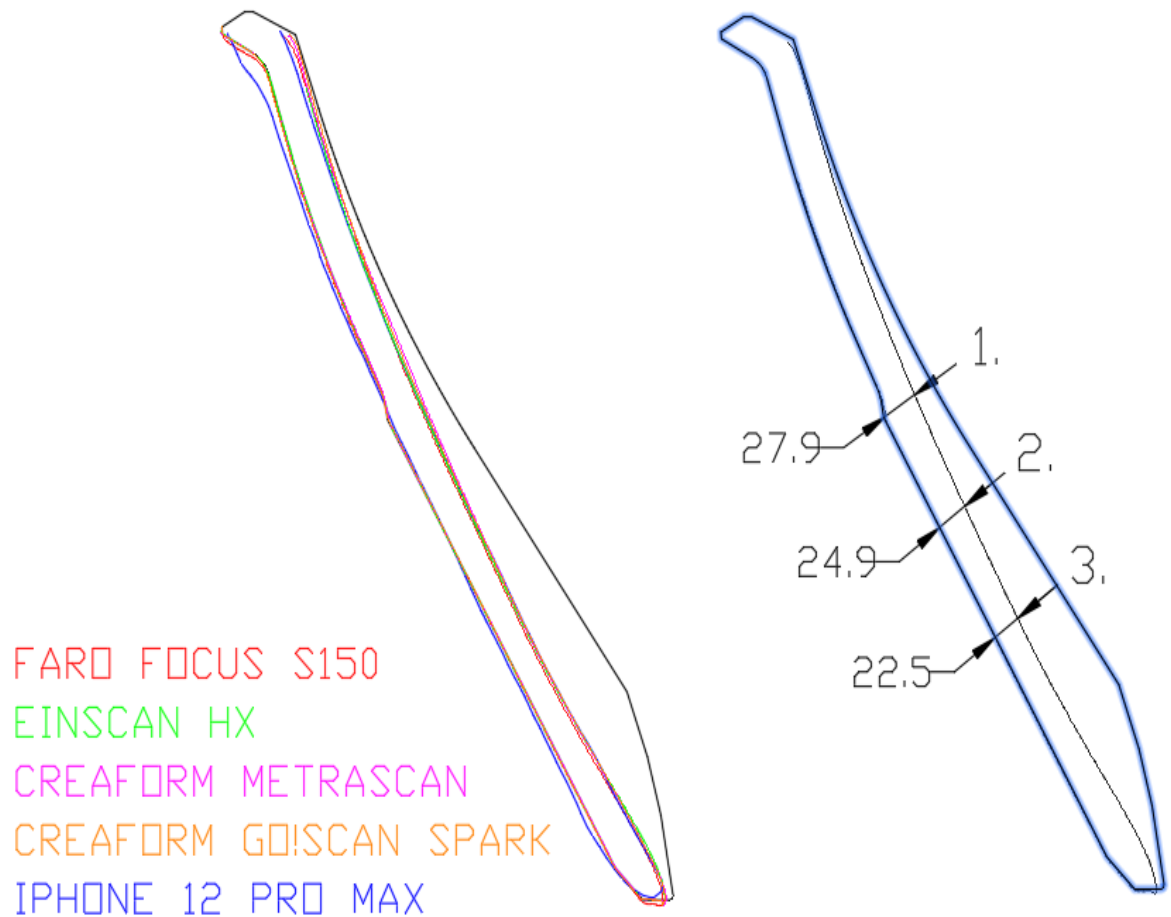
KUVA 36. Poikkileikkauksen mukaan mallinnettu pyörähdyskappale.

Koekappale punnittiin ja massaa vertailtiin takaisinmallinnettujen kappaleiden massoihin taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Koekappaleen massavertailu.

	Punnittu	Creaform MetraSCAN	Creaform Go!SCAN SPARK	EinScan HX	Faro Focus S150	iPhone 12 Pro Max
Massa (kg)	375	377	370	369	367	440
Poikkeama (kg)	+/-	<u>2</u>	<u>-5</u>	-6	-8	65

Kuluneen terän 2D-tarkastelu tehtiin AutoCAD:issa asettamalla poikkileikkaus alkuperäisen CAD-mallin poikkileikkauksen kanssa päällekkäin. Poikkileikkaukset kohdistettiin tukipintojen mukaan. Terien paksuus mitattiin kolmelta eri korkeudelta tukipinnasta kohtisuoraan kivipintaan (kuva 37). Mittaukset tehtiin 45 asteen välein kappaleen kehältä ja niistä laskettiin lopuksi keskiarvot taulukkoon 4.



KUVA 37. Poikkileikkausten vertailu päällekkäin aseteltuna & mittapisteet

TAULUKKO 4. Mittaustulosten vertailu.

	Creaform MetraSCAN	Creaform Go!SCAN SPARK	EinScan HX	Faro Focus S150	iPhone 12 Pro Max
Mittapiste 1. (mm)	28,7	28,6	27,5	26,0	28,5
Mittapiste 2. (mm)	24,8	24,2	23,7	23,2	27,0
Mittapiste 3. (mm)	21,7	20,5	20,5	19,9	25,4

7 YHTEENVETO

Laadunvarmistus

Testiskannauksien ja mittaustulosten vertailun perusteella parhaiten laadunvarmistuksen mittauksiin sopisi Creafom MetraSCAN ja GOM Atos II. Loput tähän käyttötarkoitukseen testatuista laitteista eivät soveltuneet joko mittaasepäntarkkuutensa tai muitten ominaisuuksiensa vuoksi. Rajoittavaksi ominaisuudeksi todettiin huomattava kohdistustarrojen käytön tarve.

Creafom MetraSCAN sijoittui vertailulaitteiston kärkeen ominaisuuksiensa ja käytettävyytensä perusteella. Sen mittatarkkuus sopii erinomaisesti kulutusosien toleranssivaatimuksiin ja skannaaminen on erittäin nopeaa. C-Track kamerapuomin ansiosta kohdistustarrojen tarve jäi erittäin pieneksi. Laitteiden valmistelu, 3D-skannaus, tiedoston jälkikäsitely ja mittaustulosten todentaminen veivät aikaa arviolta alle 30 minuuttia. Mittausohjelmaan on mahdollista asettaa alkuperäisen CAD-mallin avulla ennalta määritetyt parametrit, missä ohjelma vertaa automaattisesti käyttäjän kappaleesta valitsemaa piirteitä ja mittoja skannattuun tiedostoon. Tämä nopeuttaa tarkastusprosessia vielä entisestään, mikäli samanlaisia tarkastettavia kappaleita on useampia. Skannaus itsessään on työvaiheista helpoin oppia, mutta mittausohjelmien käyttö vaatii enemmän perehtymistä. Kädessä pidettävän skannerin ja C-Track kamerapuomin lisäksi laitteisto sisälsi mm. johtoja ja kannettavan tietokoneen. Laitteet kulkevat vielä helposti henkilöauton kyydissä, mutta esimerkiksi lentokoneen käsimatkatavaroihin näitä ei saa mahtumaan.

GOM Atos II tarkkuus ja skannausnopeus osoittautuivat erittäin vakuuttaviksi, joidenka puolesta se voisi soveltua myös kulutusosia tarkemmin toleroitujen osien laadunvarmistusmittauksiin. Laite on melko herkkä ulkoisille tekijöille kuten auringon valolle, joten mittausympäristö tulee suunnitella tarkkaan. Suuren kokonsa puolesta se ei myöskään sovellu siirrettäväksi mittauspaikoista toiseen vaan vaatii ns. kiinteän asennuksen. Kohdistustarroja mitattavaan kappaleeseen tuli hyvin maltillisesti ja niiden liimaus sekä irroittaminen eivät aiheuttaneet merkittävästi lisätyötä. Skannauksen valmisteluihin, skannaamiseen, jälkikäsitelyyn ja mittaustulosten esittämiseen kului aikaa noin tunti.

Takaisinmallinnus

Kuluneen murskainterän skannaamiseen tutkituista laitteista parhaiten kyseiseen käyttöön soveltui käytännön testiskannauksien kautta Faro Focus S150 laserkeilain sekä maahantuojalta saatujen tietojen perusteella Artec Leo käsiskanneri.

Faro Focus S150 3D-skanneri soveltui erinomaisesti kulumistutkimuksiin. Toimintaperiaatteensa vuoksi sillä on mahdollista taltioida suuria kohteita tai samanaikaisesti esimerkiksi useampi lähekkäin aseteltu murskainterä, sillä se skannaa kerrallaan aina koko ympäristönsä. Skannaaminen ei vaatinut lisälaitteita kuten kannettavaa tietokonetta, vaan skanneri toimii itsenäisesti kolmijalkansa päällä. Skannaukset otettiin neljästä eri kohtaa kappaleen ympäriltä ja tähän kului aikaa noin 15 minuuttia. Tämän 3D-skannerin suurin haittapuoli on se, että se ei tuota valmista STL-tiedostoa vaan muistikortille tallentuva raaka pistepilvidata tulee jälkikäsitellä ja skannaukset yhdistellä tietokoneelta käsin. Tämä on prosessin aikaa vievin vaihe, johon voi kulua useampikin tunti datan määrästä riippuen.

Artec Leo käsikäyttöinen skanneri olisi tarkkuutensa sekä teknisten tietojensa perusteella ainakin teoriassa erittäin pätevä laite kuluneiden terien skannailuun työmaaolosuhteissa. Valmistaja ei ilmoita laitteen IP-luokitusta, mutta mainostaa skannaamisen onnistuvan missä vaan ympäristössä. Sen langattomuuden ansiosta tutkittavan kappaleen ympärillä liikkuminen skannauksen aikana olisi helppoa ja sisäänrakennettu tekoäly mahdollistaisi laitteen vaivattoman käytön ilman lisälaitteita. Skannerin kuljetussalkku on kokoluokaltaan lentokoneen käsimatkatavaroihin soveltuva, joten sen kuljettaminen kohteiden välillä olisi melko vaivatonta. Laitteen toimivuus käytännössä tulisi kuitenkin todeta ennen hankintaa esimerkiksi maahantuojan laite-esittelyn kautta.

Edullisimman pään 3D-skanneri EinScan HX sekä matkapuhelimella skannausta edustava iPhone 12 Pro Max suoriutuivat käytännön testeistä kohtalaisesti, mutta niiden käytössä havaittiin merkittäviä ongelmia.

EinScan HX käsiskanneri soveltuisi osittain tähän käyttötarkoitukseen sen käytön helppouden sekä riittävän tarkkuutensa perusteella. Rapid Scan-skannausmoodi ei vaadi kohdistusmerkkien käyttöä, mikäli kappaleessa on tarpeeksi toistumatonta muotoa ja/tai tekstuuria. Koekappaleena toiminut kulunut terä oli kuitenkin skannerille liian symmetrinen eikä sen pinta sisältänyt tarpeeksi tekstuuria, jotta se osaisi paikottaa itsensä skannauksen edetessä ulkopinnalta sisäpinnalle. Kappaleen pintaan lisättiin merkkauksella tekstuuria lisääviä toistumattomia kuvioita, joka korjasi osittain ongelman. Skannerilla oli myös ongelmia päästä ulkopinnalta terän alahelman yli sisäpinnalle kadottamatta paikoitustaan.

iPhone 12 Pro Max ja sen LiDAR-sensorilla varustettu kameraoptiikka antoivat yllättävän hyviä tuloksia kappaleen muodon jäljittelyssä, kun otetaan huomioon, että kyseessä on matkapuhelin eikä oikea 3D-skanneri. Poikkileikkausten päällekkäin asetellussa vertailussa iPhone'n tuotos vastasi kivipinnan osalta hyvin pitkälle oikeiden 3D-skannereiden tulosta. Suurimmat eroavaisuudet muihin verrattuna näkyivät kappaleen ylä- ja alapäässä. Tarkkuus oli testilaitteistosta selvästi heikoin mittaustulosten ja massan laskennan perusteella. Ilman liikettä vakauttavaa ja tärinää vähentävää kolmiakselista gimbal-vakaajaa skannaustulokset olivat entistä heikkolaatuisemmat. Skannauksessa käytetty PolyCam sovellus prosessoi skannauksen, jota pystyi esikatselemaan puhelimen ruudulta, mutta tiedoston todellinen laatu paljastui vasta kun se siirrettiin STL-muodossa tietokoneelle. Tämä toi epävarmuutta skannaamisen onnistumisen arviointiin. Koska kyseinen iPhone oli lähes 3 vuotta vanha malli, voidaan varovasti olettaa, että uusimmissa paremmalla kameralla ja tehokkaammalla prosessorilla varustetuissa malleissa myös skannaustarkkuus parantuu.

Testilaitteiston tarkimmiksi osoittautuneet 3D-skannerit eivät lopulta soveltuneet kuluneen terän tutkimiseen muiden ominaisuuksiensa vuoksi, mutta näiden mittaustuloksia voitiin hyödyntää referenssimittoina heikompien tarkkuuden skannereita vertaillessa. Käyttöä rajoittavat ominaisuudet olivat mm. kohdistustarrojen tarve sekä laitteiston fyysinen koko.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

3D-skanneria hankkiessa on ennen ostopäätöstä hyvä selvittää käytännön koeskannauksien avulla, mihin laite todella kykenee. Valmistajien ilmoittamissa mittatarkkuuksissa voi olla huomattaviakin heittoja tosielämän mittauksiin verrattuna ja tämä tulee huomioida, mikäli laitetta ollaan hankkimassa tarkkaan toleroitujen kappaleiden tutkimiseen. Mittavirheet kasvavat usein suuria kappaleita skannatessa.

Useat 3D-skannerit käyttävät kappaleen paikottamiseen kohdistustarroja tai magneettisia kohdistusmerkkejä, etenkin jos kappale on muodoltaan symmetrinen. Varsinkin kohdistustarrojen kappaleeseen liimaaminen ja siitä poistaminen on itse 3D-skannaamisen työläin vaihe. Suuria kappaleita mitatessa tarvittavien kohdistustarrojen määrä voi skannerin skannausalueen koon mukaan nousta huomattavaksi. Tämä asia kannattaa myös ottaa erityisesti huomioon, jos 3D-skannerilla on tarkoitus tarkastaa esimerkiksi isompia eriä suurikokoisia kappaleita. Joskus myös kohdistustarrojen tai -merkkien käyttö ei ole mahdollista kappaleen pinnan tai materiaalin ominaisuuksien vuoksi, jolloin näitä käyttävät skannerit rajautuvat valikoimasta pois.

3D-skannereiden tarkkuus on vielä toistaiseksi suoraan verrannollinen laitteiston fyysiseen kokoon ja langattomuus loistaa useasti poissaolollaan. Reaaliaikaisen skannausdatan tiedonsiirto langattomasti skannerilta tietokoneelle ilman häiriötä ja viivettä on vielä 3D-skannereiden osalta pelkkä haave. Markkinoilla on jo täysin itsenäisiä laitteita, jossa skanneri ja tietokone on yhdistetty yhdellä kädellä operoitavaksi kokonaisuudeksi, mutta näiden tarkkuus ei vielä yllä ns. perinteisten 3D-skannereiden tasolle.

Tämän työn tuloksena kartoitettiin toimenksiantajan tarpeeseen soveltuvat 3D-skannauslaitteet käytännön kokeiden sekä tiedonhankinnan perusteella. Tutkimustuloksia on mahdollista jatkossa käyttää laitehankintojen tukena.

LÄHTEET

Aniwaa. 2021. 3D scanning technologies and the 3D scanning process. Luettu 14.4.2023

<https://www.aniwaa.com/guide/3d-scanners/3d-scanning-technologies-and-the-3d-scanning-process/>

Artec3D. 2023. Artec Leo 3D-scanner. Luettu 3.5.2023

<https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-leo>

ATI-Teräs. 2023. 3D-skannaus. Luettu 14.4.2023

<https://ati-teras.fi/sopimusvalmistus-osavalmistus-suunnittelu-palvelut/3d-skannaus/>

Creaform3d. 2016. HandyScan brochure.pdf. Luettu 26.4.2023

https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/brochures/files/handy-scan/2016/handyscan3d_brochure_en_hq_25052016.pdf

EinScan. 2023. EinScan HX – Handheld 3D Scanner

<https://www.einscan.com/einscan-hx/>

Faro. 2021. Focus Laser Scanner – Tech Sheet.pdf Luettu 20.4.2023

https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Re-sources/2_TECH-SHEET/TechSheet_Focus_Laser_Scanner/TechSheet_Focus_Laser_Scanner_EN.pdf?rev=1291d7f5ef814fe99d471dde60321833

Gom. 2018. Atos Triple Scan – Brochure.pdf. Luettu 26.4.2023

http://spectromas.ro/wp-content/uploads/2018/07/GOM_Brochure_ATOS_TripleScan_EN.pdf

Metso Outotec. 2023a. Tietoa yrityksestä – liiketoiminta. Luettu 13.2.2023

<https://www.mogroup.com/fi/yritys/tietoa-meista/liiketoiminta/>

Metso Outotec. 2023b. Tampereen toiminnot – yritysesittely. Luettu 14.2.2023

Metso Outotec. 2023c. Murskaimet. Luettu 14.2.2023

<https://www.mogroup.com/fi/kiviainesala/tuotteet/murskaimet/>

Metso Outotec. 2023d. Crushing and Screening Handbook. 7 painos.

Metso Outotec. 2023e. Nordberg GP-sarjan karamurskaimet. Luettu 15.2.2023

<https://www.mogroup.com/fi/portfolio/nordberg-gp-sarja/>

Metso Outotec. 2023f. Nordberg GP Series cone crushers - Sales presentation. PowerPoint-esitys. Vaatii käyttöoikeuden.

Metso Outotec. 2023g. Nordberg GP Series cone crushers – Wear parts application guide. Luettu 3.3.2023

<https://www.mogroup.com/globalassets/parts-pages/crusher-parts/cone-crusher-parts/application-guide-nordberg-gp-2601-11-22-en-cns.pdf>

Metso Outotec. 2012. Kuluminen, murskainten kulutusosat ja käytännön esimerkkejä. PowerPoint-esitys. Vaatii käyttöoikeuden.

MLT-Finland. 2023a. Go!SCAN SPARK 3D-skanneri. Luettu 27.4.2023
<https://www.mltfinland.fi/goscan-spark/>

MLT-Finland. 2023b. MetraSCAN 3D-skanneri. Luetu 27.4.2023
<https://www.mltfinland.fi/goscan-spark/>

Hakapää, A., Lappalainen, P. 2011. Kaivos- ja louhintatekniikka. 2 painos. Helsinki: Opetushallitus.

Peltomäki, K. Suunnitteluinsinööri. 2023. Teams haastattelu 24.2.2023. Tampere

Rensi Finland Oy. 2023. Artec Leo 3D-skanneri. Luettu 3.5.2023
<https://www.rensi.fi/tuotteet/mittauskoneet/artec-3d-skannerit/artec-leo-3d-skanneri/>

Tara, R. 2022. How to Use the Laser Scanner in Your Pocket. Luettu 8.5.2023
<https://www.engineering.com/story/how-to-use-the-laser-scanner-in-your-pocket>

Vakkuri, H. 2010. GP-karamurskaimet – perusteet. Metso Outotec. Metson sisäiseen käyttöön luotu PowerPoint- esitysmateriaali.

Viilo, K. 2022. Maanrakennusmateriaalien valmistus murskaamalla. Metso Outotecin järjestämä perehdytysluento.

LIITTEET

Liite 1. Laitevertailu - Tekniset tiedot ja ominaisuudet

1(2)

Valmistaja	Faro	Creaform	GOM	Shining3D
Malli	Focus S150	HandyScan 700	Atos II Triple Scan	EinScan HX
Toimintaperiaate	Laserpulssi	Laserkolmio	Strukturoitu valo	Laserkolmio & strukturoitu valo
Kategoria	laserkeilain	käsiskanneri	kiinteä skanneri	käsiskanneri
Maksimi tarkkuus (mm)	1,000	0,030	0,020	0,040
Maksimi resoluutio (mm)	-	0,050	0,010	0,050
Maksimi skannausalue (mm)	360° & 150 000	275 x 250	2000 x 1500	420 x 440 & 380 x 400
Nopeus (pistettä/s)	976 000	480 000	5 000 000	1 200 000 & 480 000
Paino (kg)	4,2	0,85	>20	0,71
Langaton	Kyllä	Ei	Ei	Ei
Kohdistustarrojen tarve	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä & Ei
IP-luokitus & käyttöympäristö	IP54 & -20°C...55°C	IP50 & 5°C...40°C	- & 5°C...40°C	- & 0°C...40°C
Hinta (€)	70 000	60 000	150 000	12 500

2(2)

Valmistaja	Creaform	Creaform	Artec	Apple
Malli	Go!SCAN SPARK	MetraSCAN3D & C-track	Leo	iPhone 12 pro max
Toimintaperiaate	Strukturoitu valo	Laserkolmio	Strukturoitu valo	LiDAR
Kategoria	käsiskanneri	Optinen CMM skanneri	käsiskanneri	matkapuhelin
Maksimi tarkkuus (mm)	0,050	0,025	0,100	-
Maksimi resoluutio (mm)	0,1	0,025	0,200	-
Maksimi skannausalue (mm)	390 x 390	310 x 350	838 x 488	-
Nopeus (pistettä/s)	1 500 000	1 800 000	4 000 000	-
Paino (kg)	1,25	7,2	2,6	0,25
Langaton	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Kohdistustarrojen tarve	Kyllä & Ei	Kyllä & Ei	Ei	Ei
IP-luokitus & käyttöympäristö	IP50 & 5°C...40°C	IP50 & 5°C...40°C	- & 5°C...40°C	IP68 & -10°C...35°C
Hinta (€)	45 000	90 000	35 000	1500