



3D-MALLIIN LISÄTYN HITSAUS- JA TUOTTEENVALMISTUSTIEDON HYÖ- DYNTÄMINEN KAIVOSKONEIDEN RUNKOVALMISTUKSESSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2024

Markus Juntunen

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tuomas Skriko

TkT Sakari Penttilä

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Markus Juntunen

3D-malliin lisätyn hitsaus- ja tuotteenvalmistustiedon hyödyntäminen kaivoskoneiden runkovalmistuksessa

Konetekniikan diplomityö

2024

64 sivua, 22 kuvaa, 1 taulukko

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tuomas Skriko

TkT Sakari Penttilä

Avainsanat: Hitsausautomaatio, tuotteenvalmistustieto, offline-ohjelmointi

Tämän diplomityön ensisijaisena tavoitteena oli selvittää 3D-malleihin lisätyn hitsaus- ja tuotteenvalmistustiedon hyödyntämistä Sandvikin Turun tehtaan runkovalmistuksen hitsausprosesseissa. Työn kirjallisuuskatsauksessa käsiteltiin robottihitsauksessa ja hitsausrobottien ohjelmoinnissa tarvittavaa valmistustietoa. Kokeellisessa osuudessa 3D-mallinnusohjelman (NX CAD) eri työkaluja käytettiin tiedon lisäämiseen 3D-malliin. Lisättyä tietoa yritettiin siirtää suoraan hitsausrobottien offline-ohjelmoinnissa käytettävään simulointiohjelmistoon (Visual Components Robotics OLP). Lopuksi arvioitiin tiedon lisäämiseen käytettyjen työkalujen käyttökelpoisuutta, sekä etuja ja haasteita.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella todettiin, että tuotteiden robottihitsattavuuden parantaminen suunnittelumuutoksin on oleellisessa osassa tuotteiden automaatioasteen nostamisessa. 3D-malliin lisätyn valmistustiedon avulla olisi mahdollista saada palautetta rakenteen valmistettavuudesta entistä nopeammin ja luotettavammin. Suunniteltujen rakenteiden simulointi ja valmistettavuuden arviointi jo ennen ensimmäisen prototyypin valmistusta voisi parantaa merkittävästi suunnittelutyön onnistumista.

Toistaiseksi työssä arvioituja Siemens NX:n suunnittelutyökaluja käytetään enimmäkseen laivanrakennuksessa. Yleisesti 3D-malliin lisätyn hitsaustiedon hyödyntäminen offline-ohjelmoinnissa on kiinnostava trendi, mutta sen mahdollistama hitsausrobottien ohjelmoinnin automatisointi vaatii toistaiseksi vielä huomattavaa kehitystyötä. Lisäksi se asettaa entistä enemmän vaatimuksia tuotteiden suunnittelijoille. Pelkkä hitsien tai muun tuotteenvalmistustiedon tuominen simulointiohjelmaan, ja ohjelmoinnin puoliautomatisointi, ovat kuitenkin käyttökelpoisia ja helpommin käyttöönotettavia menetelmiä jo nyt.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Markus Juntunen

Utilization of welding and product manufacturing data added to the 3D-model in the frame manufacturing of mining machines

Master's thesis

2024

64 pages, 22 figures, 1 table

Examiners: Associate professor Tuomas Skriko

D. Sc (Tech.) Sakari Penttilä

Keywords: Welding automation, product manufacturing information, offline programming

The primary objective of this master's thesis was to investigate the utilization of welding and production information added to 3D models in the welding processes of the frame manufacturing at Sandvik's Turku factory. The literature review addressed the manufacturing information required in robotic welding and programming of welding robots. In the experimental part, various tools of the 3D modeling program (NX CAD) were used to add information to the 3D model. The added information was attempted to be transferred directly to the simulation software (Visual Components Robotics OLP) used in offline programming of welding robots. Finally, the usability, advantages, and challenges of the tools used for adding information were evaluated.

Based on the literature review, it was found that improving the weldability of products through design changes is essential in increasing the level of automation of products. With the manufacturing information added to the 3D model, it would be possible to receive feedback on the manufacturability of the structure faster and more reliably. Simulating designed structures and assessing manufacturability even before the manufacture of the first prototype could significantly improve the success of the design work.

So far, the Siemens NX design tools evaluated in the thesis are mainly used in shipbuilding. Generally, the utilization of welding information added to 3D models in offline programming is an interesting trend, but the automation of welding robot programming enabled by it still requires considerable development work. Furthermore, it places even more demand on product designers. However, merely importing welds or other manufacturing information into the simulation program and semi-automating programming are useful and more easily implementable methods already.

KIITOKSET

Vielä muutama vuosi sitten tuntui, etteivät opintoni lukemalla loppuisi. Ensimmäistä kertaa voin kuitenkin viimein todeta, että minusta tulee kuin tuleekin diplomi-insinööri. Diplomi-työn valmistuminen oli aikanaan vain kaukainen haave, joka nyt on muuttumassa aina vain kaukaisemmaksi muistoksi. Äärimmäisen opettavainen opintomatkanani on kuitenkin ollut, sitä ei käy kiistäminen.

Sandvik tarjosi minulle mahdollisuuden tehdä diplomityö erittäin kiinnostavasta aiheesta. Itseasiassa olen löytänyt työtä tehdessäni kutsumusammattini robotiikan asiantuntijana. Tästä syystä, haluan kiittää erityisen paljon työnantajaani, sekä esimiestäni ja kollegoitani tuotannonkehityksessä ja hitsaussoluissa. Älyttömän hienoa olla osa näin hienoa työyhteisöä.

Kaikista suurin kiitos pitkästä ja antoisasta opintomatkastani kuuluu kuitenkin rakkaille opiskelukavereilleni Lappeenranta Wildmenissä, Polyteknisessä Willimiesklubissa, SSK:ssa sekä etenkin DeeKoolla. Erilaiset tempaukset ja tapahtumat ovat tutustuttaneet minut laajaan joukkoon ihmisiä, enkä voisi olla kiitollisempi, että saan tuntea teidät myös opintojeni päätyttyä. Itse lopullisen työn valmiiksi saattamisesta suurin kiitos kuuluu kuitenkin avopuolisolleni Maijalle, jonka tarkan silmän alla en ole voinut työn edistämistä vältellä. Olkoon tämä työ osoitus siitä, että kaikki aloittamani projektit eivät jää kesken. Onneksi projektit eivät kuitenkaan lopu täysin, sillä diplomi-insinöörin täytyy kehittää itseään myös jatkossa pysyäkseen kehityksen mukana.

Markus Juntunen

Turussa 09.3.2024

LYHENNELUETTELO

CAD	Computer-aided design
FEM	Finite Element Method
PLM	Product Lifecycle Management
PMI	Product Manufacturing Information
VC	Visual Components Robotics OLP
WPS	Welding Procedure Specification

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	Sandvik Mining and Construction Oy.....	9
1.1.1	Maanalaiset kaivoskoneet.....	10
1.2	Tutkimusongelma.....	11
1.3	Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset.....	13
1.4	Tutkimusmenetelmät.....	13
1.5	Työn rajaus.....	14
2	Robottihitsaus.....	15
2.1	Robottihitsauksen tuottavuus.....	15
2.2	Hitsausrobotin anturit ja ominaisuudet.....	16
2.2.1	Railonhaku.....	17
2.2.2	Railonseuranta.....	18
2.3	Hitsattavien osien suunnittelu ja valmistuskustannukset.....	18
2.3.1	3D-mallit.....	18
2.3.2	Valmistuspiirustukset.....	19
2.3.3	Hitsausmerkinnät.....	20
2.4	WPS eli Welding Procedure Specification.....	21
2.5	Hitsausrobotin online-ohjelmointi.....	22
2.6	Hitsausrobotin mallipohjainen offline-ohjelmointi.....	23
2.7	Offline-ohjelmoinnin automatisointi.....	24
3	Ohjelmistot.....	26
3.1	3D-mallinnus ja suunnitteluohjelmistot.....	26
3.2	Siemens NX.....	26
3.2.1	Weld Assistant.....	27
3.2.2	Structure Welding.....	29

3.3	Hitsausrobotin ohjelmointiin tarkoitetut ohjelmistot	30
3.4	Visual Components Robotics OLP (VC)	31
3.5	3D-mallin ja robottisolun luominen Visual Components Robotics OLP -ohjelmaan 32	
3.6	Hitsausohjelman tekeminen Visual Components Robotics OLP -ohjelmistolla...	33
4	Kaivoskoneen teräsrakenteiden valmistusprosessi	38
4.1	Kaivoskoneen osien suunnittelu	38
4.2	Kaivoskoneen rungon osien valmistus	38
4.2.1	Leikkaus	38
4.2.2	Silloitushitsaus	39
4.3	Hitsausrobotit	39
4.3.1	Robotin esivalmistelu	40
4.4	Robottiohjelman käyttöönotto ja tarkistus	41
4.5	Osien viimeistely	42
5	Hitsaustiedon lisääminen 3D-malliin	43
5.1	Tarvittava tieto hitsausohjelman luomiseen	43
5.2	Hitsien mallintaminen Weld Assistant -työkalulla	46
5.3	Hitsien mallintaminen Structure Welding -työkalulla	48
5.4	Weld Assistantilla mallinnettujen hitsien vieminen Visual Components Robotics OLP-ohjelmistoon	48
5.5	Structure Weldingillä luotujen hitsien vieminen Visual Components Robotics OLP -ohjelmistoon	53
6	Tulokset ja analyysi	55
7	Pohdinta	57
8	Johtopäätökset	60

1 Johdanto

Hitsaus on prosessina suosittu sovellus teollisuusroboteille ja hitsausrobottien käyttö teräs-rakenteiden valmistuksessa onkin viime vuosina lisääntynyt merkittävästi. Erityisesti valokaarihitsauksen robotisointi on jatkuvasti kasvava teollisuudenala, sillä robotisoinnilla voidaan parantaa merkittävästi valokaarihitsauksen työturvallisuutta ja tuottavuutta. (Kumar 2022, s.532.)

Vaikka yleisesti kuvitellaan, että hitsausrobotti vastaa tuottavuudeltaan kolmea käsihitsaajaa, ei se välttämättä tarkoita sitä, että hitsaustuotannon robotisointi vähentäisi yrityksestä työpaikkoja (Lukkari 2011, s.24). Mikäli robottihitsaava yritys haluaa olla hitsausrobottien käytön ja uusien hitsattavien osien tuotannollistamisen osalta mahdollisimman omavarainen, vaatii se yrityksen henkilöstöltä tietotaitoa robottiohjelmoinnista ja robottien tehokkaasta käytöstä.

Hitsausrobotteja ohjelmoidaan joko manuaalisesti opettamalla liikeradat käsiohjaimella, tai käyttämällä etäohjelmointiin tarkoitettuja simulointiohjelmistoja. Hitsausrobottien ohjelmointi manuaalisesti opettamalla on kuitenkin aikaa vievä prosessi, joka vaatii tuotannon seisauttamista ohjelmoinnin ajaksi. Ohjelmointiin kuluvaa aikaa on pyritty siirtämään robotisolusta simulointiympäristöihin, jolloin tuotannon pitkää seisauttamista ei tarvita. Nykyisillä etäohjelmointiin tarkoitetuilla simulointiohjelmistoilla robotin liikeradat voidaan mallintaa hyvinkin tarkasti etukäteen uhraamatta robotin tuotantoaikaa. (Välimäki, Niemelä ja Ahonen 2023, s.252.)

Robottihitsattavien osien suunnitteluvaiheessa voidaan vaikuttaa merkittävästi osien hitsattavuuteen ja hitsauksen kustannuksiin. Hitsattavien osien lopullisista valmistuskustannuksista jopa 80 prosenttia määräytyy jo suunnitteluvaiheessa. (Lukkari 2011, s. 14.)

Hitsausrobottien ohjelmoinnin automatisointi, vaatii tavanomaisen tilavuusmallin lisäksi hitsauksessa käytettävien parametrien tai hitsausohjeen sisällyttämistä 3D-malliin. Hitsausparametrit tai hitsausohjeen numero, voidaan lisätä 3D-malliin käyttämällä CAD-

ohjelmistoista löytyviä työkaluja. Malliin lisätyn tiedon hyödyntämiseksi simulointiohjelman tulee olla yhteensopiva kyseisen tiedostomuodon kanssa. Lisäksi tietojen lisäämisessä vaaditaan tietotaitoa hitsauksesta ja käytettävästä hitsausrobotista.

Tässä työssä tutkitaan, kuinka tätä 3D-malliin lisättyä hitsaus- ja tuotteenvalmistustietoa voitaisiin hyödyntää Sandvikin maanalaisten kaivoskoneiden runkovalmistuksessa. Sandvikin Turun tehdas on viimeisten kahden vuoden aikana siirtynyt käyttämään etäohjelmointia runkovalmistuksessa käytettävien hitsausrobottien ohjelmoimiseksi. Etäohjelmoinnista saatavia hyötyjä haluttaisiin entistä enemmän siirtää myös hitsattavien tuotteiden suunnitteluun. Eri-tyisesti koneiden 3D-malleista haluttaisiin kyetä antamaan nykyistä paremmin ja nopeammin palautetta, jonka avulla koneista voitaisiin suunnitella helpommin valmistettavia ja kustannustehokkaampia.

1.1 Sandvik Mining and Construction Oy

Sandvik AB on ruotsalainen yritys, joka on erikoistunut kaivos- ja rakennusteollisuuden laitteiden ja palveluiden valmistukseen. Yritys on perustettu vuonna 1862 ja sen pääkonttori sijaitsee Tukholmassa. Sandvikin tuotevalikoima sisältää muun muassa louhinta-, poraus-, lastaus- ja kuljetuslaitteita, maanalaisia kaivoksia varten suunniteltuja tuotteita, murskaimia ja seulontalaitteita sekä erilaisia työkaluja ja kulutusosia. Sandvik-konserni työllistää n. 40000 työntekijää ja sen liikevaihto jatkuvissa toiminnoissa vuonna 2022 oli n. 112 miljardia ruotsin kruunua. (Vuosikertomus, 2020.)

Sandvik Mining and Construction Oy:n asiakaskuntaan kuuluvat kaivos- ja rakennusalan yritykset ympäri maailmaa. Yrityksen tuotteita ja palveluita käytetään muun muassa kaivoksissa, louhoksissa, tunneliprojekteissa ja rakennustyömailla.

Suomessa Sandvik työllistää pääosin kolmella tehtaallaan Tampereella, Turussa ja Lahdessa. Suomessa Sandvikilla on n. 2700 työntekijää ja 1,4 miljardin euron liikevaihto. Suomen liiketoiminta keskittyy Turussa maanalaisten lastaus- ja kuljetuskoneiden valmistukseen, Tampereella porauslaitteiden valmistukseen sekä Lahdessa muihin pienemmän kokoluokan porakoneisiin, kaivoslaitteisiin ja kalustoon. (Vuosikertomus, 2020.)

1.1.1 Maanalaiset kaivoskoneet

Maanalaiset kaivoskoneet jaetaan Turun tehtaalla pääosin kahteen ryhmään: lastauskoneisiin ja dumppereihin. Lastauskoneiden tarkoituksena on siirtää kaivoksen louhittu maa-aines tunneleista kuljetushihnalle tai suoraan dumperin lavalle. Dumppereilla taas kuljetetaan irrotettu maa-aines seuraavaan jatkokäsittelypaikkaan, kuten maan pinnalle rikastusprosessiin. Turun tehdas valmistaa lastauskoneita, joiden nostokapasiteetti vaihtelee 15 ja 25 tonnin välillä. Eri kokoluokan lastauskoneiden runkorakenteet ovat periaatteeltaan hyvin samankaltaisia, eikä niiden välillä ole suuria eroja valmistusmenetelmien osalta. Tehdas valmistaa lastauskoneiden runkorakenteet, nostovarret sekä kauhat pääosin itse. Kuvassa 1 on esitettyä Sandvikin isoin dieselkäyttöinen lastauskone Toro™ LH621i.



Kuva 1. Toro™ LH621i maanalainen lastauskone (Yritysesittely, 2023).

Turussa valmistettavien dumppereiden kuljetuskapasiteetti vaihtelee 30 ja 63 tonnin välillä. Pienemmän kokoluokan 30 ja 45 tonnin dumppereiden kokoonpano suoritetaan pääosin asennussoluissa paikkakokoonpanona, ja isompien 51 ja 63 tonnin dumppereiden kokoonpanon sijoittuu kokoonpanolinjastolle. Dumppereiden runkorakenteet ja lavat tulevat

pääasiassa alihankkijoilta. Kuvassa 2. on esitettynä Sandvikin isointa kokoluokkaa edustava Toro™ TH663i dumpperi.



Kuva 2. Toro™ TH663i maanalainen dumpperi (Yritysesittely, 2023).

Sandvik on maanalaisten kaivoskoneiden maailman markkinajohtaja. Koneiden suunnittelussa kiinnitetään erityistä huomiota älykkäisiin ratkaisuihin, tehokkuuteen, luotettavuuteen ja toimintavarmuuteen. Näin saavutetaan markkinoiden alhaisimmat kustannukset lastattua tonnia kohti. (Yritysesittely, 2023.)

1.2 Tutkimusongelma

Sandvikin Turun tehtaalla on runkovalmistuksessa käytetty hitsausrobotteja jo kaksi vuosikymmentä. Henkilöstöllä on jo vahva kokemus hitsausrobottituotannosta ja sen tuomista eduista tuottavuuteen ja työhyvinvointiin. Kaikki hitsausrobottioperaattorit osaavat käyttää robotteja tuotannossa turvallisesti ja tehokkaasti, mutta erityisen sulavaa robottien ohjelmointitaitoa on vain muutamilla käyttäjillä.

Lastauskoneille ja dumppereille ominaista on aiemmin ollut hidas vaihtuvuus. Uusia koneita kehitetään jatkuvasti, mutta niitä julkaistaan harvakseltaan. Kun uusi lastauskone julkaistaan, tuotetaan samaa konetta vuosia, tai jopa vuosikymmeniä, ennen sen korvaamista uudella tai päivitetyllä runkorakenteella. Tämä on aiheuttanut ilmeisiä haasteita ohjelmointitaidon säilyttämisessä. Kun samoilla robottiohjelmilla pärjätään vuosia, ei ole jatkuvasti tarvetta tehdä uusia ohjelmia ja ohjelmointitaito heikentyy tai saattaa jopa kadota vuosien saatossa.

Sähköisten kaivoskoneiden akkuteknologian kehittymisen ja kiristyneiden asiakasvaatimusten myötä alkaa tulevaisuudessa uusia konemalleja tulla markkinoille totuttua nopeampaan tahtiin. Uusien konemallien julkaisut lisäävät hitsausrobottien ohjelmoinnin tarvetta ja ohjelmoinnin tehokkuuden merkitys kasvaa. Uusia konemalleja suunniteltaessa olisi myös hyödyllistä saada palautetta hitsattavuudesta ja luoksepäästävyyydestä jo ennen kuin osat menevät robotille tuotantoon. Ongelmakohdat haluttaisiin huomata nykyistä varhaisemmassa vaiheessa, jolloin niihin voitaisiin puuttua ajoissa.

Lastauskoneiden rungot soveltuvat robottihitsaukseen pääsääntöisesti hyvin, vaikkakin suuri osa hitseistä, ja etenkin viimeistelystä, joudutaan tekemään edelleen käsihitsauksena. Rungoissa on myös paljon yksittäisiä hitsauskohteita, joihin hitsausohjelman tekeminen käsiohjelmalla opettamalla on haastavaa. Usein nämä ongelmat löytyvät vasta, kun osat on suunniteltu ja ne tulevat robotille hitsaukseen. Hitsattavia osia suunniteltaessa vaaditaankin hyvää ymmärrystä tehtaalla käytettävistä hitsausroboteista ja niiden rajoitteista.

Varsinaisena tutkimusongelmana tässä työssä on, että Sandvikin Turun tehtaalla käytössä olevien 3D-mallien hyödyntäminen uusien tuotteiden tuotannollistamisessa ja valmistettavuustarkastelussa on vajavaista. Lisäksi 3D-malleista puuttuva tieto ja piirustusten paikkansapitämättömyys aiheuttavat lisätyötä tuotannolle, sekä heikentävät tuotteiden tarkoituksenmukaista suunnittelua. Suunnittelusta puuttuu työkaluja, joilla saataisiin aikaisessa vaiheessa palautetta lopputuotteiden valmistettavuudesta.

1.3 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset

Työn ensisijaisena tavoitteena on selvittää 3D-malleihin lisätyn hitsaustiedon hyödyntämistä Sandvikin Turun tehtaan hitsausprosesseissa. Oleellisimpana tutkimuskohteena on hitsausrobottien etäohjelmointi ja 3D-malliin lisätyn hitsaustiedon siirtäminen etäohjelmoinnissa käytettävään Visual Components Robotics OLP -ohjelmistoon. Konkreettisenä tavoitteena työssä pyritään löytämään työkaluja ja keinoja hyödyntää 3D-malleihin lisättyä hitsaustietoa, sekä arvioimaan työkalujen käyttökelpoisuutta Turun tehtaan runkoverstaalla. Työssä pyritään myös arvioimaan etäohjelmoinnin ja hitsausprosessin simuloinnin tuomia etuja uuden tai päivitetyn konemallin runko-osien tuotannollistamisessa.

Tutkimuskysymyksiä ovat:

- Millaista hitsaustietoa uusien tuotantoon tulevien konemallien 3D-malleihin voisi tai kannattaisi lisätä?
- Miten hitsaustietoa voitaisiin hyödyntää koneiden runkorakenteiden valmistamiseen käytettävien hitsausrobottien ohjelmien teossa?
- Miten suunnittelijat voisivat saada nykyistä enemmän kappaleen valmistettavuuteen liittyvää tietoa jo ennen fyysisten komponenttien valmistamista?

1.4 Tutkimusmenetelmät

Tämä työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja kokeellisena osuutena. Kirjallisuuskatsaus tehtiin käyttämällä sähköisiä tietokantoja. Käytössä oli yliopiston tarjoama LUT-Primo, sekä sieltä löytyneet Knovel- ja Scopus-tietokannat. Tietoa hankittiin käyttämällä erilaisia aiheeseen liittyviä hakusanoja, joista oleellimmat olivat ”welding robot programming” sekä ”automation of robot welding”. Kirjallisuuskatsaukseen painotettiin korkeintaan viisi vuotta vanhoja julkaisuja.

Sähköisten tietokantojen lisäksi työssä käytettiin muutamia oppikirjoja, joista merkittävimmät olivat Aimo Peren (Pere, 2001) sekä Juha Lukkarin (Lukkari, 1997) teokset.

1.5 Työn rajaus

Turun tehtaalla ja Sandvik-konsernissa käytetään 3D-mallintamiseen Siemensin NX -ohjelmistoa. Tästä syystä hitsaustiedon lisäämiseen liittyvissä ohjelmistoissa keskitytään ainoastaan NX:n tarjoamiin tai sen kanssa yhteensopiviin työkaluihin.

Robottien etäohjelmointiin ja sen arviointiin käytetään ainoastaan Visual Components Robotics OLP -ohjelmistoa, sillä se oli jo ennestään tehtaalla käytössä. Ohjelmiston toimittaja Visual Components on Sandvikin tavoin mukana usean metallialan yrityksen yhteistyöprojektissa, jossa pyritään löytämään ratkaisuja myös tähän työhön keskeisesti liittyviin tutkimusongelmiin.

Sandvikin Turun tehtaalla on käytössä usean eri valmistajan hitsausrobotteja. Toistaiseksi ainoastaan Yaskawan valmistamilla roboteilla hyödynnetään etäohjelmointia. Tästä syystä tässä työssä keskitytään ainoastaan Yaskawan kuusiakselisen AR2010 -robotin ympärille rakennettuihin robottisolukokonaisuuksiin, joita ohjataan Yaskawa YRC1000 -ohjaimella. Kaikki kolme Sandvikin Turun tehtaalla käytössä olevaa Yaskawa -robottia käyttävät hitsaukseen Fronius TPSI -virtalähdettä, joka soveltuu erityisesti robottihitsaukseen. Hitsausrobotin ohjelmointitavoissa voi olla eroja, jotka riippuvat virtalähteen valmistajasta. Siksi tässä työssä keskitytään robottiohjelmoinnin osalta ainoastaan Froniuksen virtalähteiden kanssa yhteensopiviin ohjelmointitapoihin.

2 Robottihitsaus

Hitsaus on prosessina yksi suosituimmista sovelluksista teollisuusroboteille. Robottihitsauksen etuja käsihitsaukseen verrattuna ovat etenkin toistettavuus, tasalaatuisuus sekä nopeus. Robotisoiduista hitsausprosesseista kaksi yleisintä ovat pistehitsaus ja kaarihitsaus. Lisäksi laserhitsausta voidaan toteuttaa robotin avulla, mutta se vaatii optimaalisemmat olosuhteet ja välineet kuin piste- ja valokaarihitsaus. (Kumar 2022, s.532.)

Erityisesti autoteollisuus hyödyntää paljon pistehitsausta. Valokaarihitsauksen robotisointia pidetään erityisen kasvavana teollisuudenalana, sillä perinteisesti käsin tehtävä valokaarihitsaus altistaa operaattorin hitsauskaasuille, voimakkaalle valolle, uv-säteilylle, äänelle sekä lämmölle. Valokaarihitsauksen automatisointi robotin avulla parantaakin valmistusprosessin tuottavuuden ja tasalaatuisuuden lisäksi merkittävästi myös työturvallisuutta. (Kumar 2022, s. 532.)

2.1 Robottihitsauksen tuottavuus

Yleisenä perussääntönä on käytetty, että yksi hitsausrobotti vastaa ainakin kolmea käsihitsaajaa (Lukkari 2011, 14). Vertailtaessa manuaalista hitsausta ja robottihitsausta täytyy kuitenkin ymmärtää hitsausprosessin tuomat rajoitukset. Hitsausprosessin tuottavuuteen vaikuttavat hitsausparametrit, kuten kuljetusnopeus, langansyöttö ja hitsausvirta. Nämä parametrit saattavat olla manuaalihitsauksessa jopa samat kuin robottihitsauksessa. Robottihitsauksen tuottavuus perustuukin kappaleenkäsittelyyn ja robotin väsymättömään työskentelyyn. Mikäli hitsien luoksepäästävyys ja hitsausasento eivät luo esteitä, voidaan robotilla hitsata pitkiäkin hitsejä ilman katkoja. (Singh, 2020, s. 199–200.)

Yksi hitsauksen tuottavuuden arviointiin käytetyistä mittareista on paloaikasuhte, eli kaariajan suhde työaikaan (Lukkari 1997, s. 61). Jos manuaali- ja robottihitsauksessa käytetään samoja hitsausparametrejä, paloaikasuhte on suurempi robottihitsauksessa kuin manuaalihitsauksessa. Tämä johtuu siitä, että robotti kykenee aloittamaan seuraavan hitsin hitsaamisen paljon manuaalista hitsaajaa nopeammin. Näin samassa työajassa ehditään hitsata

enemmän hitsejä ja kaariaika kasvaa suhteessa työaikaan. Pelkkä paloaikasuhteen kasvattaminen ei kuitenkaan aina suoraan kerro hitsauksen tuottavuuden kasvusta. Mikäli hitsausparametrejä, kuten kuljetusnopeutta tai langansyöttöä, muuttamalla saadaan hitsi valmistamaan nopeammin, lyhentää se myös kaariaikaa. Tällöin paloaikasuhte pienenee, vaikka myös työhön käytetty kokonaisaika on lyhentynyt ja tuottavuus näin kasvanut. (Lukkari 2011, s. 5.)

Lopullisen hitsatun rakenteen kustannuksissa suunnittelu on avainasemassa. Suurin osa hitsauksen kustannuksista määritetäänkin jo suunnitteluvaiheessa. Suunnittelussa määritetään käytettävät materiaalit ja levyaksuudet, joiden kautta määrittyvät tuotteessa käytetyt railotilavuudet ja hitsityypit. Käytetyllä railotilavuudella on eksponentiaalinen vaikutus hitsauksen kustannuksiin, sillä suurempi railotilavuus vaatii suurempaa hitsiaineentuottoa valmistukseen samassa ajassa. Suuri vaikutus kokonaiskustannuksiin on myös hitsien kokonaisuudella sekä niiden vaatimalla jälkikäsittelyllä kuten viimeistelyhionnalla. Suunnittelu vaikuttaa suoraan myös hitsien luoksepäästävyys, joka määrittää voidaanko hitsi hitsata robotilla vai ei. Nykyisin teräsrakenteiden suunnittelussa vaaditaan aiempaa parempaa tuntemusta hitsaustekniikasta sekä tuotteita valmistavan konepajan vaatimuksista ja rajoitteista. Kiinteällä yhteistyöllä suunnittelun ja tuotannon välillä onkin oleellinen vaikutus lopputuotteen hitsattavuuteen ja siten kustannuksiin. (Lukkari 2011, s. 9–10.)

2.2 Hitsausrobotin anturit ja ominaisuudet

Robottihitsaukseen käytettävä hitsauslaitteisto eroaa käsihitsauksessa käytettävistä laitteista yleisesti ottaen siten, että ne on suunniteltu kestävämpään jatkuvaa käyttöä. Tästä syystä esimerkiksi jäähdytysjärjestelmä voi olla tehokkaampi kuin käsihitsaukseen käytettävissä laitteissa. Hitsausvirtalähteen ohjauksen ja käyttöliittymän pitää olla yhteensopiva robotin kanssa, jotta hitsaus voidaan käynnistää ja hitsausparametrejä muuttaa robotiohjelman kautta. Myös muita normaalisti operaattorin tekemiä työvaiheita voidaan joutua automatisoimaan, jotta robotti toimisi mahdollisimman itsenäisesti. Jatkuvassa käytössä hitsauspolttimeen tarttuu nopeasti paljon hitsausroiskeita. Tästä syystä robotissa on hyvä olla esimerkiksi automaattinen hitsauspolttimen puhdistusjärjestelmä roiskeiden poistamista varten. (Kumar 2022, s. 532–533.)

Merkittävä syy erillisten sensorien ja robotin ominaisuuksien käytölle on hitsauksen laatuvaatimukset ja hitsausvirheiden vähentäminen. Sensoreilla ja robotin ominaisuuksilla pyritäänkin lisäämään robotin adaptiivisuutta ja kykyä muuttaa hitsausparametreja tai robotin liikerataa vastaamaan paremmin työkappaleen geometrian vaihteluita. Tyypillisiä hitsauksen laatuun ja hitsausprosessiin vaikuttavia muuttuvia tekijöitä ovat railomuoto, ilmarako, hitsausrillon ja työkappaleen sijainti sekä langansyötön ongelmat. Robottiin lisätyillä sensoreilla ja lisäominaisuuksilla voidaan tunnistaa ongelmat tai muuttunut tilanne, ja reagoida niihin. Yleisimmin hitsaukseen tarkoitetuissa roboteissa käytetäänkin sensoreita, joilla voidaan suorittaa railonhakuja sekä -seurantaa. Lisäksi robotteihin voidaan asentaa erilaisia kameroita tai skannereita, joilla voidaan suorittaa automatisoitua laadunvarmistusta tai -valvontaa varsinaisen hitsausprosessin jälkeen. (Weman 2012, s. 157–166.)

2.2.1 Railonhaku

Railonhaualla tarkoitetaan prosessia, jossa hitsattava railo paikannetaan tarkasti hakemalla työkappaleesta yksi tai useampi hakupiste. Hakupisteen koetus voidaan tehdä esimerkiksi koskettamalla hakupistettä robotin hitsauslangalla tai hitsauspolttimen kaasuholkilla. Hakupisteen koetus näillä menetelmillä vaatii, että hakupiste johtaa sähköä ja on maadoitettu robottiin. Teräsrakenteita hitsattaessa tämä tulee ottaa huomioon erityisesti silloin, jos työkappale on osin maalattu tai muuten suojattu. Robotti tunnistaa hakupisteen paikkamuutoksen, ja osaa muokata robottiohjelman pisteitä vastaamaan hakupisteen paikkamuutosta. (Kah, Shrestha, Hiltunen ja Martikainen. 2015, s. 5.)

Yksittäisen hakupisteen paikkamuutos voidaan holkkihakua käytettäessä tunnistaa vain yhdessä suunnassa kerrallaan. Kolmiulotteinen eli täydellinen railonkorjaus vaatii näin ollen kolme eri hakupistettä, jotka haetaan eri suuntiin. Yaskawan roboteissa on useita valmiiksi määriteltyjä hakuprosesseja, joilla voidaan hakea helposti mm. holkkeja ja viisteitä.

2.2.2 Railonseuranta

Railonseurannalla tarkoitetaan prosessia, jossa hitsauksen liikerataa muokataan kesken hitsausprosessia vastaamaan paremmin hitsattavan railon geometriaa. Railonhaku parantaa hitsauksen laatua ja mahdollistaa hitsattavan railon paikkamuutoksiin mukautumisen. Railonseurannalla voidaan nopeuttaa ohjelmointia. Mikäli hitsausrailo ei ole täysin suora, voi railon aloitus- ja lopetuskohtiin opettaa pisteet ja antaa railonseurannan mukauttaa ohjelma monimutkaiseen muotoon. Railonseurannan sensorin tietoja voidaan käyttää mukauttamaan myös hitsausparametrejä kesken hitsauksen. (Rout, Deepak ja Biswal 2019, s.20.)

Seurannassa käytettäviä sensoreita on useita erilaisia. Yaskawan roboteissa käytettävä railonseuranta perustuu yleensä valokaaren jännitteen tai virran vaihtelun seuraamiseen levityслиikkeen aikana, jolloin erillistä ylimääräistä sensoria ei välttämättä tarvita. Robotteihin voidaan kuitenkin asentaa myös muun tyyppisiä, kuten laserkeilaukseen perustuvia, sensoreita, joilla railonseuranta voidaan toteuttaa.

2.3 Hitsattavien osien suunnittelu ja valmistuskustannukset

Kuten jo aiemmin on mainittu, suurin osa hitsattujen teräsrakenteiden kustannuksista lyödään lukkoon jo suunnitteluvaiheessa. Erilaisilla suunnittelijan pöydällä tehdyillä ratkaisuilla vaikutetaan erityisesti kappaleen hitsattavuuteen, hitsien luoksepäästävyyyteen ja -määrään sekä materiaalikustannuksiin. Nykyisin tarjolla olevilla suunnittelumenetelmillä voidaankin jo tarkasti arvioida erilaisten suunnitteluratkaisujen vaikutusta lopputuotteen kustannuksiin ja muihin ominaisuuksiin.

2.3.1 3D-mallit

Nykyisin suunnittelussa ja tuotekehityksessä hyödynnetään paljon CAD-ohjelmistoja (CAD = computer-aided design) sekä 3D-mallinnusta. Hitsatun rakenteen suunnittelu aloitetaan luomalla hitsattavasta rakenteesta 3D-malli. Termillä ”3D-malli” voidaan tarkoittaa lankamallia, pintamallia tai tilavuusmallia. Lankamalli sisältää ainoastaan pintojen reunaviivat. Pintamalli eroaa lankamallista siten, että se sisältää reunaviivojen lisäksi myös osan pinnat.

Pintamalli on riittävä hyödynnettäväksi NC-ohjelmoinnissa, ja sen avulla voidaan luoda NC-työstöohjelma esimerkiksi CNC-jyrsimelle. Tilavuusmallin keskeinen ero lanka- ja pinta-malliin on se, että CAD-ohjelma osaa erotella kappaleesta erikseen ulkopinnan ja sisäpinnan. Tätä tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi osien massan, tilavuuden tai painopisteen määrittämiseen. (Pere 2001, s. 140–144.)

Nykyään yleisimmin käytetty tapa on luoda jokaisesta osasta tilavuusmalli, joka määritellään yksittäiseksi osaksi. Näistä osista voidaan muodostaa kokoonpano, määrittämällä yksittäisten osien reunaehdot ja kokoonpanorajoitteet toistensa suhteen. Näin osakokoonpano pysyy käyttökelpoisena, vaikka jonkin osan mittoja myöhemmin muokattaisiin. Osakokoonpanoja voidaan edelleen yhdistää muiden osien ja osakokoonpanojen kanssa, jolloin saadaan aikaan lopputuotteen 3D-malli. Suoraan alihankkijoilta ja toimittajilta ostettavien komponenttien, kuten sähkölaitteiden, voimansiirron ja hydraulikan 3D-mallit voidaan usein pyytää suoraan komponenttivalmistajalta. (Pere 2001, s. 140–144.)

Uusien teräsrakenteiden suunnittelussa sekä kriittisten rakenteiden tai rakennemuutosten arvioinnissa käytetään paljon hyväksi lujuuslaskentaa ja FEM-rakennepuolueanalyysiä (FEM = Finite Analysis Method). CAD-ohjelmassa luotu 3D-malli voidaan siirtää suoraan FEM-laskentaohjelmaan, jolloin osia ei tarvitse piirtää tai mallintaa uudestaan ja säästetään merkittävästi aikaa. Useissa CAD-ohjelmistoissa on myös sisäänrakennettu FEM-ohjelma, jolloin 3D-mallia ei tarvitse siirtää usean eri ohjelmiston välillä. (Pere 2001, s. 140–147.)

2.3.2 Valmistuspiirustukset

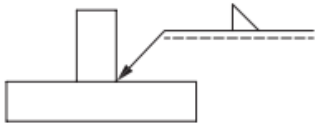
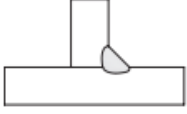
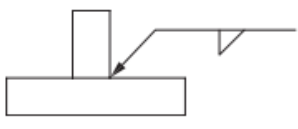
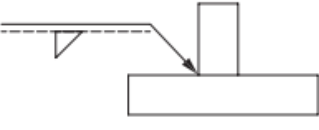
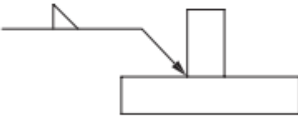
Sandvikin Turun tehtaalla suunnitelluista koneen osista luodaan 3D-mallin lisäksi aina myös valmistuspiirros. Tarkka valmistuspiirustus luodaan yksittäisille osille, mutta myös tuotannossa syntyville osakokoonpanoille. Yksittäisen osan valmistuspiirustuksia hyödynnetään erityisesti ostettaessa valmiita leikkeitä alihankkijoilta, tai osien vastaanottotarkastusta tehtäessä. Osakokoonpanojen valmistuspiirustuksia hyödynnetään tuotannossa, kun valmiita runkokokoonpanojen leikkeitä liitetään toisiinsa ja hitsataan valmiiksi. Osakokoonpanojen valmistuspiirustuksien avulla myös osakokoonpanojen valmistus voidaan kilpailuttaa tai teettää alihankkijalla.

2.3.3 Hitsausmerkinnät

Teknisessä piirustuksessa hitsausliitoksesta tulee olla kaikki ne tiedot, jotka tarvitaan hitsaustyötä suoritettaessa. Valmistettavien kappaleiden piirustuksista, joista löytyy tarpeelliset merkinnät ja muut ohjeet hitsausten suorittamista varten, käytetään nimitystä hitsauspiirustus. Hitsausmerkki on viitenuolesta ja merkintäviivasta koostuva merkki, johon voi sisältyä myös perusmerkkejä ja lisämerkkejä, mittoja ja/tai haarukka, jota käytetään teknisissä piirustuksissa (SFS-EN ISO 2553:2019). Hitsaustekniikan kehittymisen ja aiempaa monipuolisemman materiaalien käytön vuoksi hitsausmerkkeihin sisällytetään aiempaa enemmän tietoa esimerkiksi hitsausmenetelmistä ja -luokitteluista. Yleisesti teknisissä piirustuksissa käytettävien hitsausmerkintöjen säännöt on määritelty standardissa SFS-EN ISO 2553:2019. (Pere 2001, s. 95.)

Tavanomaisten hitsien muotoa kuvattaessa (esim. pienhitsi) ei yleensä tarvita erillistä projektiota. Projektio on kuitenkin tarpeen silloin, kun sen esittäminen auttaa merkinnän tulkinnaassa poistaen epäselvyydet, jotka voisivat aiheutua esittämättä jättämisestä. Projektioista voi olla hyötyä esimerkiksi silloin, kun samassa hitsiliitoksessa on liitetty useampi kuin kaksi levyä, tai levyjen välinen kulma tai vaadittu hitsin pinnanmuoto on epätavanomainen. (Pere 2001, s. 96.)

Kuten standardissa SFS-EN ISO 2553:2019 mainitaan, on kansainvälisesti olemassa kaksi erilaista tapaa merkitä hitsauspiirustuksiin hitsausmerkin nuolen puoli ja vastapuoli. Merkintätavassa A hitsausmerkinnän merkintäviiva koostuu kahdesta yhdensuuntaisesta viivasta: ehyestä viivasta ja katkoviivasta. Merkintätavassa B käytetään ainoastaan yhtä ehyttä viivaa. Molemmissa merkintätavoissa nuolen puolella tarkoitetaan sitä liitoksen puolta, johon nuolen pää viittaa, kun taas vastapuoli on se puoli, johon nuoli ei viittaa. Merkintätavassa A hitsausmerkin perustunnukset sijoitetaan ehyelle viivalle, kun hitsataan nuolen puolelta. Vastapuolelle hitsattaessa perustunnukset sijoitetaan katkoviivalle. Katkoviiva voidaan piirtää ehyen viivan ylä- tai alapuolelle, mutta se tulisi ensisijaisesti piirtää alapuolelle. Merkintätavassa B perustunnukset sijoitetaan merkintäviivan alapuolelle, kun hitsataan nuolen puolelta ja vastaavasti yläpuolelle, kun hitsataan vastapuolelta. Merkintätapojen eroavaisuuksia on havainnollistettu kuvassa 3. (SFS-EN ISO 2553:2019, s. 24.)

Hitsin sijainti	Merkintätapa A	Sama hitsi hitsattu kaikilla neljällä vaihtoehdolla	Merkintätapa B
Nuolen puoli	 tunnus merkintäviivan ehyellä viivalla		 tunnus merkintäviivan alapuolella
Vastapuoli	 tunnus merkintäviivan katkoviivaosalla		 tunnus merkintäviivan yläpuolella
<p>HUOM. 1 Merkintätavassa A merkintäviivan osa, jossa perustunnus sijaitsee, määrittää liitoksen hitsattavan puolen – katkoviiva voidaan piirtää ehyen viivan ylä- tai alapuolelle.</p> <p>HUOM. 2 Merkintätavassa B perustunnuksen sijoitus merkintäviivan ylä- tai alapuolelle määrittää liitoksen hitsattavan puolen.</p>			

Kuva 3. Hitsausmerkkien käyttäminen osoittamaan nuolen puoli ja vastapuoli (SFS-EN ISO 2553:2019, s. 24).

Merkintätapaa B käytetään yleisesti Tyynenmeren valtioissa, kun taas merkintätapa A perustuu standardiin ISO 2553:1992, jota hyödynnetään myös Sandvikin Turun tehtaalla suunniteltujen koneiden piirustuksissa. Tästä syystä tässä työssä käytetään jatkossa ainoastaan standardissa SFS-EN ISO 2553:2019 mainittua merkintätapaa A.

Kahden eri merkintätavan olemassaolo tulee tiedostaa erityisesti silloin, jos Euroopassa suunniteltujen tuotteiden valmistusta aiotaan siirtää Tyynenmeren valtioihin. Toisaalta mikäli suunnittelupalveluja ostetaan merkintätapaa B käyttävistä maista, tulee myös tilaajan muistaa huomioida merkintätapojen olemassaolo ja pyytää käyttämään haluttua merkintätapaa.

2.4 WPS eli Welding Procedure Specification

Welding Procedure Specification eli hitsausohje on SFS 3052 standardin mukaan “asiakirja, jossa yksityiskohtaisesti esitetään tiettyyn hitsaussovellukseen vaadittavat muuttujat toistettavuuden varmentamiseksi”. Hitsausohjeen luettuaan hitsaajalla on tiedossaan kaikki kyseiseen hitsaustyöhön tarvittavat oleelliset tiedot. Hitsausohje ei ole tae laadusta, mutta se antaa pohjan hitsaustyön laadukkaalle suunnittelulle ja toteutukselle. Hitsausohjeen avulla tietotaito hitsaussovelluksen toteuttamisesta saadaan kirjattua ylös, jolloin tietotaito ei häviä

yksittäisen työntekijän lähtiessä yrityksestä. Vaikka hitsausohjetta on hyvä käyttää aina, ei sitä aina kuitenkaan suoranaisesti vaadita. Vaatimus hitsausohjeen käyttöön tulee yleensä asiakkaalta, viranomaiselta tai laatustandardista. Hitsausohje tulee olla sellaisessa muodossa, että jokainen työntekijä voi sen ymmärtää. Hitsausohjeessa määritellään ainakin seuraavat tiedot: yrityksen nimi, ohjeen numero ja revisio, mahdollisen menetelmäkoepöytäkirjan numero ja hyväksyntätapa, hitsausprosessi, perusaine, aineenpaksuus, railomuoto ja raiilon mitoitus, hitsausasento, hitsausaineet, hitsausparametrit, hitsausenergia, esikuumennus, palkojen välinen lämpötila ja jälkikäsitteily. (Lukkari 1997, s. 55.)

2.5 Hitsausrobotin online-ohjelmointi

Hitsausrobotin online-ohjelmoinnilla tarkoitetaan hitsausrobotin ohjelman kauttakulkupisteiden ja liikeratojen määrittämistä opettamalla pisteet manuaalisesti robottiohjaimella. Opeeraattori liikuttaa robottia haluttuihin pisteisiin robotin koordinaatistossa ja tallentaa pisteet robottiohjelmaan. Koordinaattipisteisiin tallentuu työkalupisteen paikkatiedon lisäksi myös yksittäisten robottiakseleiden asennot. Näin robotti muistaa missä asennossa sen akseleiden tulee missäkin pisteessä olla. Kun halutut kauttakulkupisteet on tallennettu robottiohjelmaan, osaa robotti toistaa sille opetetut liikeradat. Robotin liikenopeus ja liikeradan toistotarkkuus pisteiden välillä voidaan myös määrittää. Varsinainen hitsausohjelma muodostetaan lisäämällä kauttakulkupisteiden oheen hitsauskäskyjä. Näin hitsausvirtalähdettä pyydetään aloittamaan hitsaus tietyssä kauttakulkupisteessä ja vastaavasti lopettamaan hitsaus, kun hitsi on valmis. (Kah et al., 2015, s. 3.)

Opettamalla tapahtuvan robottiohjelmoinnin huono puoli on, että robottiohjelman teko vaatii robotin poistamisen normaalista työkierrosta. Kaikki ohjelmointiin käytetty aika voidaan usein ajatella myös menetettynä tuotantona. On kuitenkin hyvä huomioida, että tuotantoajan menetyksen merkitystä vähentää jonossa olevien työkappaleiden vähyys ja niiden kiireettömyys.

Robottiohjelmien haasteena on se, että ne ovat itsessään huonoja mukautumaan hitsattavan työkappaleen poikkeavuuksiin. Muotopoikkeamia voi esiintyä esimerkiksi polttoleikatuissa ja käsin kootuissa osakokoonpanoissa. Työkappaleet tulisi myös pystyä kiinnittämään joka kerta tarkasti samoihin kohtiin kuin aiemmin opetetussa ohjelmassa. Mikäli työkappaleen

geometria tai paikka robotin koordinaatistossa muuttuvat merkittävästi, joudutaan robottiohjelman paikat opettamaan uudestaan. Olemassa olevia pisteitä voi kuitenkin myös siirtää ja muokata, jolloin koko robottiohjelmasta ei tarvitse tehdä aivan alusta. Tällöin riittää, että vanhan ohjelman pisteitä muokataan. Mukautumaton hitsausohjelma vaatiikin siksi huomattavasti mittatarkemmat työkappaleet ja hitsauskiinnittimet, kuin mukautumaan kykenevä robotti ja robottiohjelma. Mukautuminen voidaan aikaansaada käyttämällä erilaisia sensoreita ja robotin lisäominaisuuksia, kuten aiemmin mainittua railonhakua ja railonseurainta. (Kah et al., 2015, s. 3.)

2.6 Hitsausrobotin mallipohjainen offline-ohjelmointi

Hitsausrobottien etäohjelmoinnilla, eli offline-ohjelmoinnilla, tarkoitetaan hitsausohjelman tekemistä ja kauttakulkupisteiden määrittämistä erillisellä tietokoneella offline-ympäristössä. Offline-ohjelmointia varten voidaan myös luoda digitaalinen kaksonen, jolla tarkoitetaan digitaalista kopiota todellisesta järjestelmästä. Se on aikaansaatu keräämällä todellista tietoa ja parametreja, joita hyödynnetään virtuaalijärjestelmässä. Digitaalinen kaksonen toimii niin sanottuna simulointimallina, jonka avulla voidaan simuloida esimerkiksi hitsausprosessi ja robottiohjelma kokonaisuudessaan. Offline-ohjelmoinnilla voidaan tarkoittaa myös pelkällä tekstinkäsittelyohjelmalla tehtyä robottiohjelmasta, jossa varsinainen robottiohjelman testaus ja todennus tapahtuu vasta robottisolussa. (Rivera, Jimenez, Villegas, Tamura ja Muller 2022, s. 41–49.)

Mallipohjaisella etäohjelmoinnilla tarkoitetaan robotin etäohjelmointia, jossa hyödynnetään valmistettavan tuotteen 3D-muototietoa ja menetelmätietoja. Nämä tiedot viedään graafiseen käyttöliittymään ja robottisolun simulointimalliin. Simulointimallissa 3D-muototietojen perusteella voidaan määrittää robotin liikeradat ja kauttakulkupisteet. Menetelmätietojen avulla taas voidaan määrittää esimerkiksi käytettävä hitsausprosessi tai muita tarkempia parametreja, kuten kuljetusnopeus ja poltinkulma. Mallipohjaisessa etäohjelmointiohjelmistossa liikeradat luodaan osoittamalla mallinnetusta tuotteesta haluttuja piirteitä, kuten särmiä, käyriä, tasoja tai kulmia. Ohjelmisto generoi haluttujen muototietojen perusteella tarvittavat käskyt robottiohjelman luomiseksi. Tiettyjä parametreja, kuten liiketyyppejä ja nopeuksia, voidaan edelleen säätää suoraan ohjelmistosta käsin. Erilaisille toistuville

muodoille ja piirteille voidaan myös tallentaa ohjelmointitapoja, jolloin ohjelmointiprosessia voidaan usein sujuvoittaa merkittävästi. (Välimäki et al., 2023, s. 252–257.)

Offline-ohjelmoinnin merkittävä etu opettamalla tapahtuvaan online-ohjelmointiin on se, että ohjelman tekemiseen käytetty aika ei tarkoita robotin pysäyttämistä ja tuotannon menettämistä. Robottiohjelma voidaan tehdä sisäänajovalmiiksi erillisellä tietokoneella, jolloin robotin tuotantoaikaa menetetään ohjelman käyttöönotossa merkittävästi vähemmän. (Kah et al., 2015, s. 4.)

Toinen offline-ohjelmoinnista saatava merkittävä ero löytyy robotin ulottuvuuden ja luoksepäästävyuden parantumiseen. Simulointimallissa on helppo kokeilla erilaisia hitsausasentoja ja reittejä, ilman pelkoa robotin törmäämisestä. Törmäysten vähentäminen taas lisää robotin käyttöikää ja tuotantovalmiutta. Simulointimallin avulla voidaan myös vertailla robotiohjelman kestoa ja tehokkuutta. Näin voidaan optimoida haluttuja parametreja. Hitsausohjelmissa optimoitava parametri onkin usein kaariaika, jota voidaan parantaa esimerkiksi lyhentämällä tarvittavia väliliikkeitä tai optimoimalla hitsausjärjestystä. (Kah et al., 2015, s. 4.)

2.7 Offline-ohjelmoinnin automatisointi

Viimeaikainen kehitys robottien automaattisen offline-ohjelmoinnissa on tehnyt menetelmästä hyödyllisimmän nimenomaan pienten ja keskisuurten sarjakokojen valmistuksessa. Kaikkein optimaalisin tilanne on silloin, kun offline-ohjelmointi ja simulointi voidaan tehdä täysin automaattisesti pelkän CAD-tiedon perusteella. Tällaisia täysin ilman operaattoria toimivia ratkaisuja on jo olemassa monilla eri teollisuudenaloilla ja käyttötarkoituksissa. Kuitenkin useimpiin hitsausprosesseihin täysin automatisoituja ratkaisuja ei vielä ole tarjolla. Tilanne vaikeutuu etenkin silloin, jos hitsien luoksepäästävyys on huono tai useampaa robotin akselia joudutaan ohjaamaan synkronoidusti. Tästä syystä offline-ohjelmoinnin automatisointiprosessi on hitsausroboteilla usein toteutettu siten, että yksinkertaisemmat osuudet ohjelmoinnista on mahdollisuuksien mukaan automatisoitu ja operaattori puuttuu vain ohjelmoinnin hankalampiin osuuksiin, joissa ilmenee ongelmia. (Verlag, 2022, s. 34.)

Robottien offline-ohjelmoinnin automatisoimiseksi on ainakin kolme vähimmäisvaatimusta, joiden tulee täytyä. Näitä ovat CAD-tiedon riittävä laatu, hitsien luoksepäästävyys ja robotijärjestelmän akseleiden liikeratojen riittävä laajuus ja monipuolisuus. CAD-ohjelmistosta saatavan 3D-mallin tulee olla saatavilla ja offline-ohjelmointiin käytettävän ohjelmiston käytettävissä. 3D-mallin tulee olla käyttökelpoisessa formaatissa, josta ilmenee kaikki hitsausprosessin automatisointiin tarvittavat yksityiskohdat. Tällaisia ovat esimerkiksi hitsien sijainti ja railomuoto sekä kappaleiden topologia. Erityisesti hitsien sijainnit ovat kriittisiä tarkasteltaessa hitsien luokse päästävyyttä. Liian syvät ja kapeat rakenteet, jotka vaativat robotilta juuri tietyntylaisia hitsausasentoja, pidentävät robotin törmäystarkasteluun vaadittavaa aikaa. Robotin käyttömahdollisuuksia ja ominaisuuksia saadaan parannettua lisäämällä robottiin ylimääräisiä akseleita ja laajentamalla akseleiden liikeratoja. Laajat liikeradat ja ylimääräiset akselit mahdollistavat helpommin optimaalisen hitsausasennon saavuttamisen ja hitsien luokse päästävyys parantuu. (Verlag, 2022, s. 35.)

Yksi merkittävä osuus hitsausrobotin ohjelmoinnin automatisoinnissa on oikeiden hitsausparametrien valinta. Offline-ohjelmointiin käytettävän simulointiohjelmiston tulee pystyä tunnistamaan tarvittavat hitsausparametrit, kuten kuljetusnopeus, poltinkulma ja käytettävä hitsausprosessi. Tämän tiedon määrittäminen automaattisesti voi olla erittäin hankalaa, mikäli esimerkiksi hitsausasento vaihtuu kesken hitsausliitoksen. Tällaisissa tapauksissa mallinnetut hitsit pitäisi pystyä katkomaan osiin, jolloin hitsausparametreja voitaisiin muuttaa tarvittaessa kesken hitsauksen. Mikäli hitsausparametreja ei voida määrittää automaattisesti, tulisi suunnittelijan määrittämät tai valmistuspiirustuksissa kuvatut hitsausparametrit pystyä lisäämään 3D-malliin luettavassa muodossa, jolloin ne olisivat simulointiohjelmiston hyödynnettävissä. (Verlag, 2022, s. 38–40.)

3 Ohjelmistot

Maanalaisten kaivoskoneiden suunnittelussa ja hitsausrobottien ohjelmoinnissa tarvitaan useampia eri ohjelmistoja. Tässä diplomityössä on aihealuetta rajattu ainoastaan jo Sandvik Turun tehtaalla käytössä oleviin ohjelmistoihin, joilla tehdään 3D-mallinnusta ja suunnittelua sekä robottien offline-ohjelmointia. Tämän takia tässä kappaleessa esitellään ainoastaan Siemens NX –ohjelmisto ja siitä löytyvät hitsaustyökalut, sekä Visual Components Robotics OLP –ohjelmisto. Jatkossa tässä työssä käytetään Visual Components Robotics-ohjelmistosta lyhennettä VC.

3.1 3D-mallinnus ja suunnitteluohjelmistot

3D-mallinnukseen ja CAD-suunnitteluun keskittyviä ohjelmistoja on tarjolla monia. Koneenrakennuksessa ja insinööritoimistoissa suosittuja ohjelmistoja ovat esimerkiksi SolidWorks, AutoCAD, Fusion 360, Creo sekä NX. Suomalainen Vertex tarjoaa myös omaa Vertex 4G -ohjelmistoaan mekaniikkasuunnitteluun. Usein isot konsernit ostavat suunnitteluohjelmistonsa yhdeltä ja samalta toimijalta. Näin 3D-mallit ja keskeneräiset suunnitteluprojektit ovat varmasti yhteensopivia yrityksen sisällä. Keskittämällä on myös mahdollista saavuttaa kustannussäästöjä.

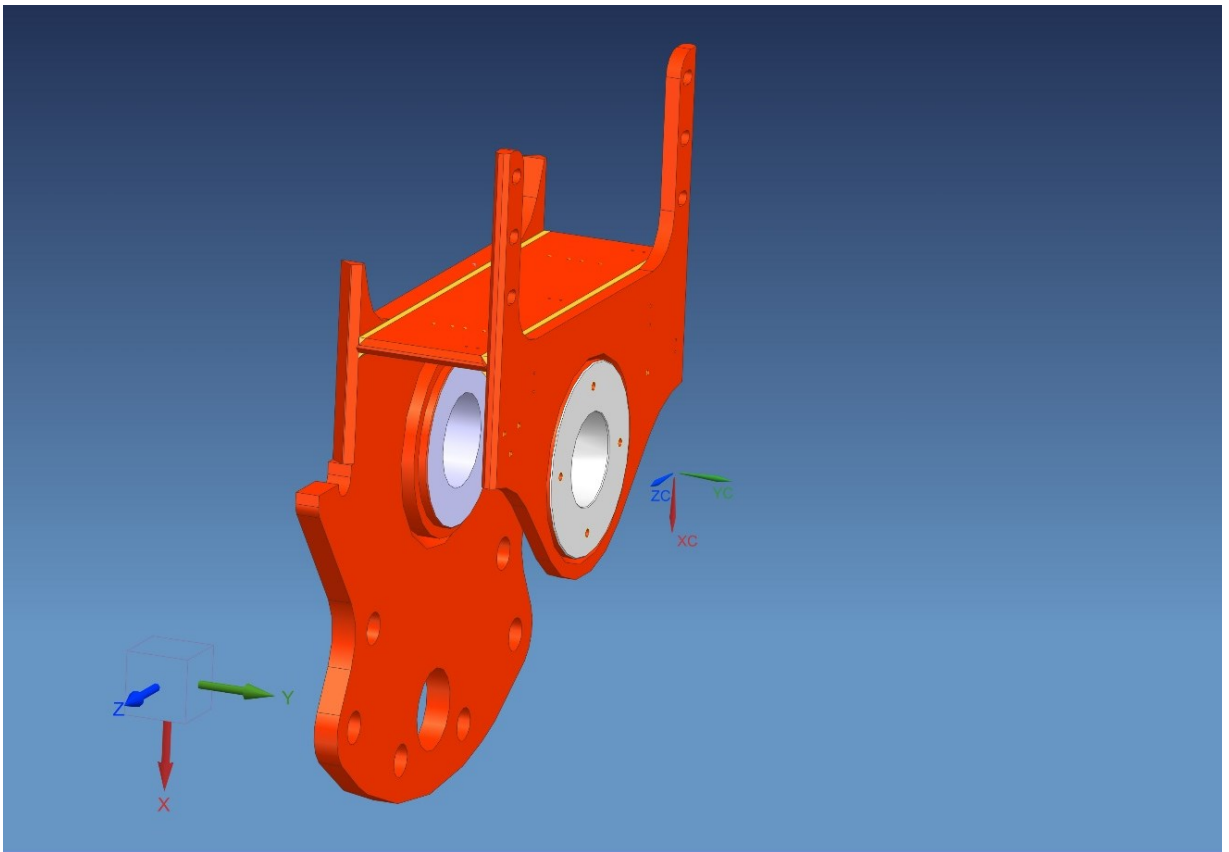
3.2 Siemens NX

Sandvik on valinnut PLM (Product Lifecycle Management) -ohjelmistonsa toimittajaksi saksalaisen monikansallisen yrityksen Siemensin. Sandvik käyttää tuotetiedon ja tuotteiden elinkaaren hallintaan Siemens Teamcenter -ohjelmistoa. Osana Siemensin tarjoamaa PLM-ratkaisua on nimenomaan tuotesuunnitteluun ja valmistukseen käytettävä Siemens NX-ohjelmisto. Siemens NX CAD mahdollistaa tuotteen 3D-mallinnuksen ja suunnittelun lisäksi myös tuotteen simuloinnin. NX CAM –ohjelma mahdollistaa myös etenkin lastuavien työtyökalujen simuloinnin ja offline -ohjelmoinnin, mutta ainakaan toistaiseksi ohjelmistossa ei ole mahdollista ohjelmoida hitsausrobotteja.

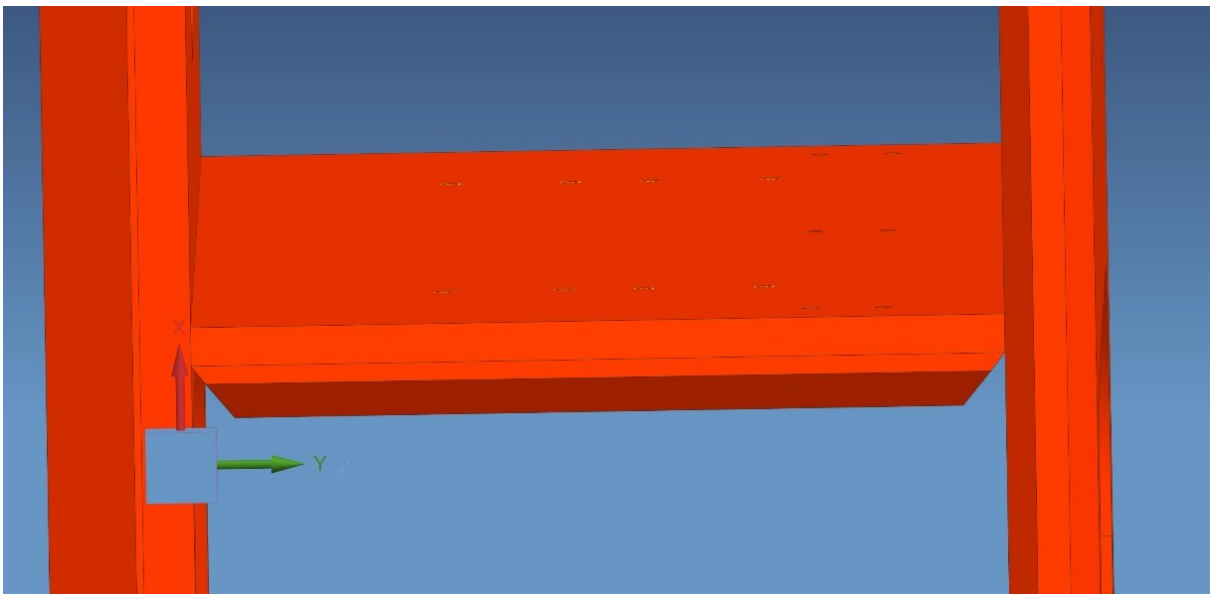
3.2.1 Weld Assistant

Tässä työssä Weld Assistantilla tarkoitetaan NX CAD-ohjelmiston työkalua, jolla on mahdollista mallintaa hitsejä kiinteiksi kappaleiksi. Etenkin piena- ja päittäisliitoksia varten tarkoitettu työkalu tarvitsee toimiakseen käyttäjältä jonkin verran tietoa, jonka perusteella hitsi voidaan mallintaa. Perustietona käyttäjän täytyy valita ainakin hitsin rajapinnat ja mitat sekä haluttu liitostyyppi. Muita työkalusta löytyviä ominaisuuksia ovat katkohitsaus sekä hitsin aloitus- ja lopetuskohdan säätö. Työkalusta löytyy useimpiin tarkoituksiin riittävä valikoima erilaisia railomuotoja ja sillä voidaan myös mallintaa haluttu hitsausrailo, jos sitä ei ole työstettävissä 3D-mallissa valmiina. Weld Assistantilla on mahdollista mallintaa piena- ja päittäisliitosten lisäksi myös muun tyyppisiä hitsejä, kuten tulppahitsejä sekä pintapalkoja. Tässä työssä keskitytään kuitenkin vain päittäis- ja pienaliitosten mallintamiseen, sillä ne ovat relevantteja kaivoskoneiden runkorakenteiden valmistuksessa.

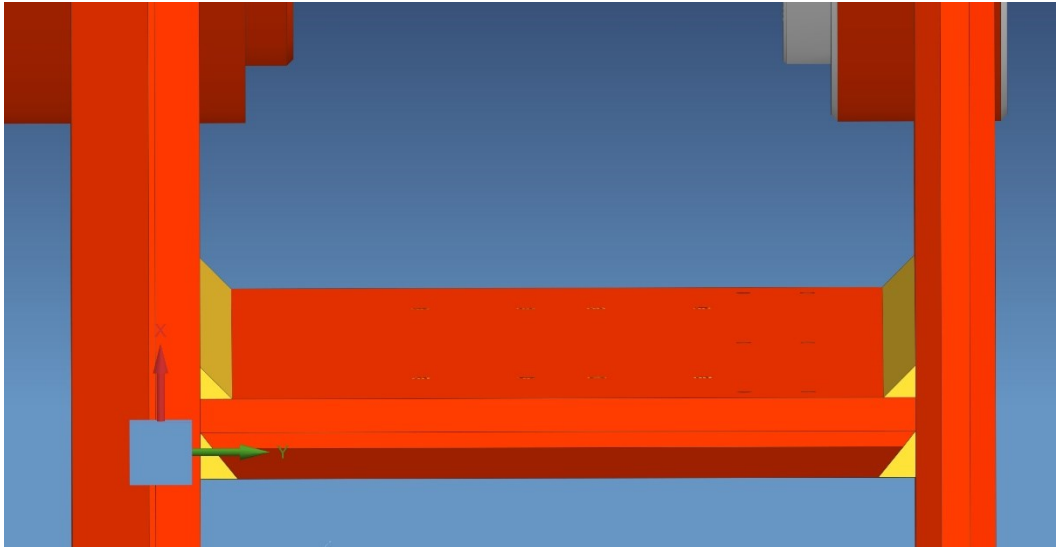
Kun piena- tai päittäisliitoksen hitsi on mallinnettu, sitä voidaan käyttää piirustuksissa ja PMI (Product Manufacturing Information) 3D-malleissa, joihin hitsausmerkinnät täydentyvät automaattisesti. Hitsit voidaan haluttaessa myös tuoda Siemens Teamcenteriin, jota voidaan käyttää hitsien tuotetiedon hallintaan. Weld Assistantilla mallinnettu hitsi on 3D-mallin piirre, joka vaikuttaa kokoonpanon ominaisuuksiin. Hitsillä on esimerkiksi massa, joka vaikuttaa kappaleen painopisteeseen. Mikäli hitsausmerkintöjä tai muita huomioita haluaa tuoda 3D-malliin, voi niitä luoda myös manuaalisesti käyttämällä työkalun ”fabrication label” -toimintoa. Kuvassa 4, 5 ja 6 on kuvattu Weld Assistantilla mallinnettuja hitsejä ja hitsaamaton aihio, jossa hitsausrailot ovat valmiiksi mallinnettuna. Kuvassa 7 on esimerkki manuaalisesti luodusta tuotteenvalmistustiedon merkinnästä.



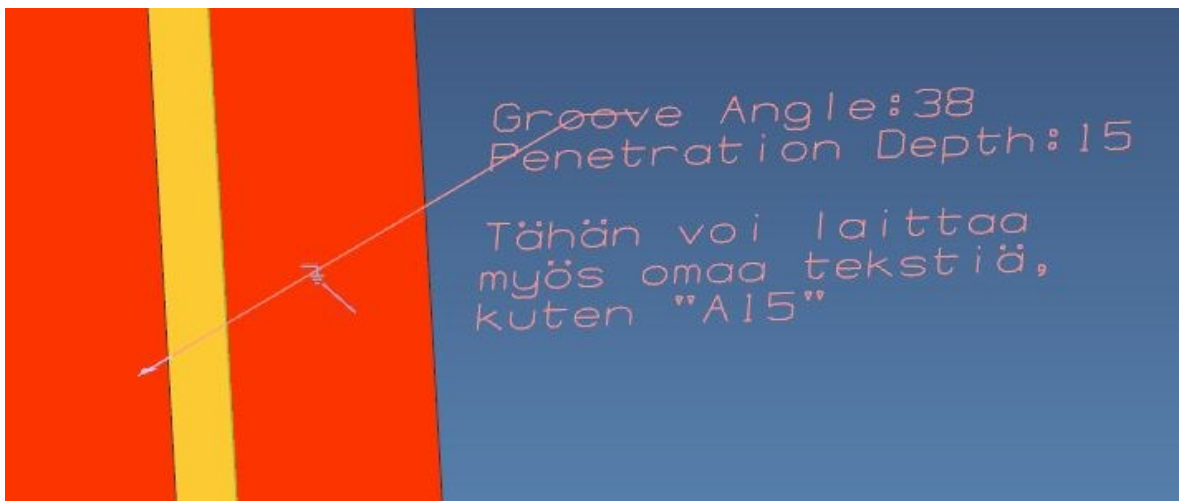
Kuva 4. Weld Assistant-työkalulla mallinnettuja hitsejä kaivoskoneen runkorakenteen osakokoonpanossa.



Kuva 5. Lähikuva kaivoskoneen runkorakenteen pienaliitoksesta hitsausviisteillä ilman varsinaisia hitsejä.



Kuva 6. Lähikuva kaivoskoneen runkorakenteesta, johon on mallinnettu pienahitsi ja täyteen hitsattu puoli-V-railo.



Kuva 7. Weld Assistantilla manuaalisesti luotu tuotteenvalmistustiedon merkintä.

3.2.2 Structure Welding

Tässä työssä Structure Weldingillä tarkoitetaan NX CAD-ohjelmiston työkalua, jolla voidaan mallintaa hitsiä Weld Assistantin tavoin. Keskeisin ero on kuitenkin, että hitsit mallinnetaan kiinteiden piirteiden sijaan värillisillä viivoilla. Viivat sisältävät osin samaa hitsaus- ja tuotteenvalmistustietoa kuin Weld Assistantilla luodut hitsit, mutta erona on, etteivät viivat vaikuta loppukokoonpanon massaominaisuuksiin. Merkittävin eroavaisuus työkalujen

välillä on kuitenkin Structure Welding työkalun mahdollisuus mallintaa hitsejä automatisoidusti tai puoliautomasoidusti. Työkalulla voidaan valita halutut komponentit, jonka jälkeen Structure Welding analysoi komponentteja ja niiden liitoksia. Tämän jälkeen se pystyy automaattisesti määrittämään hitsien sijainnin ja tarvittavan liitostyyppin. Analyysissä on myös mahdollista määrittää A-mitalle tai railomuodolle käyttäjän haluamia sääntöjä, joita käytetään kullakin levypaksuudella.

3.3 Hitsausrobotin ohjelmointiin tarkoitetut ohjelmistot

Teollisten hitsausrobottien mallipohjaiseen etäohjelmointiin on tarjolla monia eri vaihtoehtoja useilta ohjelmistotoimittajilta. Käytettävät ohjelmistot voidaan jakaa karkeasti merkkikohtaisiin ja yleiskielisiin simulointi- ja etäohjelmistoihin. Lisäksi on tarjolla simulointi- ja etäohjelmistojen lisäosia, joilla voidaan toteuttaa myös hitsausrobottien mallipohjaista etäohjelmointia. (Välimäki, et al., 2023, s. 262.)

Merkkikohtaisilla simulointi- ja etäohjelmistoilla tarkoitetaan robottivalmistajien tarjoamia ohjelmistoja. Nämä ohjelmistot on tehty ainoastaan valmistajan omia robotteja varten, eikä niitä sen vuoksi voi käyttää eri valmistajien robottiohjelmointiin ja simulointiin. Merkkikohtaisia ohjelmistoja löytyy useimmilta suurilta merkeiltä. Myös Sandvikin Turun tehtaalla käytössä olevat robottivalmistajat IGM, ABB ja Yaskawa tarjoavat omia merkkikohtaisia ohjelmistojaan. Merkkikohtaisen simulointiohjelmiston etuna on, että niissä pystytään hyödyntämään todellisen robotin käsiohjaimen virtuaalista vastinetta sekä robottimerkille ominaisia ohjelmointityökaluja ja -kieltä. Näin ohjelmistossa tehdyt robottiohjelmat ovat sellaisenaan siirrettävissä robotille ja tuotantoon. Tyypillisesti merkkikohtaisten ohjelmistojen komponenttikirjastot on luotu kattamaan ainoastaan valmistajan omien tuotteiden simulointimallit ja komponentit. Lisäksi ohjelmistossa voi olla yleisluontoisia layoutin tekemisessä käytettäviä komponentteja, kuten turva-aitoja tai muita tehdaskalusteita. (Välimäki et al. 2023, s. 262–264.)

Yleiskielisillä simulointi- ja etäohjelmointiohjelmistoilla tarkoitetaan ohjelmistoja, joita voidaan käyttää useamman kuin yhden robottivalmistajan järjestelmän ohjelmointiin ja simulointiin. Tällaisia ohjelmistoja ovat esimerkiksi Delmia Robotics, RoboDK, Siemens Tecnomatix Process Simulate sekä Visual Components. Ihanteellisessa tilanteessa yhdellä

etäohjelmointiohjelmistolla voidaan tehdä kaikkien tehtaan robottien ohjelmat, vaikka robotit olisivatkin eri valmistajilta. Ohjelmistoissa on usein saatavilla kattava kirjasto eri valmistajien robottimalleja, mutta niiden yksityiskohtaisuus ja käyttökelpoisuus on vahvasti riippuvainen ohjelmistotoimittajan ja robottivalmistajan välisestä yhteistyöstä. Yleiskielisissä etäohjelmointiohjelmistoissa käytetään ohjelmointikieltä, joka ei ole riippuvainen robottimerkistä. Usein ohjelmointi on graafista ja perustuu geometriaan. Yleisesti ottaen ohjelmoija ei keskity varsinaiseen ohjelmointikielen tehdessään ohjelmointia. Usein käytettävissä olevat työkalut ovat kuitenkin rajatumpia kuin merkkikohtaiset ominaisuudet vaatisivat. Tämä voi johtaa siihen, että tietyt ominaisuuksia kuten laserpaikointuslaitteita joudutaan jälkeempään ohjelmoimaan tekstieditorilla, merkkikohtaisilla ohjelmistoilla tai pahimmillaan robotin käsiohjaimella. Yleiskielellä tehty ohjelma ei myöskään sovellu sellaisenaan käytettäväksi robotilla ja tuotannossa, vaan se täytyy kääntää ohjelmiston käyttämästä yleiskielestä robottimerkkikohtaiselle ohjelmointikielille. (Välimäki et al., 2023, s. 262–264.)

3.4 Visual Components Robotics OLP (VC)

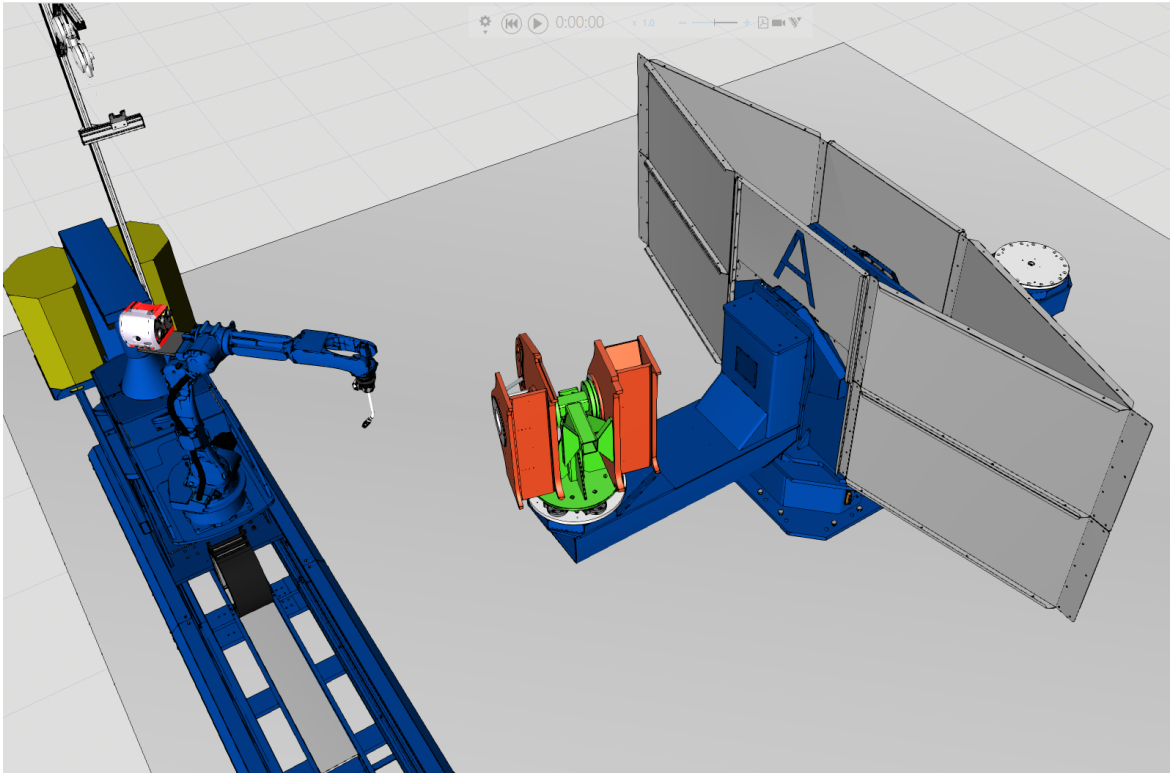
Tätä diplomityötä suunniteltaessa Sandvikin Turun tehtaalla käytössä ollut robottien etäohjelmointiin tarkoitettu ohjelmisto oli nimeltään Delfoi ARC. Delfoi ARC oli niin sanottu lisäosa varsinaiseen Visual Components-ohjelmistoon, jonka avulla voitiin ohjelmoida hitsausrobotteja. Lokakuussa 2022 Visual Components ja Delfoi Robotics yhdistyivät yrityskaupan myötä, jolloin ohjelmistosta tuli Visual Components Robotics OLP (VC). VC on yleiskielinen simulointi- ja etäohjelmointiohjelmisto, jolla voidaan ohjelmoida useiden eri robottivalmistajien robotteja simulointiympäristöä hyödyntäen. (Visual components home page, 2024).

3.5 3D-mallin ja robottisolun luominen Visual Components Robotics OLP -ohjelmaan

Jotta hitsausohjelmien tekeminen VC-ohjelmistolla olisi mahdollista, täytyy käytettävästä hitsausrobotista luoda simulointimalli eli niin sanottu “layout”. Sandvikin Turun tehtaan tapauksessa valmiit layoutit kullekin robotille on saatu suoraan valmiina robottivalmistajalta. Layoutin voi tehdä myös itse, mutta sen tekeminen on robottivalmistajan omalle asiantuntijalle helpompaa, sillä tekemisessä tarvitaan huomattava määrä syötettäviä parametreja. Yleensä riittää, että jokaisesta robotista tehdään yksi layout, jota voidaan käyttää jatkossa kaikkien robottiohjelmien tekemiseen kyseiselle robotille. (Visual components extranet, 2023.)

Sandvikin Turun tehtaalla on käytössä kääntöpöydällinen robotti, jossa on kaksi pyörittäjää. Molemmille pyörittäjille on tehty oma layout, vaikka ne eivät teoriassa eroa toisistaan. Kaksi layoutia kuitenkin mahdollistaa pyörittäjäkohtaisen kalibroinnin käyttämisen, jolloin ohjelmasta saadaan huomattavasti tarkempi ja todellisuutta vastaavampi. Monissa käskyissä tulee käyttää pyörittäjäkohtaisia käskyjä aliohjelmien kutsumiseen, jolloin erilliset layoutit helpottavat ohjelman tekemistä ja aliohjelmien kutsumisen hallintaa. Sandvikin Turun tehtaalla käytössä oleva layout kääntöpöydällä varustetusta robotista on esitetty kuvassa 8.

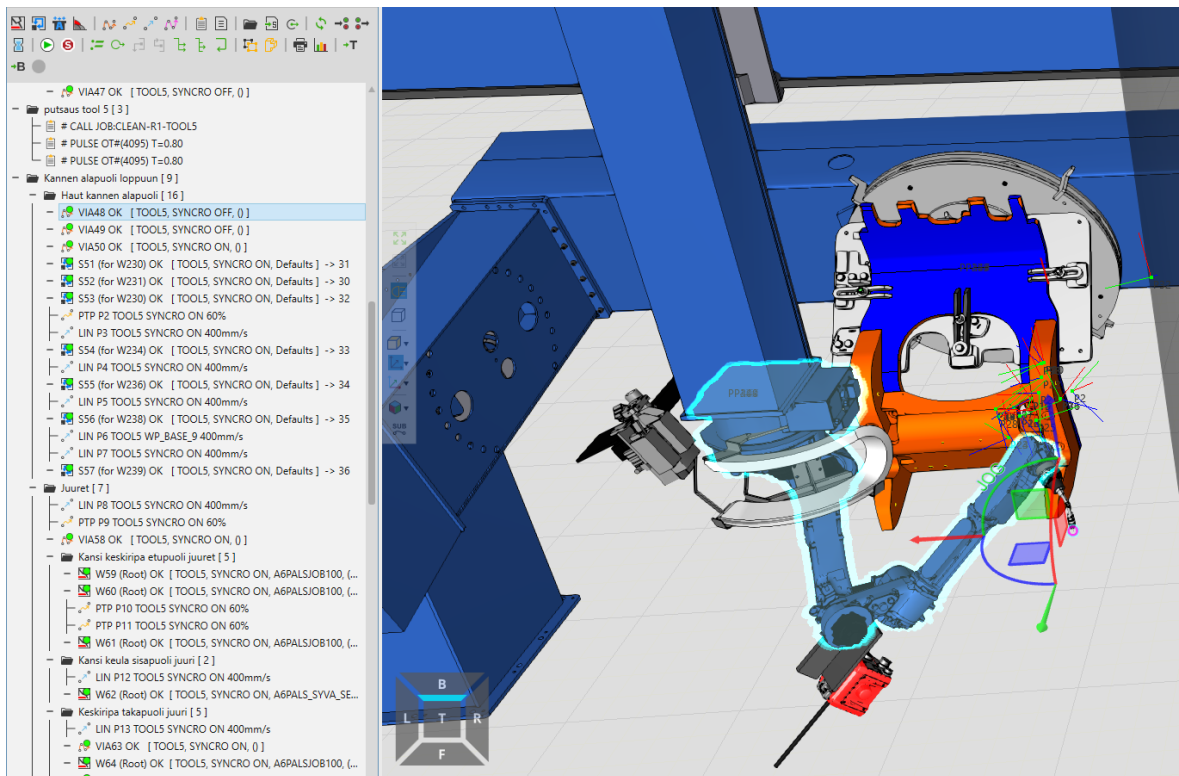
Kun robottisolun layout tulee valmiina robottisolun toimittajalta, jää robottiohjelmoijan tehtäväksi lisätä layouttiin hitsauksessa käytettävä hitsauskiinnitin ja hitsattava työkappale. Robottiohjelman teko on mahdollista myös ilman hitsauskiinnittimen 3D-mallia, mutta tällöin hitsauskiinnitintä ei voi ottaa huomioon robottiohjelman törmäystarkastelussa. Hitsauskiinnittimen 3D-malli mahdollistaa työkappaleen nopean ja tarkan asemoinnin pyörittäjän suhteen, joten on ehdottomasti helpompaa ja hyödyllistä lisätä simulointimalliin myös hitsauskiinnitin. Layouttiin voidaan lisätä myös muita työkappaleessa kiinni olevia osia, joita ei aiota hitsata. Tällaisia osia Turun tehtaalla ovat esimerkiksi työkappaleeseen tai hitsauskiinnittimeen jätettävät nostovälineet ja erityisesti hitsauksen lämpövaikutuksen aiheuttamia muodonmuutoksia varten asennettavat tukitangot. Ylimääräisten osien lisääminen on hyödyllistä, koska tällöin ne voidaan ottaa helpommin huomioon törmäystarkastelussa ja hitsausohjelmaa tehtäessä. (Visual components extranet, 2023.)



Kuva 8. Yaskawa3 robottiaseman simulointimalli.

3.6 Hitsausohjelman tekeminen Visual Components Robotics OLP -ohjelmistolla

Kun VC-ohjelmistossa on luotu simulointimalli, voidaan varsinaisen robottiohjelman teko aloittaa. Robotin ohjelmointi simulointiympäristössä eroaa Yaskawan tapauksessa käsiohjaimella ohjelmoinnista siten, että simuloinnissa käytetään Yaskawan ohjelmointikielen sijaan simulointiohjelmiston omia käskyjä, joista ohjelma rakennetaan. Kun ohjelma on valmis, simulointimallissa luotu ohjelma käsitellään robottikohtaisella kääntäjällä, joka muodostaa robottiohjelman robottikohtaisella ohjelmointikielillä. Tämän menetelmän etuna on, että robottiohjelmoijan ei välttämättä tarvitse osata eri merkkisten robottien erilaisia ohjelmointitapoja. Robottikohtaisen ohjelmointikielen ymmärtäminen on kuitenkin hyödyksi etenkin ohjelman sisäänajovaiheessa. Simulointiohjelman omia käskyjä käyttäessä myös ohjelman kokonaiskuvan hahmottaminen on helpompaa, sillä yksittäiset robottikäskyt on ikään kuin tiivistetty yhdelle riville. Kuvassa 9 on esimerkkikuva simulointiympäristössä luodusta ohjelmasta, jossa haut, siirtymäkäskyt ja hitsauskäskyt näkyvät eriteltyinä omille riveilleen.



Kuva 9. Esimerkkikuva simulointiympäristössä tehdystä robottiohjelman osasta.

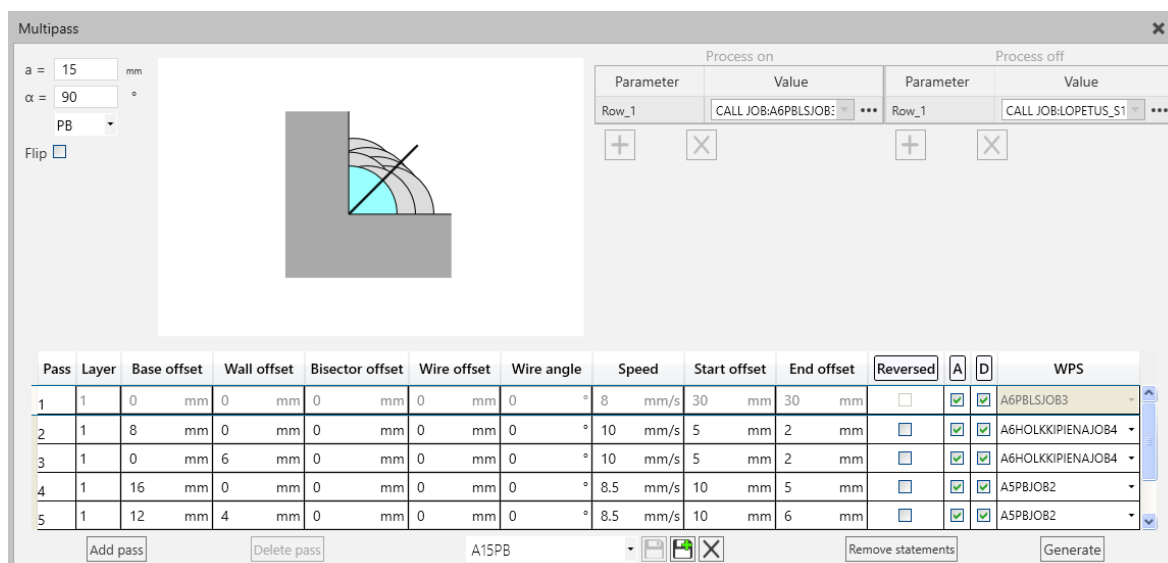
VC:ssa robottiohjelman teko tapahtuu siten, että valikosta valitaan haluttu käskytyyppi. Yleisimmin käytetyt käskytyypit ovat hitsaus-, haku- ja liikekäsky. Yksinkertaisen, mittatarkan ja hyvän luoksepäästävyuden omaavan hitsattavan geometrian hitsausohjelman tekoon saattaa riittää pelkkien hitsauskäskyjen määrittäminen, sillä kääntäjä tekee hitsauskäskyjen välille automaattisesti tarvittavat liikekäskyt. Hitsauskäskyjen välille täytyy kuitenkin usein lisätä ylimääräisiä liikekäskyjä etenkin silloin, kun törmäystarkastelussa huomataan robotin törmäävän hitsauskäskyjen välillä liikkueensa. Hakukäskyjä käytetään silloin, kun hitsattavien osien geometrinen tarkkuus ja hitsauskiinnittimen paikoitustarkkuus ei ole riittävällä tasolla.

Hitsauskäsky luodaan simulointiohjelmassa siten, että valitaan valikosta hitsauskäskylle tarkoitettu komentotyökalu. Ohjelma pyytää tämän jälkeen valitsemaan halutun hitsausrailon tai kappaleiden yhteenliittymäkohdan. Haluttu hitsausrata valitaan 3D-mallista valitsemalla haluttu pinta, joka on yhtymäkohdan lähellä. Hitsausradan valinnassa tulee myös määrittää esimerkiksi hitsaussuunta, hitsin pituus ja hitsauspisteiden tiheys. Kun haluttu hitsi on valittu, voidaan hitsauskäskyä hienosäätää välilehtien alta löytyviä parametreja muokkaamalla. Olenaisia muokattavia parametreja ovat esimerkiksi käytettävät akselit ja niiden asento,

kappaleen hitsausasento, sekä polttimen kulmaan ja hitsausrobotin asentoon vaikuttavat säädöt. Parametrien muokkauksen jälkeen voidaan suorittaa törmäystarkastelu joko koko ohjelmalle tai ainoastaan valituille käskyille erikseen. Kun robotin liikeradat hitsin aikana on saatu muokattua halutuiksi, valitaan virtalähteelle lähetettävä hitsauskäsky, joka määrittää käytettävän hitsausprosessin.

Kun railon ensimmäinen hitsi on määritetty, voidaan monipalkohitsausta varten tarvittavat loput hitsit määrittää hyödyntämällä monipalkohitsausta varten kehitettyä multipass-työkalua. Työkaluun voi tallentaa erilaisia palkoprofiileja, jotka voidaan määrittää erikseen vastaamaan esimerkiksi tiettyä hitsin a-mittaa, liitostyyppiä ja hitsausasentoa. Tämä nopeuttaa merkittävästi monipalkohitsauksen ohjelmointia. Työkalun avulla monipalkohitsien muokaus on erityisesti ohjelman sisäänajovaiheessa helpompaa, kun halutut pienet muutokset esimerkiksi robotin asennossa tai hitsien paikassa voidaan tehdä tarvittaessa kaikille hitseille samalla kertaa. Viralliseen hitsausohjeeseen perustuva palkoprofiili määrittää juuripalosta seuraavien hitsien hitsauspolttimen paikan suhteessa juuripalkoon. Lisäksi profiilissa on kerrottu käytettävä hitsausvirtalähteen jobi, jonka perusteella hitsausvirtalähteeltä pyydetään tietyt hitsausparametrit ja hitsausprosessi.

Sandvikin Turun tehtaalla Yaskawan roboteilla hitsattavat osat ovat yleistettynä kaikki samaa materiaalia. Myös käytettävä hitsauslanka ja kaasu ovat samat. Tästä syystä erilaisten hitsausohjeiden määrä ei ole kohtuuttoman suuri. Virallisten hitsausohjeiden pohjalta on erikseen tehty hitsauskokeita, joilla monipalkohitsauksessa käytettävät palkoprofiilit on määritetty. Palkoprofiilit on Sandvikin Turun tehtaalla määritelty ja testattu kaikille käytössä oleville hitsaustilanteille. Oikean profiilin valintaan tarvitaan käytännössä ainoastaan hitsin a-mitta, railonmuoto tai liitostyyppi sekä hitsausasento. Kaikkien hitsien robottiohjelmointi aloitetaan käyttämällä lähtökohtana näitä palkoprofiileja, mutta erikoistilanteissa erityisesti polttimen kulmaa saatetaan joutua säätämään. Esimerkki Multipass-työkalulla luodusta palkoprofiilista on esitetty kuvassa 10.

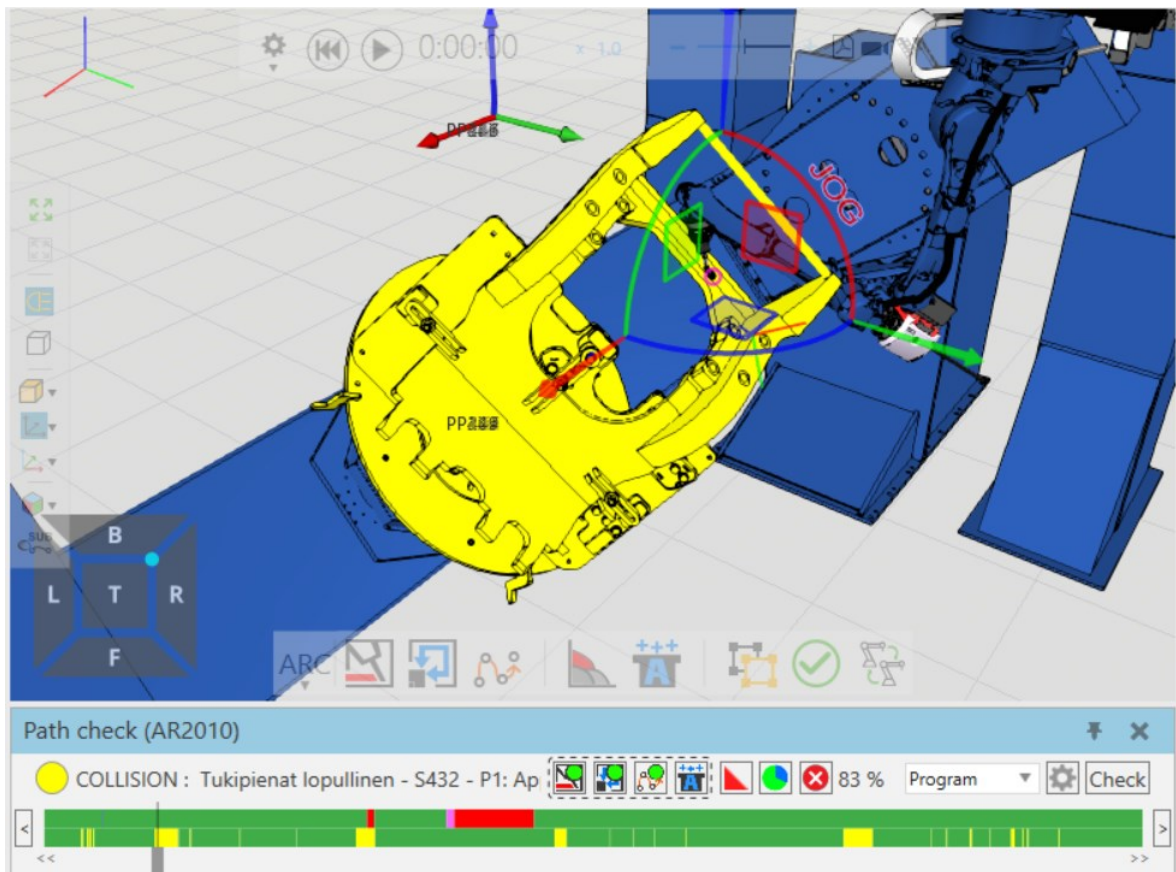


Kuva 10. Esimerkki palkoprofiilista PB-asennossa hitsattavalle pienahitsille, jonka a-mitta on 15 mm.

Kun simulointimalliin on määritetty hitsattavat hitsit ja niiden palkoprofiilit, täytyy määrittää hitsausjärjestys. Sandvikin Turun tehtaan runkoverstaalla hitsausjärjestys perustuu usein opittuun tietoon ja kokemukseen. Tietyt osat, kuten lastauskoneiden takarunkojen nivelet, hitsataan kaikkien kokoluokkien koneiden osalta samassa järjestyksessä. Hitsausjärjestystä ei kuitenkaan ole yleisesti kirjattu 2D-piirustuksiin, vaan se on dokumentoitu tuotannon omiin työohjeisiin. Nykyisellään uusien koneiden työohjeet kirjoitetaan puhtaaksi vasta sen jälkeen, kun ensimmäiset protokoneet on valmistettu, ja hitsausjärjestys todettu toimivaksi. Työohjeissa määritellään myös osat, jotka asennetaan vasta tiettyjen liitosten hitsaamisen jälkeen. Suunnitteluvaiheessa tulisi miettiä osien asennusjärjestystä hitsien luokse päästävyyden kannalta, mutta tarkempi hitsausjärjestys lämpövääntelyn ja lämmöntonnin osalta vaatii tuotannosta ja hitsauksesta hyvin perillä olevan henkilön ammattitaitoa. Lopullisen hitsausrobottiohjelman tekeminen vaatii hitsausjärjestyksen, sekä osien asennusjärjestyksen päättämistä. Hitsausjärjestyksen määrittämisessä voidaan hyödyntää myös VC:n sequencing-toimintoa, jolla joukko hitsejä voidaan järjestää keskenään esimerkiksi siten että juuripalot hitsataan ensin.

Kun simulointimallissa tehty robottiohjelma on hitsien osalta määritetty, voidaan robottiohjelmalle tehdä jo aiemmin mainittu törmäystarkastelu. Esimerkki törmäystarkastelusta, jossa on havaittu korjattavaa, on esitetty Kuvassa 11. Tarkastelu kertoo ohjelmasta kohdat, joissa

robotti törmää tai ylittää mekaaniset liikeratansa. Törmäävät robotin tai työkappaleen osat maalautuvat keltaisella. Robotin ylittäessä liikeratansa tai singulariteettinsa, muuttuu robotin akseli punaiseksi. Törmäystarkastelua apuna käyttäen voidaan robottiohjelman ongelmakohdat paikallistaa ja korjata manuaalisesti. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää VC:n omaa autosolver-työkalua. Sen avulla ohjelmisto pyrkii korjaamaan havaitut virhepaikat automaattisesti. Näin ohjelmointiprosessia saadaan sujuvoitettua huomattavasti. Autosolver -työkalun käyttö tapahtuu vihreän palkin yläpuolella olevista näppäimistä, joissa valittavana on korjaustyökalut erikseen hitsaus-, liike- sekä hakukäskyille.



Kuva 11. Esimerkki törmäystarkastelusta, jossa on havaittu törmäyksiä.

4 Kaivoskoneen teräsrakenteiden valmistusprosessi

Tässä kappaleessa on kuvattu pääpiirteittäin maanalaisten kaivoskoneiden teräsrakenteiden valmistusprosessi Sandvikin Turun tehtaalla. Prosessin kuvaus on hyvin yleisluontoinen, eikä siinä voida kertoa Sandvikille tärkeitä strategisia lukuja tai liikesalaisuuksia.

4.1 Kaivoskoneen osien suunnittelu

Sandvikin Turun tehtaalla valmistettavat maanalaiset kaivoskoneet suunnitellaan pääsääntöisesti Turussa. Suurin osa suunnittelijoista työskentelee Sandvikin alaisuudessa, mutta myös alihankkijoita hyödynnetään tietyillä suunnittelun osa-alueilla. Suunnittelun keskittyminen tuotannon kanssa samalle tehtaalle helpottaa suunnittelun ja valmistuksen henkilöstön välistä vuorovaikutusta.

4.2 Kaivoskoneen rungon osien valmistus

Kaivoskoneiden rungot rakentuvat suurimmaksi osaksi muotoon leikatuista tai jyrsityistä teräslevyistä ja holkeista. Teräsosien valmistuksessa on huomioitu koneistettavien pintojen työstövarat. Tehtaalla osat hitsataan yhteen ja kokoonpano koneistetaan lopuksi suunniteltuihin lopullisiin mittoihin.

4.2.1 Leikkaus

Roboteilla hitsattavien levyosien leikkaus on Sandvikin Turun tehtaalla ulkoistettu ja osat tulevat eri alihankkijoilta. Levyosat valmistetaan pääsääntöisesti tietokoneohjatuissa polttoleikkauskoneissa, joissa ne polttoleikataan isosta levykappaleesta haluttuun muotoon. Jotkin työöstokeskukset voivat myös leikata levyyn tarvittavan viisteen. Esimerkiksi Paramet Konepaja Oy:llä on käytössään eri valmistajien tietokoneohjattuja polttoleikkauslaitteita, joiden työöstöalueiden leveys vaihtelee 2000–4000 mm ja pituus 6000–20000 mm välillä (Paramet Konepaja Oy, 2023).

4.2.2 Silloitushitsaus

Polttoleikatut osat tuodaan tehtaalle kuormalavoilla, joista osakokoonpanon vaatimat kappaleet nostellaan silloitushitsausta varten rakennettuun telineeseen. Telineettä hyödyntämällä osista saadaan silloitushitsattua lopullisen hitsauksen mahdollistava osakokoonpano, joka voidaan kiinnittää robottia varten suunniteltuun hitsauskiinnittimeen. Joidenkin pienempien osakokoonpanojen, kuten runkolevyjen holkkien, eturungon saranoiden tai takarungon nivelien silloitushitsauksessa ei välttämättä hyödynnetä isoja telineitä, vaan kyseisiä töitä varten suunniteltuja pienempiä aputyökaluja. Koska osakokoonpanot kootaan käsin, voi silloitushitsausvaiheessa syntyä pieniä vaihteluita osakokoonpanojen geometrioissa. Käytännössä kaikki hitsattavat osakokoonpanot kuitenkin koneistetaan tarpeellisilta osin lopullisiin mittoihinsa vasta hitsauksen jälkeen, jolloin saavutetaan suunnittelussa määritellyt geometriset toleranssit.

4.3 Hitsausrobotit

Sandvikin Turun tehtaalla erilaisia hitsausrobotteja on tuotannossa yhteensä seitsemän ja niillä hitsataan lastauskoneiden etu- ja takarunkoja, kauhoja sekä nostovarsia. Vanhan ABB:n hitsausrobotin poistuttua tuotannossa on sekä IGM:n että Yaskawan valmistamia robotteja. IGM-roboteilla ei toistaiseksi ole käytössä offline-ohjelmointia, joten tässä työssä keskitytään ainoastaan Yaskawa-robotteihin. Yaskawa-robotteja on tehtaalla kolme, joista kaksi ovat keskenään samanlaisia. Kahdella isolla robotilla hitsataan isompia ja painavampia eturunko-kokoonpanoja sekä niiden osakokoonpanoja, kun taas kolmannella pienemmällä robotilla hitsataan pääosin etu- ja takarunkoon kiinnitettäviä osakokoonpanoja, kuten niveliä ja saranoita, sekä eturungon runkolevyjä. Kaikissa Yaskawa-roboteissa hyödynnetään AR2010-robottia, jonka ympärille on lisätty ratoja ja akseleita, kuten pyörittäjä. Kuvassa 12 on esitettyä pienempi hitsausrobotti, eli ”Yaskawa3”.



Kuva 12. Uusi Yaskawa3 robotti asennusvaiheessa.

4.3.1 Robotin esivalmistelu

Robotti valmistellaan tuotantoon kiinnittämällä hitsattavat osat tehtaalla suunniteltuihin ja valmistettuihin hitsauskiinnittimiin. Hitsauskiinnittimet ja niihin kiinnitetyt hitsattavat osat nostetaan paikalleen robotin pyörittäjään. Hitsauskiinnitin lukittuu pyörittäjään nollapiste-kiinnittimillä, joilla saavutetaan hitsaukseen riittävä osien paikoitustarkkuus. Tietyt paksumpia metalliosia sisältävät osakokoonpanot vaativat myös ennen hitsausta tehtävän esikuumennuksen. Hitsaajat kuumentavat ennalta määritellyt osat kaasuliekillä tai induktiokuumentimilla kohotettuun työskentelylämpötilaan, jonka jälkeen hitsauksessa käytettävä robotiohjelma käynnistetään. Kuvassa 13. on esitettyä lastauskoneen eturungon alaosan robotihitsauksessa käytettävä hitsauskiinnitin.



Kuva 13. Hitsauskiinnittimeen asennettu lastauskoneen eturungon alaosan hitsauskokoonpano.

4.4 Robottiohjelman käyttöönotto ja tarkistus

Puhuttaessa online-ohjelmoinnista, Sandvikin Turun tehtaalla ohjelmoitujen hitsien tarkastus tehdään lyhyissä pätkissä hitsipalkko kerrallaan. Yksittäinen hitsausrailo hitsataan valmiiksi ennen seuraavan railon ohjelmoimista tai tarkistamista. Yksittäisen railon ohjelmoinnin jälkeen hitsille saatetaan suorittaa niin sanottu kylmäajo, eli ohjelma ajetaan ilman hitsausta läpi, jolloin varmistetaan robotin oikea liikerata. Mikäli ohjelmoinnissa kuitenkin hyödynnetään suuria railon seurannan tekemiä korjauksia, ei kylmäajoa voida välttämättä suorittaa kokonaisuudessaan. Tällöin kappale joudutaan hitsaamaan ilman testausta. Ohjelman valmistuessa työkappale on siis usein jo kokonaan hitsattu. Lopullinen koko ohjelman tarkistus ja mahdolliset viimeiset korjaukset suoritetaan vasta otettaessa seuraava työkappale hitsaukseen, jolloin päästään varmistamaan ensimmäisen hitsatun kappaleen jälkeen

tehtyjen korjauksien toimivuus. Mallipohjaisella etäohjelmoinnilla toteutetun robottiohjelman käyttöönotto toteutetaan Sandvikin Turun tehtaalla hyvin samalla tavoin kuin opettamalla ohjelmoidun robottiohjelman varmistaminen. Etäohjelmointiohjelmistossa tehty robottiohjelman tuodaan tietokoneelta robotille käyttäen USB-muistitikkoa. Ohjelma ladataan robotin muistiin, josta ohjelma saadaan robotin käytettäväksi. Robottiohjelman ajetaan käsky kerrallaan käsiajolla läpi. Käsiajolla ohjelmaa tarkistaessa käytetään hidastettuja liikenopeuksia, jotta minimoidaan riskit robotin mahdollisissa törmäyksissä ja ehditään nähdä mahdolliset korjauksen tarpeessa olevat liikeradat. Lähtökohtaisesti etäohjelmoidun robottiohjelman sisäänajo on hyvin suoraviivainen prosessi, jossa ainoastaan varmistetaan simuloinnin vastaavuus oikean robotin kanssa. Todellisuudessa 3D-mallissa ja todellisessa kappaleessa on kuitenkin usein pieniä eroja esimerkiksi railotilavuudessa, jolloin ohjelmaa saatestaan joutua korjaamaan vielä sisäänajovaiheessa. Sandvikin Turun tehtaalla korjaukset tehdään suoraan etäohjelmointiohjelmistossa, josta ne ladataan uudelleen robotille. Näin robottiohjelman tehdyt korjaukset ovat myös etäohjelmointiohjelmistossa ajan tasalla, ja sitä voidaan hyödyntää tulevaisuudessa. Etäohjelmoitua ohjelmaa voidaan korjata myös robotin käsiohjaimella, mutta tällöin ohjelmaa ei ole enää mahdollista viedä takaisin yleiskieliseen etäohjelmointiohjelmistoon helposti muokattavassa muodossa.

4.5 Osien viimeistely

Kun robotti on suorittanut halutut hitsausohjelmat, poistetaan robotista joko hitsauskiinnitin ja hitsattu työkappale, tai pelkkä hitsattu kappale. Hitsattu ja viimeistelemätön työkappale siirretään viimeistelypaikalle. Esimerkiksi lastauskoneiden eturunkoja varten on Turun tehtaalla oma käsiohjattu moottorikäyttöinen pyörittäjä, jolla voidaan kääntää runko optimaaliseen hitsausasentoon. Pyörittäjässä työkappaleeseen hitsataan robotilta hitsaamatta jääneet hitsit. Lopuksi työkappaleen hitsien epätasaisuudet hiotaan erilaisilla käsihiomakoneilla pintakäsittelyn ja piirustusten vaatimukset täyttäväksi.

5 Hitsaustiedon lisääminen 3D-malliin

Tämän työn kokeellinen osuus piti sisällään kolme erillistä työvaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa luotiin esimerkkihitsi Visual Components Robotics OLP –ohjelmistolla (VC). Lisäksi selvitettiin, mitä tarkempia kappalekohtaisia tietoja hitsausrobotin ohjelmoinnissa Sandvikin Turun tehtaalla useimmiten tarvitaan. Tiedot taulukoitiin seuraavia työvaiheita varten.

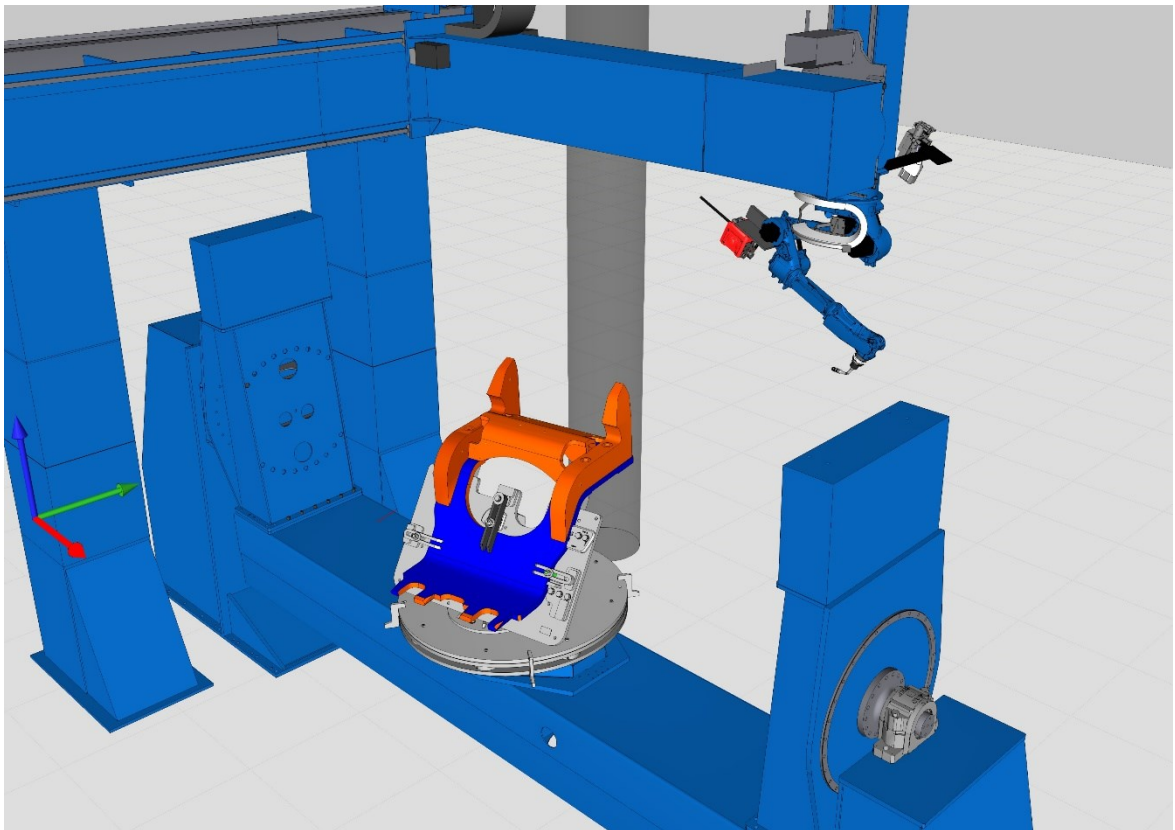
Toisessa vaiheessa luotiin hitsejä maanalaisen kaivoskoneen osakokoonpanoon käyttäen NX CAD:in Structure Welding- ja Weld Assistant-työkaluja. Molemmilla työkaluilla luoduista hitseistä saatavaa tietoa vietiin ohjelmasta käyttämällä export-toimintoa. Saatua tietoa verrattiin kokeen ensimmäisessä vaiheessa taulukoituihin tietoihin. Lisäksi arvioitiin, voiko toisella suunnittelutyökalulla tehdä kaiken tarpeellisen, vai tukevatko työkalut toisiaan sujuvasti.

Kokeen kolmannessa vaiheessa yritettiin viedä NX CAD:istä saatua hitsaus- ja valmistustietoa suoraan VC-ohjelmistoon. Lisäksi pyrittiin arvioimaan, oliko 3D-mallin mukana tuodusta hitsaus- ja valmistustiedosta merkittävää hyötyä offline-ohjelmoinnissa ja mitkä NX CAD:in työkalujen parametrit olivat merkittävimpiä lopputuloksen kannalta. 3D-mallin mukana tuodun hitsaus- ja valmistustiedon pohjalta yritettiin luoda lopullinen hitsausohjelma. Lopuksi arvioitiin, kuinka automatisoiduksi hitsausohjelmien teko olisi mallin mukana tuodun hitsaus- ja valmistustiedon avulla mahdollista saada.

5.1 Tarvittava tieto hitsausohjelman luomiseen

Tämän tutkimuksen tekijällä oli jo ennestään kokemusta hitsausrobottien ohjelmoinnista VC-ohjelmistolla, joten vaaditut lähtötiedot kokonaisen hitsausrobottiohjelman tekemiseen olivat pääosin tiedossa. NX CAD:in hitsaustyökaluja pyrittiin arvioimaan siltä pohjalta, voisiko niiden avulla näitä tietoja siirtää suoraan 3D-malliin. Ohjelman teossa tarvittavat tiedot taulukoitiin, ja taulukoituja tietoja käytettiin hyväksi työkalujen arvioinnissa.

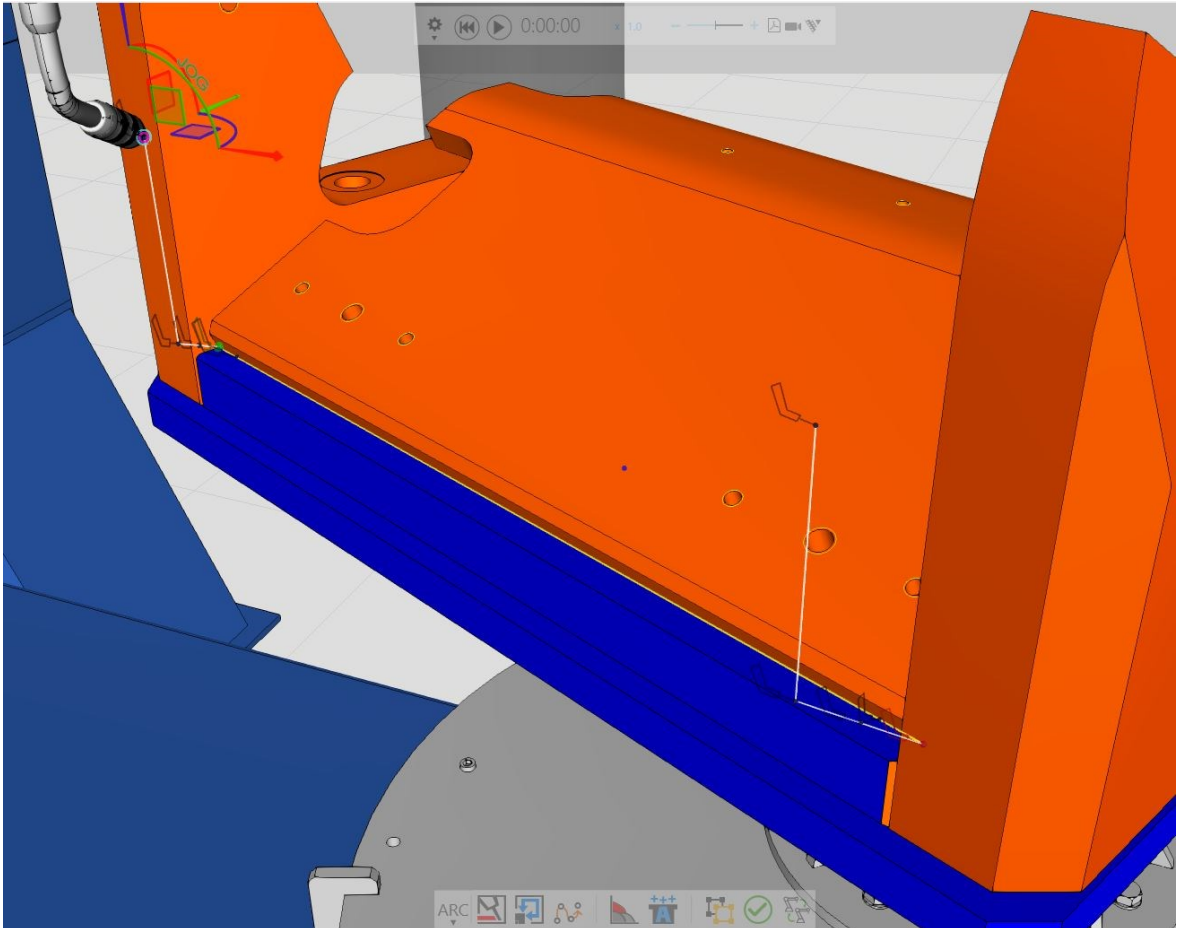
Työssä käytetty simulointiohjelman layout ja esimerkki robotin työpöydälle asemoidusta työkappaleesta on esitetty Kuvassa 14. Kyseisessä esimerkissä käytetystä hitsauskiinnittimestä oli tehty jo suunnitteluvaiheessa 3D-malli. Varsinaisen kiinnittimen valmistuksen jälkeen kiinnittimen geometria oli vahvistettu 3D-skannaamalla. Robotin liikeradat voitiin luotettavasti määrittää, sillä 3D-malli vastasi mahdollisimman tarkasti oikeaa hitsattavaa komponenttia. Työkappaleen 3D-mallissa oli myös esimerkiksi oikeaa osaa vastaavat hitsausviisteet. Todenmukaisten mallien avulla hitsattava osa saatiin nopeasti asemoitua robotin työpöydälle ja simulointimalli oli käyttövalmis.



Kuva 14. Työkappale asemoituna robotin työpöydälle käyttäen apuna hitsauskiinnittimen 3D-mallia.

Seuraava hitsausrobotin ohjelmoinnissa tarvittava tieto oli hitsien sijainti, joka oli merkitty hitsattavan kokoonpanon valmistuspiirroksiin. Valmistuspiirustuksesta voitiin lukea, hitsaataanko levyt molemmilta puolilta, tai onko hitsissä jotain muuta huomioitavaa. Kun hitsien sijainti oli tiedossa, simulointimallista valittiin halutut liitokset ja hitsausviisteet. Tämän jälkeen ohjelmisto määrittä hitsausliikeradan halutun viisteen tai liitoksen kohdalle. Seuraavaksi hitsin pituutta, sekä aloitus- ja lopetuskohtia säädettiin vastaamaan paremmin

haluttua lopputulosta. Kuvassa 15. on esimerkki hitsausliikeradasta, sekä lähestymis- ja poistumislukeroista. Radat on määritetty valitsemalla simulointimallista haluttu liitoskohta.



Kuva 15. Esimerkkinä luotu hitsausliikerata, sekä lähestymis- ja poistumislukeroita.

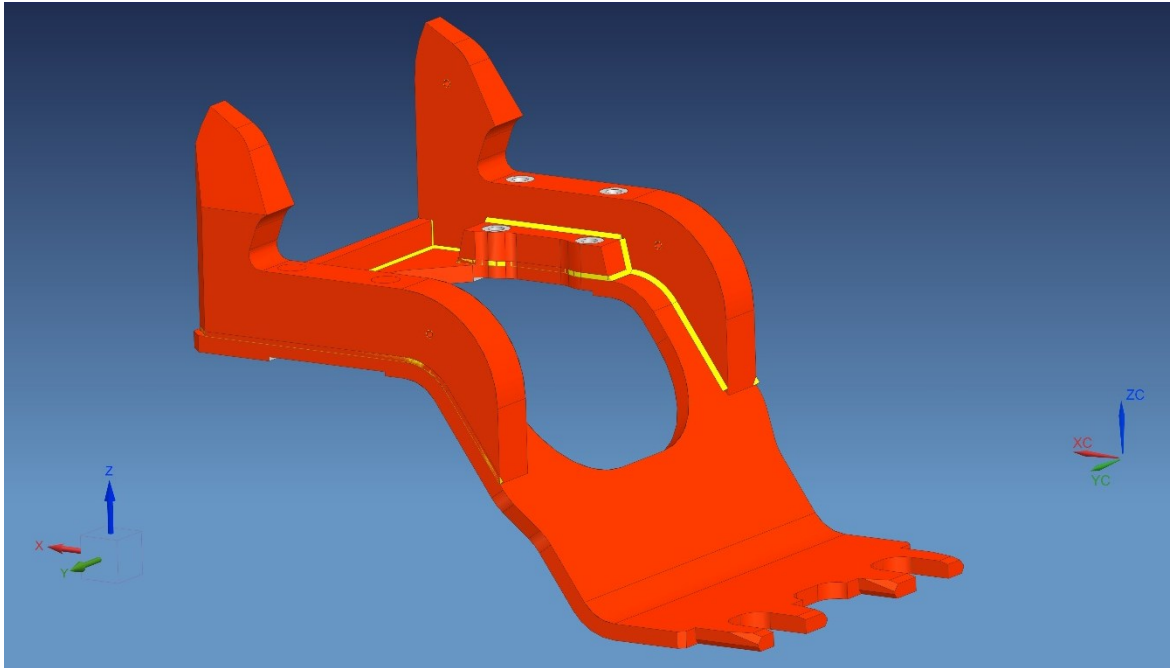
Kun hitsattavat liitokset, hitsausprosessi, hitsausjärjestys ja asennusjärjestys oli päätetty, ei robottiohjelman viimeistelyssä tarvittu enää muuta tietoa 3D-mallista tai valmistuspiirustuksista. Hitsausrobottiohjelma viimeisteltiin simulointiohjelmassa tekemällä hitsausliikkeitä robotin törmäystarkastelu ja asentokorjaukset, jonka jälkeen määritettiin tarvittavat väliliikkeet, joilla robotti siirtyi hitsiltä seuraavalle törmäämättä mihinkään. Lopuksi tarvittavat lähtötiedot hitsausrobottiohjelman tekemistä varten taulukoitiin. Tarvittavat tiedot on listattu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Tarvittavat lähtötiedot hitsausrobotiohjelman tekemistä varten.

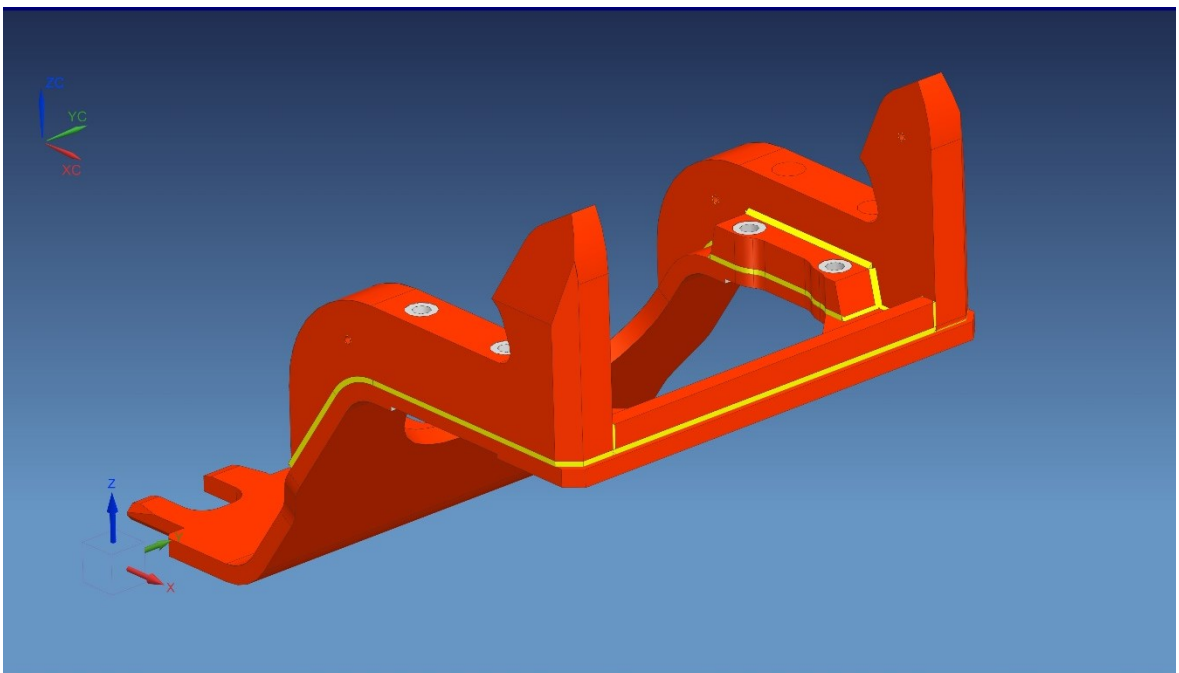
Tarvittava tieto	Tietolähde
Hitsin paikkatieto	Hitsien paikka 3D-mallissa Hitsausmerkinnät 2D-piirustuksissa
Hitsausparametrit	WPS Palkoprofiili
Osien asennusjärjestys	Tuotannon valmistusohjeet Simulointi Yritys ja erehdys
Hitsausjärjestys	Tuotannon valmistusohjeet Hiljainen tieto
Lisähuomiot, kuten pinnan viimeistely, esikuumennus	2D-piirustukset PMI-merkinnät

5.2 Hitsien mallintaminen Weld Assistant -työkalulla

Työn kokeellisen osuuden toisessa vaiheessa Weld Assistant -työkalulla luotiin hitsejä las-tauskoneen eturungon osahitsauskokoontalon 3D-malliin. 3D-mallista poistettiin ensin näkyvistä Kuvassa 16. keltaisella erottuvien hitsien tiellä olevia osia, jotka joudutaan liittämään vasta myöhemmissä työvaiheissa. Tämän jälkeen kappaleen 2D-piirustuksista ja valmistuskuvista katsottiin kappaleeseen tulevien hitsien paikat, A-mitat, liitosmuodot ja railotyypit. Näiden tietojen perusteella pystyttiin työkalua hyödyntämällä mallintaa tarvittavat hitsit suoraan 3D-malliin. Mallinnetut hitsit voitiin myös valita, ja niihin onnistuttiin lisäämään PMI-merkintöjä, kuten hitsin a-mitta. Työkalulla oli mahdollisuus valita eri liitosmuotoja ja railotyyppisiä hyvin monipuolisesti. Lyhyen opettelun jälkeen hitsien mallintaminen onnistuikin melko helposti. Lisäksi mallinnetut hitsit tulivat hyvin havainnollistetusti esiin keltaisen värin ja konkreettisen 3D-mallin ansiosta. Työkalulla onnistuttiin myös muokkaamaan 3D-malliin tarvittavien hitsausrailojen viisteet, joita ei esimerkiksi käytettyyn runkorakenteeseen ollut vielä tässä vaiheessa mallinnettu. Kuvissa 16 ja 17 on esitetty kokeellisessa osuudessa Weld Assistant -työkalulla mallinnettuja hitsejä kaivoskoneen osahitsauskokoontalon 3D-mallissa.



Kuva 10. Weld Assistant-työkalulla mallinnettuja hitsejä lastauskoneen eturungon osahit-sauskokoontuksessa.



Kuva 11. Weld Assistant-työkalulla mallinnettuja hitsejä lastauskoneen eturungon osahit-sauskokoontuksessa.

5.3 Hitsien mallintaminen Structure Welding -työkalulla

Samoja, jo Weld Assistant -työkalulla mallinnettuja hitsejä, yritettiin mallintaa käyttäen Structure Welding -työkalua. Työkalun avulla hitsien mallintaminen onnistui, mutta haasteita aiheutti hitsausviisteiden luominen. Jotta Structure Weldingillä mallinnettuihin hitseihin perustuvat hitsausviisteet olisi voitu mallintaa Weld Preparation -toiminnolla, olisi liitettäviin levyihin täytynyt lisätä ”SAW_THICKNESS” -atribuuttitieto (Hagström 2019, s. 25–30). Tämä kyseinen attribuuttitieto tarkoittaa levyn paksuutta, jonka perusteella hitsausviiste muodostetaan. Kyseinen tieto täytyi lisätä manuaalisesti, sillä ohjelma ei sitä osannut mallista tulkita. Tiedon lisäämistä yritettiin jo olemassa olevaan varsinaisen tuotantokoneen 3D-malliin, sekä puhtaalta pöydältä luotuihin kahteen 40 mm paksuun levynpalaseen, tässä kuitenkin onnistumatta. Atribuuttitietoa yritettiin lisätä kappaleisiin pitkään, siinä kuitenkin onnistumatta. Tästä syystä kokeessa ei onnistuttu mallintamaan hitsausviisteitä perustuen Structure Welding -työkalulla mallinnettuihin hitseihin. Structure Weldingillä voitiin kuitenkin mallintaa hitsit jo aikaisemmin Weld Assistantilla tehtyihin hitsausviisteisiin. Näin ongelma pystyttiin kokeessa osittain kiertämään. Structure Weldingillä voitiin määrittää Weld Assistantia monipuolisemmin erilaisia tuotteen valmistustiedon parametreja. Hitseille oli myös mahdollista määrittää lisätietoja, joiden kautta malliin voitiin lisätä muutakin tietoa kuin NX-ohjelmiston ehdottamaa. Esimerkiksi haluttu hitsausasento, hitsin a-mitta sekä käytettävä hitsausohje tai VC:ssä käytettävä palkoprofiili voitiin määrittää. Myös railonmuoto voitiin lisätä erillisenä attribuuttina.

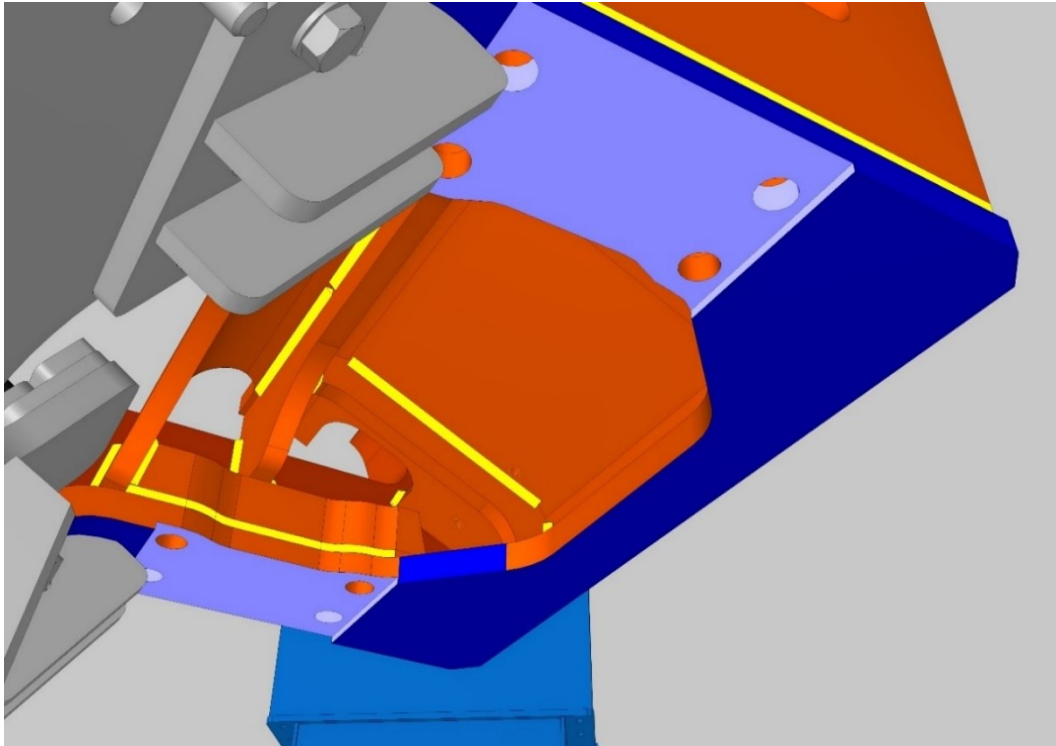
5.4 Weld Assistantilla mallinnettujen hitsien vieminen Visual Components Robotics OLP-ohjelmistoon

Kokeellisen osuuden viimeisessä vaiheessa Weld Assistant ja Structure Welding - työkaluilla mallinnettuja hitsejä yritettiin viedä suoraan hitsaussolun simulointimalliin. Weld Assistantilla tehty hitsi oli mahdollista viedä ulos NX CAD ohjelmistosta ainoastaan 3D-mallina tai CSV-tiedostona. 3D-malli mahdollisti hitsien havainnollistamisen simulointiympäristössä, mutta hitsien perusteella luotu CSV-tiedosto ei tarjonnut tarpeeksi tietoa varsinaisten hitsausratojen automaattista paikoitusta ja lukemista varten. Tästä syystä Weld

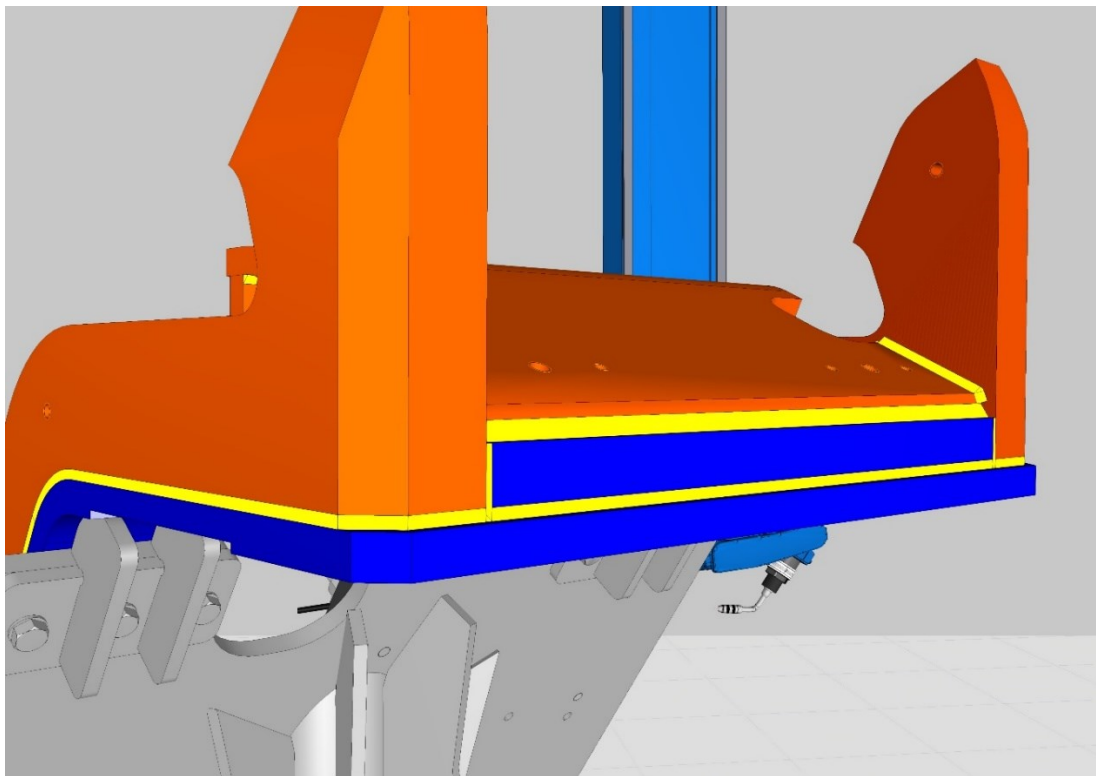
Assistentilla luotujen hitsien perusteella ei VC-ohjelmistossa voitu automaattisesti generoida varsinaisia hitsausratoja tai käskyjä.

Weld Assistentilla tehdyt ja NX:stä viedyt hitsien 3D-mallit pystyttiin kuitenkin onnistuneesti tuomaan hitsaussolun simulointimalliin. Simulointimalliin tuotuja hitsejä on esitelty Kuvissa 18 ja 19. Tuodut hitsit myös näkyvät erillisenä rivinä simulointimallin rakennepuussa. Jotta jokainen erillinen hitsi näkyisi omalla rivillään, täytyi hitsit tuoda malliin yksi kerrallaan. Kokeessa kuitenkin havaittiin, että ainoastaan yhdellä rivillä oleva hitsi on simulointimallin käyttämisen kannalta helpompi. Rakennepuuta on havainnollistettu Kuvassa 20. Rakennepuun kautta voitiin hitsejä tai 3D-mallin osia tarvittaessa piilottaa näkyvistä. Kun keltainen hitsin 3D-malli piilotettiin näkyvistä, jäi varsinainen hitsausviiste kuitenkin edelleen näkyviin, jolloin se voitiin valita hitsattavaksi. Kuvissa 21 ja 22 on kuvattu 3D-mallia, josta hitsit on rakennepuusta piilotettu.

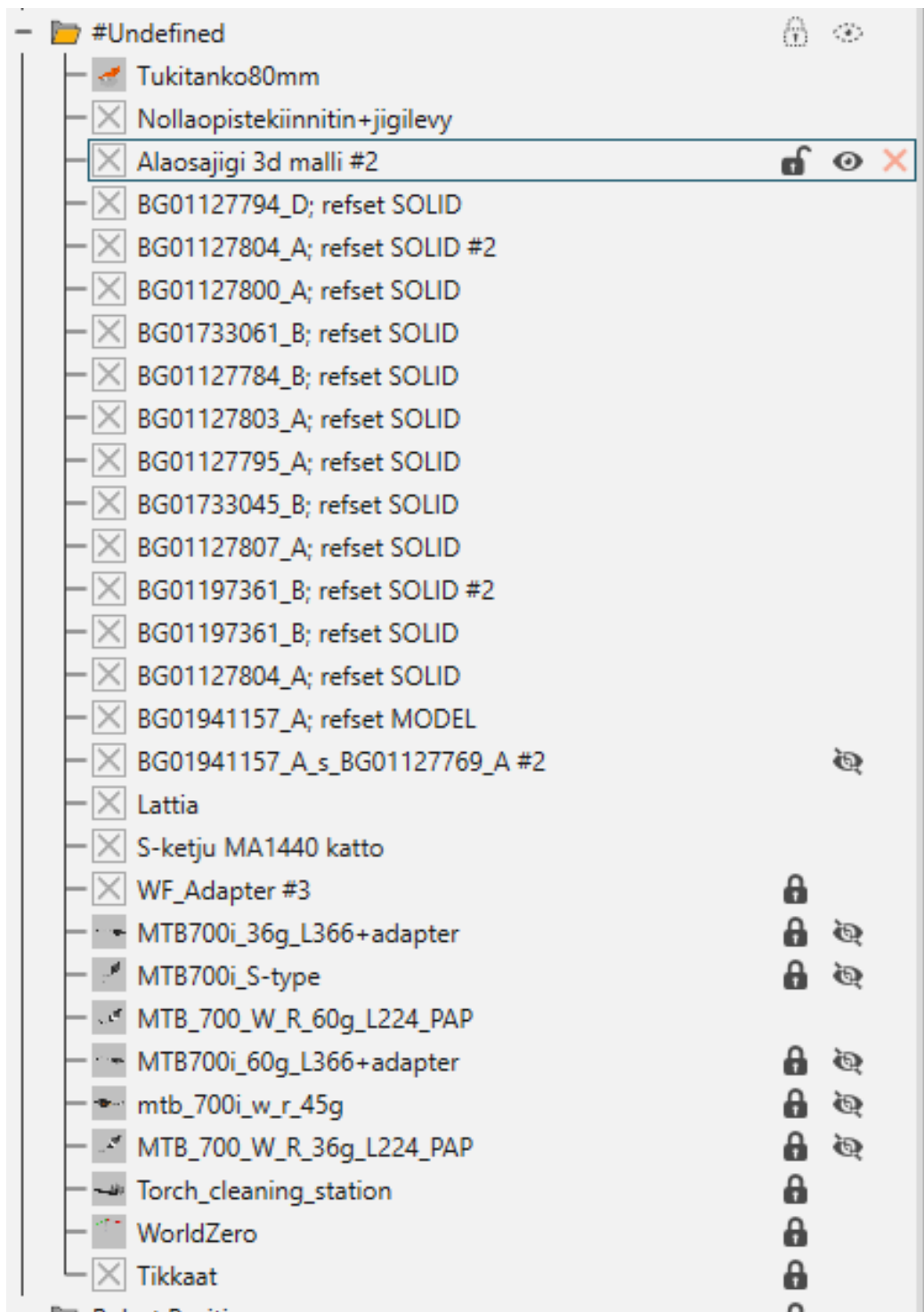
Varsinaisen hitsausohjelman automaattisessa generoinnissa ei pelkällä Weld Assistent -työkalulla onnistuttu. Hitsausohjelman tekoa voitiin työkalulla kuitenkin helpottaa, koska 3D-malliin tuoduista hitseistä oli manuaalisesti mahdollista lukea kaikki hitsausrobotiohjelman tekemisessä tarvittavat tiedot. Mallista voitiin suoraan havainnoida, mihin hitsejä tulee simulointimallissa sijoittaa. Malliin lisätyistä hitsimerkinnöistä voitiin lukea hitsin a-mitta, sekä mahdolliset lisämerkinnät kuten esikuumennuksen tarve tai hiontavaatimukset. Malliin lisätyn tiedon perusteella ohjelmoija kykeni valitsemaan oikean hitsausohjeen ja palkoprofiilin. Varsinainen hitsausohjeen numero oli tarvittaessa myös mahdollista lisätä hitsin PMI-merkintään.



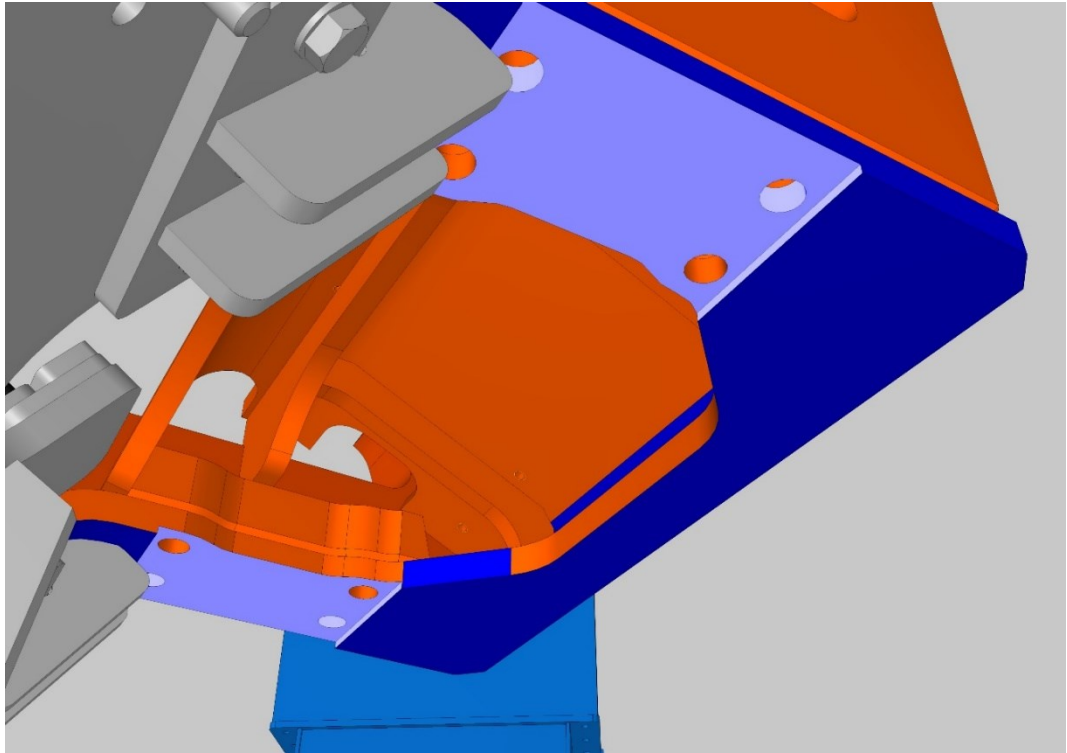
Kuva 12. Weld Assistant -työkalulla luotuja hitsejä vietynä Visual Components Robotics OLP -simulointiohjelmaan.



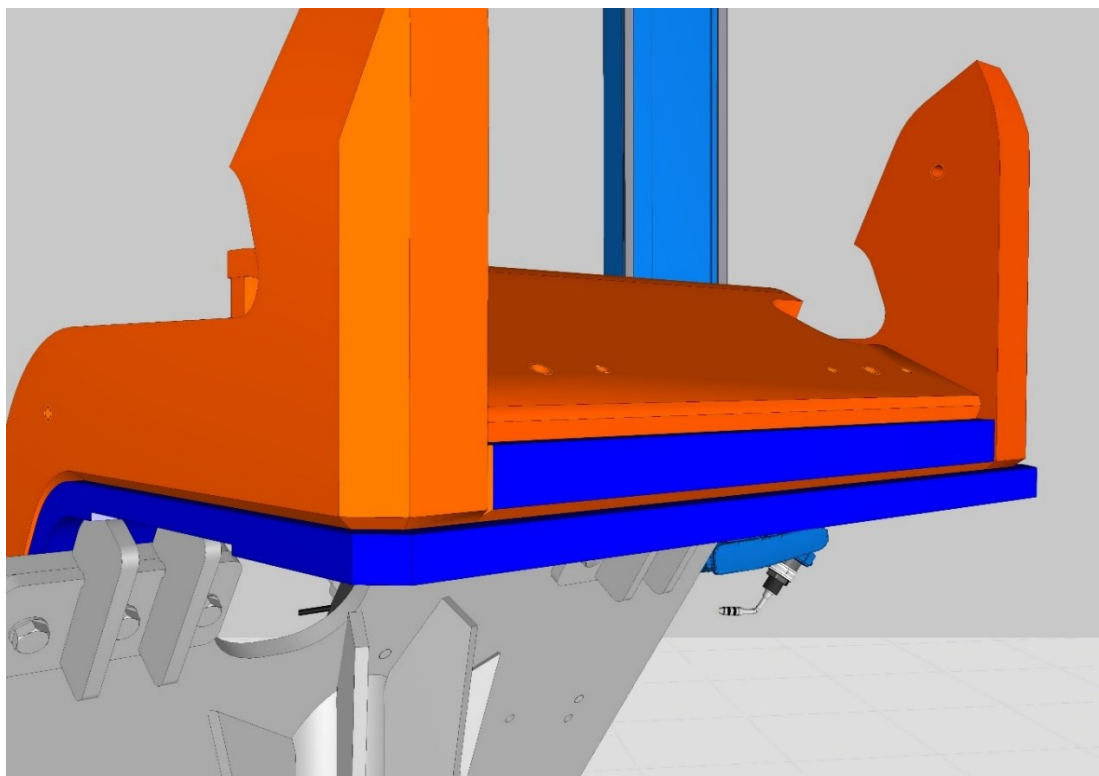
Kuva 13. Weld Assistant -työkalulla luotuja hitsejä vietynä Visual Components Robotics OLP -simulointiohjelmaan.



Kuva 14. Simulointimallin rakennepuu, josta voidaan tarvittaessa piilottaa näkyvistä haluttuja komponentteja, kuten hitsejä.



Kuva 15. Weld Assistantilla luotu hitsi tuotuna Visual Components Robotics OLP -ohjelmistoon. Hitsit piilotettu ja viisteet näkyvissä.



Kuva 16. Weld Assistantilla luotu hitsi tuotuna Visual Components Robotics OLP -ohjelmistoon. Hitsit piilotettu ja viisteet näkyvissä.

5.5 Structure Weldingillä luotujen hitsien vieminen Visual Components Robotics OLP -ohjelmistoon

Kuten kappaleessa 5.3 todettiin, Structure Weldingillä luotujen hitsien hitsausviisteitä ei onnistuttu työkalulla mallintamaan. Varsinaisten hitsien mallintamisessa kuitenkin onnistuttiin, joten niitä yritettiin viedä NX:stä suoraan hitsaussolun simulointimalliin. Hitsit voitiin Weld Assistantista poiketen viedä NX:stä XML-muodossa. Tässä muodossa viedyt hitsit sisälsivät paljon enemmän tietoa hitseistä, kuten hitsien paikkatiedon ja erikseen lisätyt attribuuttitiedot. VC-ohjelmistossa oli tämän muotoisia tiedostoja varten tuontitoiminto, joka ei kuitenkaan aluksi tukenut NX:llä tehtyjä XML tiedostoja. VC-ohjelmiston edustajalta saatiin kuitenkin tähän kokeelliseen osuuteen tukea XML-tiedoston hyödyntämisessä. Visual Components toimitti VC-ohjelmistoon erillisen laajennuksen, jolla pystyttiin lukemaan NX:llä luotuja XML-tiedostoja.

Laajennuksen avulla Structure Weldingillä mallinnetut ja XML-muodossa viedyt hitsit pystyttiin tuomaan hitsaussolun simulointimalliin. Visual Components Robotics OLP-ohjelmisto tunnisti XML-tiedostosta mallinnetut hitsit automaattisesti ja loi niiden perusteella haluttuihin kohteisiin hitsausradat. Hitsausliikkeen lisäksi ohjelmisto mallinsi myös automaattisesti lähestymis- ja poistumisliikkeet XML-tiedosta luettu ja automaattisesti generoitu hitsi on esitetty kuvassa 14. Laajennus ei vielä tässä vaiheessa osannut lukea XML-tiedostosta muuta tietoa kuin sen, missä hitsit sijaitsevat ja mikä niiden orientaatio on. Hitsien tuomista jouduttiin yrittämään useita kertoja, sillä hitsit olivat simulointimallissa usein väärin orientoituneita. Kun Structure Weldingissä valittiin hitsausratojen origoksi sama origo kuin varsinaisella työkappaleella, tulivat hitsit oikeassa asennossa simulointimalliin.

Kokeessa sonnistuttiin luomaan automaattisesti hitsauskäskyjä Structure Weldingillä mallinnetun hitsin, sekä sen avulla luodun XML-tiedoston perusteella. XML-tiedostoon oli mahdollista sisällyttää myös attribuuttitietoja, jolloin niitä voisi teoriassa hyödyntää. XML-tiedostoon voitiin siis lisätä tietoja esimerkiksi hitsausviisteestä, käytettävästä hitsausohjeesta tai hitsin A-mitasta. Myös vaikkapa hitsausjärjestystä kuvaava numerotieto voitiin liittää XML-tiedostoon. Hitsausohjeen numeron perusteella on mahdollista määrittää käytettävä muistipaikka ja palkoprofiili, jolloin OLP-ohjelmisto kykenisi määrittämään myös halutut hitsausparametrit kuten hitsausjobin, kuljetusnopeuden ja poltinkulmat. Tätä koetta tehtäessä laajennus ei kuitenkaan ollut vielä sillä tasolla, että se olisi tähän onnistuneesti kyennyt.

Kun hitsausradat oli määritetty, suoritettiin simulointimallissa törmäystarkastelu. Törmäystarkastelussa havaitut virheet onnistuttiin korjaamaan käyttäen OLP-ohjelmiston autosolver-toimintoa. Näin pystyttiin lähes automatisoidusti luomaan ehjä ja käyttökelpoinen hitsausrobottiohjelma, jossa ei kuitenkaan vielä ollut määritettynä yksilöityjä hitsausparametreja. Toisaalta käytettävät hitsausparametrit voivat olla kaikille hitseille vakiot, jolloin tämäkin ongelma olisi ratkaistu.

6 Tulokset ja analyysi

Vertailtaessa Weld Assistantilla tehtyjä hitsejä, ja kappaleessa 5.1 määritettyä listaa hitsausrobotiohjelmoinnissa tarvittavista lähtötiedoista, voidaan todeta, että Weld Assistant -työkalulla on mahdollista lisätä 3D-malliin kaikki hitsausrobotiohjelman manuaalisessa teossa tarvittavat tiedot. Hitsien paikkatiedot saadaan visuaalisesti katsomalla 3D-mallia, jossa keltaisella merkatut hitsit kertovat kohdat joihin simulointimallissa tarvitsee määrittää hitsausliike. Hitsin a-mitta sekä railomuoto voidaan lukea PMI-merkinnästä, joka tosin täytyy erikseen merkitä malliin. Toisaalta kaikkien hitsien PMI-tiedot voi merkitä malliin samalla kertaa valitsemalla kaikki halutut hitsit. PMI-merkintään on myös mahdollista lisätä käytettävä hitsausohje, jonka perusteella varsinaiset hitsausparametrit voidaan helposti määrittää.

Ohjelman tekijä voi myös tilanteen perusteella valita itse oikean hitsausohjeen. Hitsausasento ja poltinkulmat voidaan päättää vielä tarkemmin simulointivaiheessa, kun törmäystarkastelu päästään tekemään. Lisäksi hitsausjärjestyksen voi tarvittaessa ilmaista PMI-merkinnöillä, mutta sen voi jättää myös ohjelman tekijän päätettäväksi. Näiden tietojen perusteella Visual Components Robotics OLP -ohjelmistossa voidaan tarvittaessa luoda koko kaiskoneen valmistuksessa käytettävä hitsausrobotiohjelma alusta loppuun ilman, että tarvittaisiin 2D-mallia ja erillisiä valmistuspiirustuksia. Weld Assistantilla luoduista hitseistä saadun tiedon perusteella ei kuitenkaan pystytty täysin automatisoimaan hitsausrobotiohjelman tekoa. Tämä johtui siitä, ettei työkalulla luotuja hitsejä saatu vietyä XML-tiedostomuotoon, eivätkä CSV-muodossa viedyt hitsit sisältäneet riittävästi dataa hitsausratojen automaattista generoimista varten.

Yhteenvetona voidaan todeta, että Weld Assistantilla luodut hitsit helpottavat merkittävästi robotiohjelman tekijän työtä. Virheen mahdollisuus pienenee, sillä 3D-mallista on helpompi lukea oikeat hitsimerkinnot kuin 2D-piirustuksista. Hitsit sisältävän 3D-mallin perusteella on myös entistä helpompi luoda mahdollisia työohjeita tuotantoa varten.

Vertailtaessa Structure Weldingillä tehtyjä hitsejä, ja kappaleessa 5.1 määritettyä listaa hitsausrobotiohjelmoinnissa tarvittavista lähtötiedoista, voidaan todeta, että Structure Welding

-työkalulla on mahdollista lisätä 3D-malliin kaikki hitsausrobotiohjelman automaattisessa generoinnissa tarvittavat tiedot. Työkalulla mallinnettuja hitsejä onnistuttiin tuomaan suoraan varsinaiseen simulointimalliin, ja niiden perusteella kyettiin muodostamaan hitsausrajoja. Nykyisellään simulointimallin laajennus ei kuitenkaan vielä osannut tunnistaa hitsausohjetta, eikä siten osannut valita tarvittavia hitsausparametreja tai monipalkohitsauksessa käytettyä palkokarttaa. Hitseistä muodostettuun XML-tiedostoon on kuitenkin mahdollista lisätä kaikki tarvittavat tiedot, joiden avulla laajennusta voidaan tulevaisuudessa muokata tunnistamaan myös käytettävät hitsausparametrit. Simulointiohjelman autosolver-työkalulla voidaan myös ratkaista törmäystarkastelussa ilmenneet ongelmat automaattisesti. Structure Weldingillä mallinnettujen hitsien viisteitä ei kuitenkaan onnistuttu generoimaan onnistuneesti. Tämän tiedetään kuitenkin olevan mahdollista, ja ongelman ratkaisu vaatii yhteyden ottamista Siemensin tekniseen tukeen. Structure Weldingillä mallinnetut hitsit ja niistä syntyneet punaiset viivat eivät osoittautuneet yhtä havainnollistaviksi kuin Weld Assistantilla tehdyt keltaiset kiinteät hitsit. Jotta punaiset viivat saataisiin paremmin näkyviin, tulisi 3D-mallin väriä muuttaa valmiin koneen oranssista paremmin punaisesta erottuvan väriksi.

Yhteenvedona voidaan todeta, että Structure Weldingillä mallinnettujen hitsien avulla ja simulointimallin autosolver-toimintoa hyödyntämällä on teoriassa mahdollista automatisoida koko hitsausrobotiohjelman tekeminen. Tämä kuitenkin edellyttää simulointiohjelman laajennuksen jatkokehitystä ja 3D-malliin lisättyjen hitsien oikeellisuutta. Erityisesti monipalkohitsauksessa vaadittavien palkokarttojen ja oikean hitsausjärjestyksen valinta vaatii hitsit mallintavalta suunnittelijalta myös tuotannollista ammattitaitoa. Hitsien automaattinen generoituminen voi vähentää inhimillisen virheen mahdollisuutta, mutta prosessi täytyy sitä ennen rakentaa ja todeta toimivaksi.

7 Pohdinta

Sekä Weld Assistant, että Structure Welding ovat molemmat tuotannon sekä robottiohjelmoijan työtä helpottavia työkaluja. Molempia työkaluja käyttämällä voidaan päästä tilanteeseen, jossa hitsausrobottiohjelman luominen onnistuu ilman 2D-piirustuksien käyttöä. Lisäksi hitsin muokkaamisen mukana päivittyvät hitsausmerkinnät vähentävät virheen mahdollisuutta, etenkin jos 2D-kuvia ja hitsausmerkintöjä tekee joku muu kuin rakenteen alun perin suunnitellut suunnittelija.

Weld Assistantin parhaana puolena on, että se visualisoi konkreettisesti hitsit suunnittelu- vaiheessa. Näin kyettäisiin arvioimaan paremmin hitsien luoksepäästävyyttä, tarpeellisuutta ja hitsausjärjestystä. Tämä saattaisi vähentää virheitä hitsausmerkinnöissä, ja helpottaa hitsien sekä varsinaisten runkorakenteiden suunnittelua. Kiinteä hitsi myös mahdollistaisi ongelmakohteiden paremman havaitsemisen, esimerkiksi liian lähellä hitsiä olevat reiät.

Structure Welding on havainnollistavana työkaluna huonompi kuin Weld Assistant, sillä punaisia viivoja on vaikea erottaa 3D-mallista. Sen avulla tuotteen robottihitsausohjelman automatisointi on kuitenkin teoriassa täysin mahdollista. Mikäli robottiohjelman tekeminen onnistuttaisiin täysin automatisoimaan, nopeuttaisi se robottiohjelmoijan työtä merkittävästi. Myöskään robottiohjelmoijan ohjelmointitaidon säilyminen olisi niin suuri ongelma kuin nykyisin. Kokemukseen perustuen robottiohjelmiä joudutaan kuitenkin usein muokkaamaan vielä robotilla ohjelmaa sisäänajettaessa. Tästä syystä ohjelman käyttöönotossa tarvittaisiin yhä riittävää ammattitaitoa. Voidaankin todeta, että robottiohjelmoinnin automatisointi vaatii suunnittelijalta samaa ammattitaitoa kuin robottiohjelman tekijältä tai tuotannon robottihitsaajalta.

Mikäli robottiohjelmiä alettaisiin tekemään Structure Weldingillä luotujen hitsien perusteella automaattisesti, vaatisi se tuotannossa ja robottiohjelmoinnissa tarvittavan ammattitaidon siirtämistä varsinaiseen suunnitteluun. Tämä johtuu siitä, että hitsejä mallintavan suunnittelijan täytyy tietää tai päättää mahdollinen hitsausjärjestys, sekä määritellä käytettävä hitsausohje.

Molempien työkalujen avulla on mahdollista tehdä aiempaa helpommin robotin törmäystarkasteluja. Erityisesti Structure Weldingillä tehdyistä hitseistä saadaan nopeasti palaute simulointiohjelmasta, sillä haluttuja hitsejä ei tarvitse erikseen valita. Simulointiohjelma kertoo hitseihin käytetyn ajan, sekä mahdolliset robotin törmäykset. Mikäli robottiohjelmoija tai simulointimallin autosolver-työkalu eivät kykene ratkaisemaan havaittuja törmäyksiä, voidaan todeta, että runkorakenne ei ole hitsattavissa robotilla. Näin rakennetta voitaisiin muuttaa ajoissa, jotta lopullinen rakenne olisi robottihitsattavissa. Simulointimallista voidaan esimerkiksi analysoida, kuinka paljon jotakin tiettyä aukkoa täytyy suurentaa, tai kahta levyä erottaa toisistaan, jotta yksittäisten hitsien luokse päästävyys paranisi riittävästi.

Weld Assistantin parhaana puolena on hitsien havainnollistaminen, kun taas Structure Weldingistä saatava tieto on käyttökelpoisempaa simulointimallin ja robottiohjelmoinnin automatisoinnin kannalta. Jotta molempien työkalujen parhaat puolet saataisiin hyödynnettyä, voisi työkaluja alkaa käyttämään ristiin. Mikäli Structure Weldingillä onnistutaan jatkossa mallintamaan myös hitsausviisteet, voisi Weld Assistantilla melko helposti täyttää halutut viisteet ja visualisoida hitsit. Näin 3D-malliin lisätyt hitsit konkretisoituisivat suunnitteluvaiheessa, mutta Structure Weldingillä tehdyt hitsit mahdollistaisivat hitsaustiedon paremman hyödyntämisen robottiohjelmoinnissa.

Structure Weldingillä mallinnettujen hitsien perusteella täysin automatisoitu robottiohjelmointi on siis teoriassa mahdollista, mutta vaatii käytännössä merkittävän määrän työtä niin suunnittelijoilta kuin tuotannoltakin. Jotta toimintatapa saataisiin käyttöön, vaatii se ensimmäisenä Visual Components Robotics OLP:n laajennuksen jatkokehittelyä, jotta ohjelmisto osaa lukea hitsin mukana tulevan hitsausohjeen tai palkoprofiilin ja luoda sen perusteella oikeanlaiset hitsausparametrit. Lisäksi hitsattavien tuotteiden monimutkaisuus asettaa omat haasteensa automatisoinnille. Mitä enemmän hitsattavassa rakenteessa on erilaisia erityispiirteitä, hitsausasentoja ja liitoksia, sitä suurempi määrä on hitsausohjeita ja parametreja, joita täytyy osata malliin merkitä. Lisäksi aiemmin mainittu hitsausjärjestys pitää osata määrittää.

Tulevaisuuden toimintamallissa hitsausohjelma voitaisiin tehdä osin automatisoidusti suunnitellun runkorakenteen ja mallinnettujen hitsien perusteella. Tämän automatisoidusti tehdyn ohjelman perusteella saataisiin palaute tarvittavista muutoksista. Kun tarvittavat

korjaukset on tehty, voitaisiin tehdä lopullinen robottiohjelma. Tätä lopullista robottiohjelmaa voitaisiin lopuksi muokata manuaalisesti paremmin käytäntöä ja todellisuutta vastaavaksi. Näin prosessista saadun palautteen perusteella osattaisiin suunnitella valmistettavia osia, jolloin myös robottiohjelmoijan ja tuotannon työ helpottuisi. Simulointimallista saataisiin palaute myös koko runkorakenteen valmistamiseen kuluva hitsausajasta. Lisäksi NX:stä on mahdollista saada tietoa esimerkiksi hitsien määrästä, tilavuudesta ja kokonaispituudesta.

Nopeasti käyttöön otettava toimintamalli olisi alkaa hyödyntämään pelkästään Welding Assistantia. Tässä toimintamallissa Welding Assistantilla luotaisiin hitsit ja PMI-merkinnät, sekä hitsausviisteet. Robottiohjelmoija toisi viisteet ja hitsit sisältävän 3D-mallin simulointiohjelmaan. Tämän jälkeen jokainen hitsi määritettäisiin manuaalisesti siten, että PMI-merkinnän perusteella valittaisiin haluttu hitsausohje, ja hitsin 3D-mallin perusteella haluttu hitsin paikka. Hitsausjärjestys ja robotin liikeratojen määrittäminen tapahtuisi myös manuaalisesti, sekä autosolveria hyödyntämällä. Yksittäisten hitsien luokse päästävyyttä voitaisiin myös arvioida melko nopeasti, mikäli kaikkien runkorakenteeseen tulevien hitsien sijaan arvioidaan vain kaikista hankalimmat paikat. Lisäksi Weld Assistantilla mallinnetut hitsit antaisivat saman tien suunnittelijalle palautetta hitsin konkreettisesta ulkonäöstä ja järkevyydestä.

8 Johtopäätökset

Työn perusteella voidaan todeta, että Structure Welding työkalulla on mahdollista mallintaa hitsit maanalaisen kaivoskoneen runkorakenteeseen siten, että koko hitsausrobottiohjelman automatisointi on teoriassa mahdollista. Täydellisesti toimiva prosessi vaatii kuitenkin jatkokehittelyä Visual Components Robotics OLP-ohjelmiston laajennuksen osalta, sekä hitsausohjeiden ja valmistusmenetelmien nykyistä parempaa standardisoimista Sandvikin Turun tehtaalla. Myös tuotannon ja robottiohjelmoijan ammattitaitoa täytyy saada siirrettyä suunnittelun puolelle. Käytännössä aikaisemmin robottiohjelman tekemisessä tarvittavia päätöksiä siirtyy tehtäväksi jo suunnitteluvaiheeseen. Robottiohjelmoinnin automatisointi on kuitenkin kehityssuunta, johon tulevaisuudessa ollaan varmasti menossa muissakin yrityksissä. Mikäli prosessi saadaan toimivaksi, voi se lisätä merkittävästi uusien tuotteiden tuotannollistamisen tehokkuutta. Automatisoitu prosessi on erityisen käyttökelpoinen kaivoskoneita yksinkertaisempien osien robotisoinnissa, jotka eivät vaadi niin suuria muokkauksia vakioituihin säätöihin, kuten palkoprofiileihin.

Weld Assistantilla mallinnettujen hitsien käyttäminen robottiohjelmoinnin sujuvoittamisessa ja suunniteltujen hitsien konkretisoimisessa 3D-malliin olisi nopeampi ja helpompi tapa ottaa käyttöön. Weld Assistantilla luotuja hitsejä ei kuitenkaan pystytä nykyisellään hyödyntämään koko prosessin automatisoinnissa, joten tässä toimintamallissa ei ole niin paljon potentiaalia tulevaisuuden kannalta kuin Structure Weldingissä.

Molempien työkalujen hyödyt saataisiin parhaiten käyttöön, mikäli hitsit mallinnettaisiin molemmilla työkaluilla. Weld Assistant visualisoisi hitsit ja Structure Welding mahdollistaisi automatisoinnin. Tämä kuitenkin lisäisi ainakin aluksi suunnitteluvaiheen työkuormaa mallinnuksen osalta. Lisäksi suunnitteluprosessi vaatisi nykyistä enemmän tuotannollista ja hitsausteknistä tietotaitoa.

Työn tutkimuskysymyksiin saatiin käyttökelpoisia vastauksia työn edetessä. Yhtenä tutkimuskysymyksenä oli, millaista hitsaustietoa uusien tuotantoon tulevien konemallien 3D-malleihin voisi tai kannattaisi lisätä. Työssä todettiin, että uusien konemallien

tuotannollistamisvaiheessa ja hitsausrobotiohjelmoinnissa tarvitaan tietoja sekä 3D-mallista, että 2D-valmistuspiirustuksista. Kaikki robotiohjelmoinnissa tarvittavat 2D-valmistuspiirustuksista saatavat tiedot on mahdollista lisätä 3D-malliin käyttäen NX:stä löytyviä työkaluja. Tällaisia tietoja ovat ainakin hitsien paikkatieto, a-mitta, käytettävä palkoprofiili, hitsausohjeen numero, osien asennusjärjestys, hitsausjärjestys sekä tarvittavat lisähuomiot kuten pinnanlaatuvaatimukset.

Yhtenä tutkimuskysymyksenä oli, miten hitsaustietoa voitaisiin hyödyntää koneiden runkorakenteiden valmistamiseen käytettävien hitsausrobottien ohjelmien teossa. Työssä lisättiin 3D-malleihin tietoa eri työkaluilla, mutta erityisesti hitsin palkoprofiilin, sekä hitsien paikkatietojen lisäämisestä todettiin olevan suurin hyöty. Palkoprofiilin perusteella voidaan määrittää kussakin hitsissä käytettävät hitsausparametrit, sekä monipalkohitsauksessa täyttö- ja pintapalkojen sijainti juuripalkoon nähden. Hitsien paikkatieto mahdollistaa teoriassa hitsausrobotin ohjelmoinnin automatisoinnin, jolloin robotiohjelmointi nopeutuisi huomattavasti. Myös pelkästä visuaalisesta hitsien mallintamisesta todettiin olevan hyötyä robotiohjelman teossa, sillä 3D-mallinnettujen hitsien perusteella voidaan valita liitettävät osat ja hitsien paikat katsomatta 2D-valmistuspiirustuksia. 3D-mallinnetut hitsit todettiin perinteisiä hitsausmerkintöjä havainnollistavammaksi tavaksi kuvata hitsejä.

Yhtenä tutkimuskysymyksenä työssä oli, miten suunnittelijat voisivat saada nykyistä enemmän kappaleen valmistettavuuteen liittyvää tietoa jo ennen fyysisten komponenttien valmistamista. Työssä todettiin, että kappaleen hitsauksen simulointi esimerkiksi Visual Components Robotics OLP-ohjelmistolla antaa suunnittelijoille konkreettista tietoa kappaleen valmistettavuudesta. Kun robotiohjelma tehdään etäohjelmointiohjelmistolla tai simulointiympäristössä, voidaan saada tietoa lopputuotteen hitsattavuudesta ja hitsien luoksepäästävyydestä jo ennen lopputuotteen valmistusta. Simulointimallin avulla voidaan todentaa mahdollisten hitsauskiinnittimien toimivuus, tai suunnitella uusi kiinnitin valmiiksi. Valmiin robotiohjelman tekeminen on kuitenkin aikaa vievä prosessi, mikäli hitsattava kappale on monimutkainen ja sisältää paljon hitsattavaa. Varsinaisen palautteen antaminen ja hitsattavuuden todentaminen voi siis viedä jonkin verran aikaa. Hitsausrobotin ohjelmoinnin automatisoiminen nopeuttaisi huomattavasti palautteen antamiseen kuluvaan aikaan. Tällöin samassa ajassa voitaisiin tarkastella enemmän vaihtoehtoja nykyistä vaivattomammin.

Tämä työ keskittyi 3D-malliin lisättyyn hitsaustietoon painottuen tuotannon näkökulmaan. Työn ensisijainen tavoite oli selvittää 3D-malleihin lisätyn hitsaustiedon hyödyntämistä Sandvikin Turun tehtaan hitsausprosesseissa. Työ saavutti tavoitteensa, sillä tutkimuskysymyksiin vastaamalla hitsaustiedon hyödyntämistä onnistuttiin arvioimaan. Työn pohjalta avautui mahdollisuus myös jatkotutkimuksille, joissa tarkasteltaisiin hitsaustiedon lisäämiseen käytettävien työkalujen mahdollisuuksia suunnittelun näkökulmasta. Suunnittelun näkökulman tutkiminen olisi tärkeää, sillä tuotannolle hyödyllisten tietojen lisääminen 3D-malliin voisi auttaa merkittävästi myös hitsattavien osien suunnitteluprosessissa. Tietojen lisäämisellä voi kuitenkin olla myös erityisen kuormittava vaikutus suunnitteluprosessiin, joten suunnittelu- ja tuotantoprosessin kuormitusta olisi tärkeää tarkastella kokonaisvaltaisesti.

Lähteet

- Hagström P 2019. Hitsatun Rakenteen Suunnittelu Siemens Nx:llä. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. Turku. S. 25–30.
- Kah P, Shrestha M, Hiltunen E ja Martikainen J. 2015. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 10: 1. S. 3–5.
- Kumar, D. 2022. *Mechanical Engineering and Mechatronics Handbook*. 1.painos. Dulles, Virginia, USA: Mercury Learning and Information. 551 s.
- Lukkari, J. 2011. Hitsaustalous ja tuottavuus. *Hitsaustekniikka*. Vol. 63:3. S. 11–14.
- Lukkari, J. 1997. *Hitsaustekniikka, perusteet ja kaarihitsaus*. 4. painos. Helsinki, Suomi: Edita Prima Oy. 292 s.
- Paramet Konepaja Oy. 2023. [Koneuuttelo, kotisivut]. [Viitattu 30.6.2023]. Saatavissa: <https://www.paramet.fi/fi/koneuuttelo>.
- Pere A. 2001. *Koneenpiirustus ammattikorkeakouluja varten*. 1. painos. Espoo, Suomi: Kirpe Oy. 284 s.
- Rivera L.F., Jimenez M., Villegas N., Tamura G. ja Muller H.A. 2022. The Forging of Autonomous and Cooperating Digital Twins. *IEEE Internet Computing*. Vol. 26: 5. S. 41–49.
- Rout A., Deepak B.B.V.L. ja Biswal B.B. 2019. Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Vol. 56. S. 12-37.
- SFS-EN ISO 2553:2019. Hitsaus ja sen lähiprosessit. Piirustusmerkinnät. Hitsausliitokset. Helsinki: Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry. 24 s.
- Singh, R. 2020. *Applied Welding Engineering*. 3. Painos. Oxford, Iso-Britannia: Butterworth-Heinemann. 420 s.
- Vuosikertomus 2020. [Sandvikin kotisivut]. [viitattu 10.2.2023]. Saatavissa: <https://www.home.sandvik/en/investors/reports-presentations/annual-reports/>
- Välimäki K., Niemelä M. ja Ahonen T. 2023. *Teollisuuden Robotiikka*. Helsinki: Suomen Robotiikkayhdistys ry. 288 s.
- Verlag, V. 2022. 54th International Symposium on Robotics. ISR Europe 2022. Munchen, Saksa. 20-21.6.2022. S. 34–41.
- Visual components extranet. 2023. [yrityksen asiakassivuilla]. [Viitattu 08.10.2023]. Saatavissa: <https://extranet.visualcomponents.com/academy/delfoi-robotics-tutorials/delfoi-modeling-tutorials/setup-a-basic-delfoi-layout/>.

Visual components kotisivut. 2024. [Viitattu 15.2.2024]. Saatavissa <https://www.visual-components.com/about-us/>.

Weman, K. 2012. *Welding Processes Handbook*. 2. PAINOS. Cambridge, Iso-Britannia: Woodhead Publishing Limited. 266 s.

Yritysesittely. 2023. [Sandvikin www-sivuilla]. [viitattu 10.2.2023]. Saatavissa: <https://www.home.sandvik/en/about-us/sandvik-at-a-glance/>