

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Koneautomaatiotekniikka

2013

Ilpo Suominen

# HITSAUSPROSESSIN ROBOTISOINNIN KANNATTAVUUDEN ARVIONTI



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ilpo Suominen

## HITSAUSPROSESSIN ROBOTISOINNIN KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI

Tämän insinöörityön toimeksiantaja on Oy Haloila Ab. Oy Haloila Ab on maailman johtava käärintälaitteiden valmistaja. Insinöörityössäni keskityn kehittämään uuden putkirungon valmistusmenetelmää, ja arvioin olisiko valmistusmenetelmän automaatiotasoa kannattavaa kehittää. Työni tavoitteena on selvittää uuden tuotteen mahdollinen robottihitsauspotentialiaali.

Työni teoriapohja on suurelta osaa robotiikkaan ja piensarjatuotantoon perustuvaa. Piensarjatuotanto osiossa käsittelem joustavaa piensarjatuotantoa eli FM-järjestelmää. Robotiikan osalta teoreettinen pohja koostuu robottihitsauksesta, robottihitsauksen suunnittelusta, investointi-, kustannus-, ja vertailulaskelmista. Näiden laskelmien lisäksi käytin robottihitsauksen suunnittelun muistilistaa.

Yksi tämän insinöörityön suurimmista osioista oli videoavusteinen valmistusmenetelmä analyysi. Yhdistin analyysiin suunnittelu- ja tuotantohenkilöstön haastatteluja, jotka kokosin yhdeksi paketiksi. Tulevaisuuden investointien pohjaksi laskin myös investointilaskelman ja robotin ja ihmisen kustannusvertailulaskelman.

Työmenetelmien kehittämistä varten tein myös robottihitsauksen suunnittelun muistilistan, jossa perehdyin putkirungon tämän hetkiseen valmistusmenetelmään, ja pohdin olisiko putkirungon hitsaaminen tulevaisuudessa robotisoidusti kannattavaa.

Videoavusteisen valmistusmenetelmä analyysin tuloksena löytyi kehittämispotentiaalia koskien hitsaus ja kokoonpano työvaiheita.

Muistilistan tuloksina sain työ-, ja hitsausvaiheita, jotka sopisivat robotisoitaviksi ja työmenetelmään ideoita robotisoinnin toteuttamiseksi. Vertailu-, ja investointilaskelmien tuloksista sain suuntaa antavaa tietoa siitä, miten käsinhitsaus olisi korvattavissa robotilla, miten paljon robottia tulisi vuotuisesti kuormittamaan ja millainen takaisinmaksuaika investoinnilla olisi tietyillä raja-arvoilla.

Toivon näiden tulosten antavan apua työmenetelmien kehittämiseen ja päätöksentekoon robotti-investointeja tehtäessä.

ASIASANAT: Hitsausautomaatio, robottihitsaus, robotti-investointi, valmistusmenetelmän videoanalyysi

Ippo Suominen

## THE PROFITABILITY EVALUATION OF ROBOTIZING A WELDING PROCESS

The commissioner for this Bachelor's thesis is Haloila corporation. Haloila corporation is the world's leading manufacturer of automatic pallet load wrapping machines. This thesis concentrates on developing the production method of pipe frames and estimating profitability to develop the automation level of the production procedure. The priority is to examine the possible robot welding potential of the new product.

The theory part discusses mainly short-run production and robotics. In the short-run production part flexible manufacturing or FMS is presented. Concerning robotics theory robot welding, designing robot welding, investment-, expenses-, and comparison calculations are discussed. In addition to these calculations, a check list was used concerning the design of robot welding.

The largest part of the thesis work was a video-aided production procedure analysis. The analysis combines the interviews of design and production personnel gathered in to a unified entity. For future investments calculations on investment and a human versus robot expenses comparison were completed. For the development of production procedures a check list was drafted to become familiar with the current production procedure of pipe frames and consider the profitability of robot welding the pipe frame in the future.

As a result of the video-aided production procedure analysis development potential was found concerning both welding and assembly stages. As a result of the check list the work and welding stages were determined which would be appropriate to be robotized and ideas were developed for executing the robotizing. The results of the comparison and investment calculations were suggestive about the way hand welding could be

replaced by robot welding, the robot's annual work load and the payback time of the investment with certain boundaries.

These results should help developing the production procedures and decision making when planning robot investments.

**KEYWORDS:** welding automation, robot welding, robot investment, production procedures video analysis

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETTY SANASTO</b>	<b>5</b>
<b>1. JOHDANTO</b>	<b>6</b>
<b>2. ROBOTIIKKA</b>	<b>7-14</b>
2.1 Robottihitsausjärjestelmä ja sen komponentit	7
2.2 Hitsausautomaatio	10
2.3 Robotisoidun hitsauksen suunnittelu	11
2.4 Robottihitsauksen edut	11
2.5 Robottihitsauksen kannattavuuskriteerit	12
2.6 Hitsauksen automatisoinnin vaikutukset	12
2.7 Robottihitsauksen tehostaminen	13
2.8 Robottihitsaussuunnittelun muistilista	14
<b>3. PIENSARJATUOTANTO</b>	<b>15-16</b>
3.1 Joustava tuotantoautomaatio (FM)	15
3.2 FM-järjestelmän ohjaus	16
<b>4. KÄYTETYT TYÖ- JA SUUNNITTELUMENETELMÄT</b>	<b>17-18</b>
4.1 Käsinhitsauksen analysointi Avix-method ohjelmistolla	18
4.2 Tutkimuksen toteutus	18
<b>5. HITSAUKSEN AIKA- JA KUORMITTAVUUSTUTKIMUKSEN TULOKSET</b>	<b>18-36</b>
5.1 Hitsausympäristö	18
5.2 Putkirungon robotisoidun hitsauksen tarkastelu	20
5.3 Käsinhitsauksen analyysi	24

<b>5.4 Suunnittelu- ja tuotantohenkilöstön haastattelut</b>	<b>27</b>
<b>5.5 Robotti- ja käsinhitsauksen kustannusvertailu</b>	<b>30</b>
<b>6. TULOSTEN POHDINTA</b>	<b>36-42</b>
<b>6.1 Putkirungon soveltuvuus robottihitsaukseen</b>	<b>36</b>
<b>6.2 Käsinhitsausanalyysin tulosten tulkinta ja kehittämistideat</b>	<b>37</b>
<b>6.3 Henkilökohtaiset haastattelut</b>	<b>39</b>
<b>6.4 Laskelmat</b>	<b>40</b>
<b>7. YHTEENVETO</b>	<b>42-44</b>
<b>8. LÄHTEET</b>	<b>44-46</b>

## **LIITTEET**

Liite 1: Robotisointiprojektin investointilaskelman selvitykset	1-2
Kaava 1. Vuotuinen säästötarve	1
Kaava 2. Työtuntien säästötarve	2
Liite 2: Haastatteluvastaukset	4-6
Liite 3: Hitsiaineenmäärä ja hitsiaineentuotto	6

## **KUVAT**

Kuva 1. Teollisuusrobotti vaihtaa kappaletta työstökoneeseen	8
Kuva 2. Nivelvarsirobotti akseleineen	8
Kuva 3. Rakenteen hitsattavuus	10
Kuva 4. Stera Oy:n valmistama hitsausjigi	18
Kuva 5. Hitsattava putkirunko hitsausjigissä	19

Kuva 6. Hitsaaja työssään	19
Kuva 7. Putkirunko sivuprofiilista	20
Kuva 8. Putkirungon kokoonpanojärjestys	21
Kuva 9. Putkirunko taivutuksineen	22
Kuva 10. Putkirungon korkeus	23
Kuva 11. Bluetooth pitimen mitoitus	23
Kuva 12. Moottorin laipan ja kiinnityslevyn välinen etäisyys	23

## **KUVIOT JA KAAVIOT**

Kuvio 1. Railonseurantajärjestelmien jakautuminen	9
Kaavio 1. Hitsausta sisältävien työvaiheiden jakautuminen	26
Kaavio 2. Koko tuotantoprosessin jalostavuus	26
Kaavio 3. Fyysisen rasituksen jakautuminen eri työvaiheiden kesken	27
Kaavio 4 . Robottihitsauksen kulujen jakautuminen	32
Kaavio 5. Käsinhitsauksen kulujen jakautuminen	32
Kuvio 2. Tuotantomäärän vaikutus kappalekohtaisiin hitsauskustannuksiin	35
Kuvio 3. Ennuste teollisuusrobottien määrän kasvusta	42

## **TAULUKOT JA LASKELMAT**

Taulukko 1. Yhteenveto haastatteluista	29
Taulukko 2. Robotti- ja käsinhitsauksen kustannusvertailu	30
Taulukko 3. Tuotantomäärän vaikutus hitsauskustannuksiin (€/Kpl)	Liite
Taulukko 4. Hitsiainemäärä	Liite
Taulukko 5. Hitsiaineentuotto	Liite



Laskelma 1. Käsini- ja robotisoidun hitsauksen kustannusvertailu (€/m)	32
Laskelma 2. 300 kpl:een tuotantotavoite	33
Laskelma 3. Robottihitsauksella sama vuotuinen kuormitus (85h)	34
Laskelma 4. Investointilaskelma	36

## SANASTO

Asetusaika	aika, joka kuluu työvaiheen valmisteluun.
Automaatio	itsetoimiva laite tai järjestelmä.
FM	flexible manufacturing, joustava tuotanto.
Hitsausjigi	on teline, johon hitsattavat kappaleet sijoitetaan.
Hukka	on prosessin osuus, jossa ei varsinaisesti tapahdu mitään tuottavaa, tehokasta ja tavoitetta edistävää toimintaa, tällaisia ovat mm. siirtymiset, työkalujen ja komponenttien noutamiset.
Jalostava	prosessin osuus on työtä, jossa työstettävän kappaleen jalostusarvo kasvaa. Tällaista työtä on esimerkiksi hitsaus ja sorvaaminen.
Kaariaikasuhte	paloaikasuhte, kaariajan ja hitsaustyön suorittamiseen käytetyn ajan välinen suhte..
Luokittelematon	on osuutta, jossa työ hidastuu normaalista merkittävästi, tai pysähtyy kokonaan, yleensä ulkoinen syy, esimerkiksi työvälineen rikkoutuminen.
Prosessi	on sarja toimenpiteitä, jotka tuottavat määritellyn lopputuloksen.
Robotti	on tietokoneohjattu työkappaleita tai työvälineitä käsittelevä yleiskäyttöinen kone, robotti.
Standardi	on jonkin organisaation esittämä määritelmä siitä, miten jokin asia tulisi tehdä.
Tarpeellinen	on prosessin osuus, joka on nimensä mukaan tarpeellista tavoitteen saavuttamiseksi, mutta ei ole jalostavaa työtä. Tällaisia työvaiheita on esimerkiksi komponenttien kiinnittäminen hitsausta varten, tai jo hitsatun kappaleen siirtäminen toiseen työpisteeseen työn jatkamisen mahdollistamiseksi.

# 1. JOHDANTO

Tulevaisuuden toimintaympäristö tulee kone- ja metalliteollisuudessa muuttumaan. Merkittävimpiä näistä muutoksista tulee olemaan globalisaatio. Alan kehitys edellyttää uutta osaamista, luovuutta ja innovatiivisuutta. Tulevaisuuden tärkeimpiä yksittäisiä osaamisalueita tulee olemaan valmistusmenetelmät- ja teknologiat, automatiikka ja robotiikka.

Oy Haloila Ab on maailman johtava käärintälaitteiden valmistaja. Oy Haloila on erikoistunut tarjoamaan asiakkailleen kokonaisratkaisuja lavakuormien käärintään. Oy Haloila Ab:n asiakaskunta koostuu enimmäkseen elintarvike-, lääke-, rakennus- ja kemianteollisuuden yrityksistä. Osana kansainvälistä ITW-konsernia Haloilan palveluihin kuuluvat niin käärintämateriaalit kuin kattavat huoltopalvelutkin. Haloilan kohta 30 vuotta täyttävä Octopus-mallisto on käytössä kaikilla teollisuuden aloilla, joilla kuormakuljetus on osana logististaketjua. Haloilan mallisto koostuu 14 erilaisesta Octopus-laitteesta, joita voidaan modifioida yksilöllisesti asiakkaan tarpeen mukaan. Haloila pyrkii huomioimaan ekologisuuden tuotekehityksessään sekä kaikissa muissa ratkaisuissaan. Ekologisuus ja kestäväkehityksen ajatusmalli tuottaa välittömiä kustannussäästöjä Haloilan asiakkaille. Ympäristöystävällisyys näkyy Haloilan toimintatavassa pakkausmateriaalien valintana, joka on kierrätettävää muovia, sekä Octopus-malliston energiatehokkuutena.

Tämän insinööriyön tavoitteena on tutkia edellytyksiä ja mahdollisuuksia modernisoida käsinhitsattavan kappaleen valmistusmenetelmä robottihitsattavaksi. Valmistusmenetelmän modernisoinnin mahdollisuuden tutkiminen, piensarjatuotanto ja robotiikka ovat insinööriyöni keskiössä. Insinööriyöni tehdään yhteistyössä toimeksiantajan eli Oy Haloila Ab:n, Stera Oy:n, Turun ammattikorkeakoulun sekä Turun koneteknologiakeskuksen kanssa.

Insinööriyökseeni sain tutkittavakseni Haloilan alihankkijan Stera Oy:n valmistaman putkirungon esikokoonpano- ja hitsausprosessin. Hitsaus ja sen kuvaus suoritettiin Stera Oy:n Tammelan toimipisteessä vuoden 2013 syyskuussa. Hitsauksen lisäksi tutkittiin

myös työn kuormittavuutta, työvaiheiden kehittämispotentiaalia, tuotannon tehokkuutta ja tuotannon modernisoinnin mahdollisuutta.

Videoanalyysin tarkoituksena oli nähdä käsinhitsaukseen perustuvan tuotannon tämän hetkinen tilanne, analysoida valmistusmalli ja tehdä sen pohjalta parannusehdotuksia. Putkirungon valmistuksesta haluttiin selvittää seuraavat tutkimuskysymykset:

- Miten kokoonpano ja hitsaus suoritetaan tällä hetkellä?
- Onko valmistusmalli tehokas?
- Mitkä ovat menetelmän suurimmat ”pullonkaulat” tällä hetkellä?
- Miten valmistusmenetelmää voisi tehostaa?
- Miten työergonomiaa voisi parantaa?
- Onko putkirunko robottihitsattavissa?

## 2. ROBOTIIKKA

### 2.1 Robottihitsausjärjestelmä ja sen komponentit

#### *Hitsausrobotti*

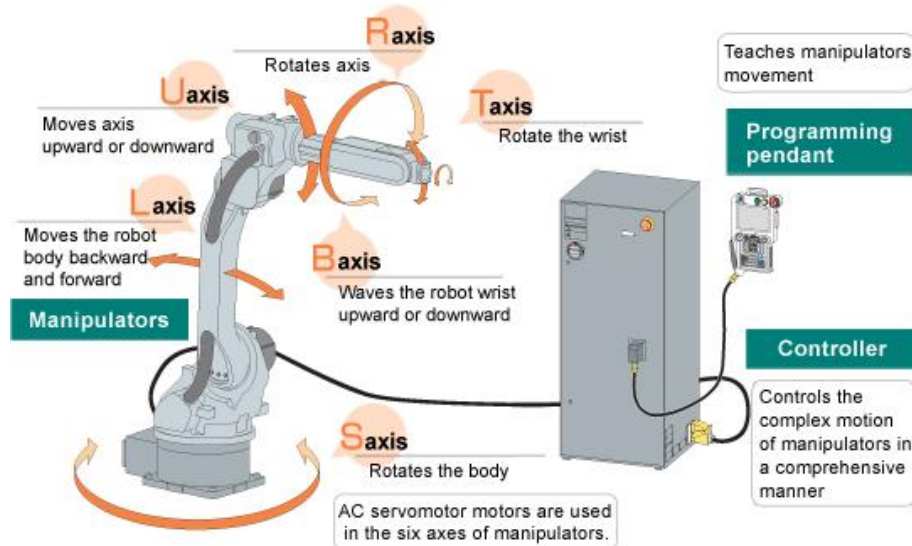
Rakenteellisesti ylivoimaisesti suosituin on ihmiskättä muistuttava kiertyvänivelinen hitsausrobotti. Kiertyvänivelisen robotin hyötyjä ovat mm; Poltin- ja kallistuskulmat, kompakti fyysiseen kokoonsa nähden, työskentely ja ulottuvuus ahtaisiin paikkoihin ja robotin työalue on myös omaan kokoonsa nähden ylivertainen. (Kuivanen, 1999, s. 16; Billing 2012, s.9)

Robotissa on 6 vapausastetta, joista 3 on ranteessa. Tämän lisäksi robotissa on ulkoiset liikeakselit. Robotin kuormitettavuus on yleensä 6kg ja työalueen halkaisija n. 3m. (Aalto, 1999, s. 16)



Kuva 1. Teollisuusrobotti vaihtaa kappaletta työstökoneeseen.

([http://commons.wikimedia.org/wiki/File:5-Achsen\\_Bearbeitungszentrum.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:5-Achsen_Bearbeitungszentrum.jpg))



Kuva 2. Nivelvarsirobotti akseleineen. (www.yaskawa.co.jp)

### *Robottiohjain*

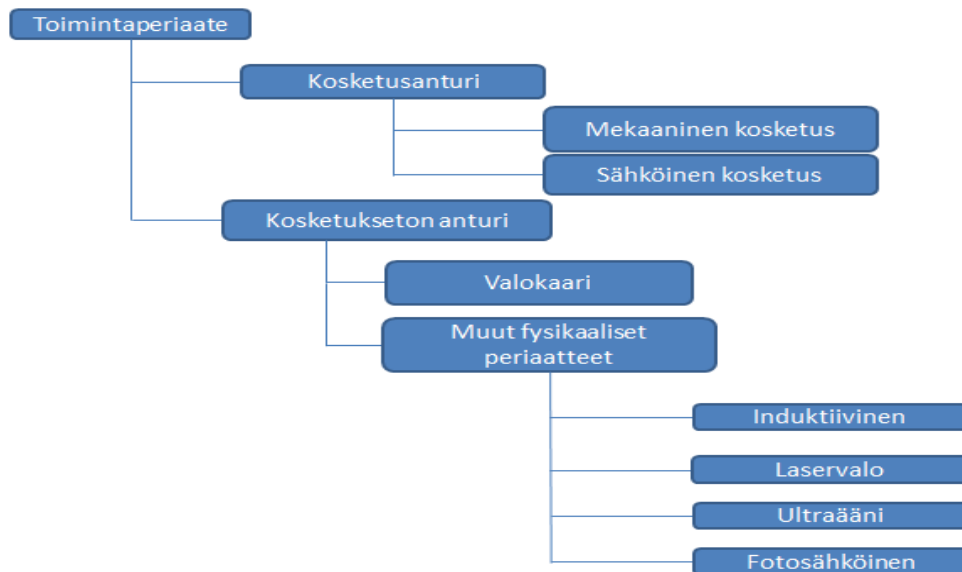
Ylivoimaisesti robotin tärkein komponentti. Määrittelee keskeisesti robotin hyvyden, koska se määrittää laskentakapasiteetin, liiketarkkuuksille ja – nopeuksille on omat liikelaskentaprosessorit. Laskentakapasiteetti tulee parhaiten esiin pienten ympyräliikeohjelmien suorituksessa vaaputtamalla. Robottiohjaimella voi olla ulkoisia akseleita 1-30 kpl:ta. Robottiohjain liittyy laitteen myös ulkopuolisiin laitteisiin käyttäen; sarjaväylää, interbus-s:ää tai profibus:ia. Niin ikään ohjelmien

varmuuskopiointi, tuotantotietojen keräys, etäohjelmointi tapahtuu robottiohjaimen kautta. (Cary & Helzer 2005, s. 315)

### *Hitsauksen railonseuranta*

Käsinhitsauksessa hitsaaja itse tekee varsinaiset kuulo-, näkö- ja tuntoaistihavainnot hitsaus-tapahtumasta. Hitsaajan pitää huomioida kappaleen muoto- ja mittapoikkeamat, sekä tehdä niiden mukaan muutokset hitsausparametreihin. Käsinhitsauksessa on siis kyse hitsaajan ammattitaidosta ja kokemuksesta, jotta hitsi on mahdollisimman laadukas. Automatisoidussa hitsauksessa käsinhitsaajan toiminnot suoritetaan koneellisesti. Automatisoidussa hitsauksessa pitää siis tiedon kulkea todella hyvin. Hitsausrailon tai – tapahtuman anturointi ja nämä tiedot välitetään koneen ohjausjärjestelmälle. Ohjausjärjestelmän tehtävänä on siis ohjata hitsauspään asema oikealle kohdalle hitsattavaa railoa hitsauksen aikana. (Martikainen, 2008, s. 194)

### *Railonseurantajärjestelmät*



Kuvio 1. Railonseurantajärjestelmien jakautuminen. (Lut)

## **2.2 Hitsausautomaatio**

Hitsauksen mekanisointi jaetaan neljään eri tasoon sen mukaan, miten suuri osa hitsauksen työvaiheista tehdään mekaanisesti hitsauslaitetta hyödyksi käyttäen.

*Käsinhitsauksessa* hitsaaja siirtää manuaalisesti hitsauspäättä ja samalla, sekä valvoo, että ohjaa hitsausprosessia.

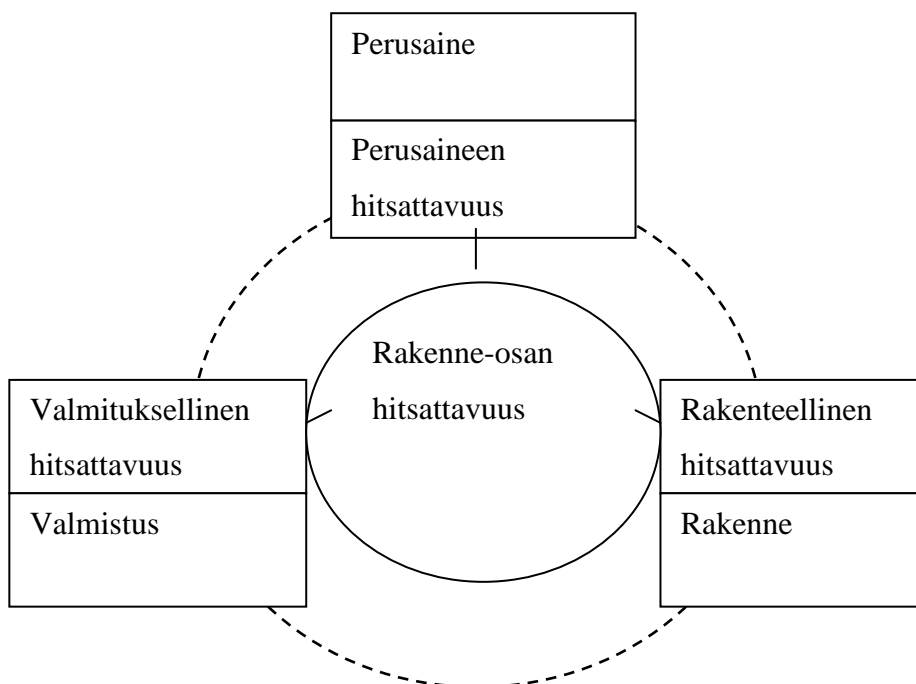
*Puoliautomaattisessa* hitsauksessa hitsauslaite suorittaa jonkin osion meneillään olevasta hitsausprosessista. Yksi puoliautomaattinen hitsausmenetelmä on esimerkiksi MIG/MAG-hitsaus, jossa langansyöttölaite syöttää lisäainelangan automaattisesti hitsauspistoolin kautta.

*Mekanisoidussa* hitsauksessa hitsauslaite tekee fyysisen työn, mutta hitsaaja ohjaa ja valvoo prosessia jatkuvasti.

*Automaattisessa* hitsauksessa hitsaus-, robotti tai laitteisto tekee koko hitsausprosessin ennalta tehdyn ohjelman mukaisesti. (www.kemppi.com, 2013)

### 2.3 Robotisoidun hitsauksen suunnittelu

Robotisoidun hitsauksen suunnittelussa tulisi erityisesti huomioida materiaalin hitsattavuutta, standardointia, railojen luoksepäästävyyttä, railo- ja liitosmuotoja sekä mig/mag-hitsauksen tarkkuusvaatimuksia. (Hiltunen, 2005, s.31)



Kuva 3. Rakenteen hitsattavuus. (Grönlund, 1985, s.7)

Hyvä hitsattavuus kulkee käsi kädessä hyvän rakenteen kanssa. Hyvä rakenne sallii mahdollisimman suuren kuormituksen, on hankintakustannuksiltaan edullinen ja omaa riittävän käyttövarmuuden.

Lisäksi on otettava huomioon hitsauksen vaatima esivalmistelu; hitsausprosessi, lisääine, osavalmistustarkkuus ja esilämmitys. (Lempinen & Savolainen, 2003, s.83)

#### **2.4 Robottihitsauksen edut**

Tuottavuus on yksi robotin isoista eduista ihmiseen nähden, kaariaikasuhde voi olla jopa kolminkertainen ihmiseen verrattuna. Robotille ominaista on myös hitsaustehon nosto jopa puolitoista kertaiseksi (6kg/h→9kg/h).

Robottihitsauksessa on myös lyhyempi ja joustavampi läpäisy aika. Laatu puhuu myös robotin puolesta, ilman teknisiä ongelmia robotti toistaa aina samanlaisen hitsin. Yksitoikkoiset työt ovat roboteille vain rutiinia, robotti ei väsy. Ammattitaitoisia hitsaajia ei välttämättä aina ole saatavilla, jolloin ohjelmoitu robotti voi suorittaa työn. (Meuronen, 2011, s.11)

Robotin hankkiminen tuotantoon ei ole kuitenkaan itsetarkoitus, vaan jokainen tuleva investointi tulee harkita hyvin tarkkaan. Toistaiseksi ammattitaitoiset hitsaajat ovat tehokkaampia piensarjatuotannossa ja erittäin vaativissa hitsauksissa. (Hiltunen, 2005)

#### **2.5 Robottihitsauksen kannattavuuskriteerit**

Mietittäessä robotisoitua hitsausta, on mietittävä valmiiksi miten robotti pääsisi käyttämään koko kapasiteettinsa. Robottihitsauksen tuottavuusedut tulevat parhaimmillaan esiin keskisuurissa ja suurissa sarjoissa, kuitenkin etäohjelmointi ja parametrien ohjelmointi ovat madaltaneet sarjakoon kynnystä.

Tuotannonkehittämiseksi on kehitettävä koko tuotantoketjua ja poistettava mahdollisimman monta ”pullonkaulaa”. Tämä asettaa jokaiselle yksittäiselle osalle erilaiset ja uudet vaatimukset. Menetelmäsuunnittelussa tavoitetasoksi ei tule asettaa ihmistyövoiman käyttötapaa ja suorituskykyä. Robottien liikenopeudessa on jo pelkästään huomattavaa lisäpotentiaalia. Karsimalla turhat väliliikkeet ja optimoimalla liikeradat voi robotin hitsausnopeus olla 1-2 m/min. Robotti-investointi on kannattava, kun on varmistettu ja tutkittu, että nykyisellä tuotantoketjulla on annettavana tarpeeksi työtä robotille (>1600 h/v). (Hiltunen & Naams, 2000)

## 2.6 Hitsauksen automatisoinnin vaikutukset

Tuottavuuden paraneminen on automatisoinnin ja robotisoinnin ensimmäinen tavoite. Lisäetuina tulevat mm. parempi työergonomia, tasaisempi laatu, tehokkaampien hitsausprosessien tehostuneet käyttömahdollisuudet. Automatisointitaso tulisi valita tuotantomäärän ja tuotteiden mukaan.

Hitsausrobotiikka itsessään edustaa erittäin pitkälle vietyä mekaniikan ja automatisoinnin yhteisprosessia. Hitsausrobotiikassa automaatio kykenee hoitamaan sekä hitsauspään kuljetusliikkeen, että hitsausprosessin ohjauksen ennalta ohjelmoidun ohjelman mukaisesti. Yksi robottihitsauksen ehdoton valttikortti on robotin lyhyt uudelleenohjelmointiaika, jotta robottia voidaan käyttää erilaisissa työkohteissa. (www.kemppi.com, 2013)

### *Parempi tuottavuus ja tasaisempi laatu*

Automatisoimalla hitsaus pyritään yleensä suurempaan tuotantokapasiteettiin, kustannustehokkuuteen, tasaisempaan laatuun ja parempaan hitsaustyön tuottavuuteen.

Hitsausrobotiikassa kustannusrakenne painottuu investoinnin alkupäähän, laitteistokustannuksiin, testaukseen ja käyttäjien koulutukseen. Edellä mainituista syistä johtuen hitsaustyön robotisointi vaatii aina erittäin tarkkaa etukäteissuunnittelutyötä. Nykyinen hitsaustuotanto on analysoitava kaikkine työvaiheineen ja niiden kustannukset on eriteltävä. Lisäksi tuotteiden soveltuvuus robottihitsattaviksi on tarkasti analysoitava.

Parhaiten robotisoitu hitsaus soveltuu tuotteille, joissa on paljon hitsejä moneen suuntaan, hitsit ovat lyhyitä ja hitsattavat pinnat kaarevia. Robotisointi ei välttämättä edellytä sitä, että kyseisiä tuotteita valmistetaan jatkuvasti suuria määriä. Nykyaikainen teknologia mahdollistaa yhä pienempien sarjojen kustannustehokkaan hitsauksen, jopa yksittäiskappaleiden valmistusta on menestyksekkäästi robotisoitu. (www.kemppi.com, 2013)

## 2.7 Robottihitsauksen tehostaminen

Automaattista hitsausta voidaan tehostaa esimerkiksi pienentämällä railotilavuutta. Mekanisoidussa ja automatisoidussa hitsauksessa hitsit ovat tasalaatuisia, joten ne



voidaan mitoittaa minimiinsä. Robottihitsauksessa hitsautumissyvyyttä eli tunkeumaa voidaan hyödyntää osana näkyvää a-mittaa. Tämä perustuu siihen, että automatisoitu hitsaus tapahtuu aina samalla tavoin, joten kerran saavutettu ja mitattu tunkeuma toteutuu todennäköisesti myös muilla hitsauskerroilla. (www.kemppi.com, 2013)

Robottiasemassa kannattaa käyttää nimenomaan robotisoituun hitsaukseen suunniteltuja hitsauslaitteistoja, joissa hitsauslangan kulkuominaisuudet ovat hyvät ja langansyöttö tasaista. Robotisointiin erikseen suunnitelluissa hitsauslaitteissa kaikkia toimintoja pystytään ohjaamaan robotin toimesta. Erilaiset signaalit ja takaisinkytkennät on suunniteltu robottisovellusten korkeiden laatu- ja tehokkuustavoitteiden mukaisiksi. Tällä vältetään turhat käyttökatkokset ja parannetaan laitteiston kaariaikasuhdetta. (www.kemppi.com, 2013)

## **2.8 Robottihitsaussuunnittelun muistilista**

Prototyypikappaleen jälkeen tulisi aina tehdä seuraavanlainen tarkistuslista ja miettiä, miten kappaleen valmistusta voisi vieläkin parantaa. Onko tuote jaettu osakokoonpanoihin? Tuote tulisi jakaa osakokoonpanoihin, jotta välttyttäisiin liian suurilta kokoonpanohitsauksilta. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s.47)

Voidaanko liitosten tai osien määrää vähentää? Mitä vähemmän osia, sitä vähemmän yleensä hitsattavia liitoksia. Aina tulisi välttää pieniä yksittäisiä hitsejä, pienet hitsit eivät ole kustannustehokkaita roboteilla hitsattaessa. (Pahl, 2007, s.377)

Voidaanko osista tehdä itsepaikoittavia? Paikoitus tulisi suunnitella siten, ettei väärin asennus ole mahdollista. Paikoitus tulisi tehdä jigiin.

Mitkä ovat tärkeimmät mitta- ja muototoleranssit valmiin tuotteen kannalta? Voidaanko osat tai valmiit tuotteet pinota? Osien orientoituminen.

Mikä hitsausprosessi on robotille mahdollinen? Onko jotain rajoitteita tai sitten vaatimuksia? MIG/MAG, Laser, Yhdistelmä tai pistehitsaus.

Tarvittavat liitynnät ja anturoinnit, robotti on kuitenkin tarkka laite epätarkassa maailmassa. Millaisia antureita ja sensoreita robotti tarvitsee? Anturien ja sensorien tiedonkulku, ja korjaustietojen välitön kulkeutuminen robotin ohjaimelle. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s.73)

Tarvittavien liityntöjen ja anturointien lisäksi on mietittävä niin robotin kuin tarvittavien kappaleenkäsittelylaitteidenkin ulottuvuuksia ja työpisteen lay-outtia. Robotin käsivarren ulottuvuus luo haasteita kompaktin ja tehokkaan tuotantosolun suunnittelulle. Kappaleenkäsittelylaitteiden tuotantolinjoja ja komponenttien sekä valmiiden tuotteiden varastointia tulisi myös miettiä. (Latokartano, 2011)

Aina robottihitsausta mietittäessä tulisi pohtia onko robotilla mahdollista hitsata nopeammin/halvemmallalla/paremmiin. Näiden kriteerien täytyessä valinta on itsestään selvä. Kappaleenkäsittelylaitteiden hyödyllisyys tulisi myös ottaa huomioon robottihitsausta mietittäessä, voidaanko robottihitsaus integroida FM-järjestelmään. Tuotteiden standardointi ja modulointi; jolloin käytetään samoja osia, levynpaksuuksia, liitosmuotoja ja a-mittoja monessa kohteessa. Näin ollen hitsausparametrit pysyvät samoina. (Latokartano, 2011)

Erilaisia hitsejä tulisi pyrkiä vähentämään parametrikokeiden ja -taulukoiden määrän vähentämiseksi ja ohjelmoinnin nopeuttamiseksi. Tuotannollista näkökulmasta myös tuotannonohjaus selkeytyisi ja läpäisy aika pieneneisi. (Latokartano, 2011)

### 3. PIENSARJATUOTANTO

Robotisointi- ja automatisointi ratkaisut eivät tule ehkä koskaan olemaan niin joustavia ja adaptiivisia kuin ihminen. Toisaalta taas robotti ei tule koskaan väsymään niin kuin ihminen ja ihmisestä ei tule koskaan niin tarkkaa kuin robotista. Ensimmäisen ohjelmoinnin jälkeen robotti pystyy toistamaan saman työvaiheen tuhansia kertoja väsymättä ja tekemättä virheitä, kun taas ihmisen täytyy pitää taukoja ja tutustua uudelleen työtehtäväänsä. Ihmisten välillä on myös suuria ammattitaito eroja. (Reunanen, 2011)

Suomessa kone- ja metalliteollisuus tuottaa pääsääntöisesti vain ja ainoastaan pieniä sarjoja, mikä vaatii automaatiojärjestelmiltä suurta joustavuutta. Automaation etuja tarkasteltaessa ei tosin voida vain tyytyä sen joustavuutta tarkastellen. Kannattavuudesta ja hyödyistä saadaan todellinen kuva, kun tarkastellaan myös laatu-, investointikustannus-, käyttökustannustekijät, suurin mahdollinen vuotuinen työmäärä sekä työmäärän ja työaikojen joustavuus. (Reunanen, 2011)

#### 3.1 Joustava tuotantoautomaatio (FM)

Prosessina hitsaus on huomattavasti haastavampi toteuttaa kuin jokin lastuava työstö, ja sen hyötyjä on vaikea ulosmitata sekä prosessina se on hyvin häiriö herkkä. (Latokartano, 2011)

*Alhaiset käyttökulut, pienet asetusajat*

Joustavassa tuotantoautomaatiossa kappaleenkäsittely on yleensä automatisoitu ja hitsaukseen tulevia tuotteita käsitellään paleteilla. Kappaleenkäsittelyssä on yleensä aina erillinen puskurivarasto, joka täyttyy automaattisesti tai mitä täytetään manuaalisesti. Valmistuserän suuruus on myös riippumaton yksikkökohtaisista tuotantokustannuksista. Tällaisen tuotannon suurena etuna on hyvin pienet asetusajat siirryttäessä tuotteesta toiseen, parhaimmassa tapauksessa asetusaika on 0. (Vtt, 2003)

### *Tuotantovaiheiden jakaminen*

Joustavassa tuotantoautomaatio hitsausprosessissa on tunnusomaista että hitsausta suoritetaan niin roboteilla, automaateilla kuin käsinkin. Koko hitsausprosessi siis ei välttämättä ole robotisoitu. Tällaisissa tuotantomalleissa yleensä silloitushitsaus suoritetaan manuaalisesti. (Latokartano, 2011)

## **3.2 FM-järjestelmän ohjaus**

### *Robottiohjain*

Ensimmäisenä vaihtoehtona FM-järjestelmän ohjaimeksi on robottiohjain. Robottiohjaimen etuna on toimintojen keskittyminen yhteen paikkaan. Robottiohjain pystyy ohjaamaan rullarataa ja paletinvaihtajaa samanaikaisesti. Toimintojen keskittäminen yhteen paikkaan auttaa myös tiedonsiirrossa, tiedonsiirron virhemahdollisuudet vähenevät. Toiminnan keskittämällä on myös varjopuolensa, se rajoittaa robottiohjaimen kapasiteettiä. (Latokartano, 2011)

### *Huomioitavaa joustavasta hitsausautomaatiosta*

Asemoinnissa on käytettävä joko konenäköä tai tarraimen kautta liitettävään osaan kytkettävää jännitettä hyödyntävää railonhakua. Toimivuuden kannalta ehdottaman tärkeää on hitsaus- ja paikoitusrobotin kalibrointi sekä äärimmäisen nopea, tehokas ja varma tiedonsiirto. On suositeltavaa suunnitella lay-out siten, että robotit ovat limittäin, jotta robotit tietävät tarkalleen toistensa aseman ja sijainnin. (Latokartano, 2011)

## 4. KÄYTETYT TYÖ- JA SUUNNITTELUMENETELMÄT

### 4.1 Käsinhitsauksen analysointi Avix-method ohjelmistolla

Avix on konepajateollisuuden tarkoitettu apu- ja kehittämistyökalu. Avix:in tarkoituksena on tukea teollisuuden kehittämis- ja insinööriä. Avix käsittää useita erilaisia pienempiä moduuleja, joiden kaikkien yhteinen tarkoitus on parantaa käyttäjien kilpailukykyä tuotteiden ja prosessien suhteen. Avix:in kehittäjien ajatuksena on, että mitä paremmin ja yksityiskohtaisemmin tiedostat tuotteiden ja prosessien hyvät ja huonot puolet, tällöin on myös suurempi mahdollisuus löytää kehittämiskohteita tuotteista ja prosesseista.

Avix:in avulla ja tuella yritykset löytävät uusia menetelmiä parantaa tuottavuutta, jotka muuten olisivat mahdottomia löytää perinteisiä toimintamalleja käyttäen. Avix käyttää standardoituja aikoja, sekä ainutlaatuisia menetelmiä luokitellakseen kohteita ja toimintaa kolmessa eri kategoriassa; tuotto, välttämättömät ja häviöt. Avix pystyy simuloimaan työajat kehittämistyössä, arvioimaan kehittämispotentiaalin työvaiheen suhteen, esimerkiksi asetusajojen vähentäminen kokoonpanossa. Avix pyrkii modernisoimaan tuotantotekniikan aikatutkimuksilla käyttäen videoanalyysiä. Videoanalyysiä läpikäydessä tulisi keskustella suunnittelun ja työnjohdon kanssa työn optimoinnista, kehittämisestä ja ongelmista.

Avix:illa on useita potentiaalisia käyttökohteita, kuten yksittäisten työpisteiden tuottavuuden parantaminen, työpisteen asemoinnin ja työmenetelmien optimointi sekä kokoonpanon suunnittelun optimointi.

Jokaisen teollisuuden alan yrityksen tulisi pohtia Avix:in käyttökohteita, ja varsinkin käyttömahdollisuuksia oman toiminnan kehittämiseksi, tuottavuuden parantamiseksi ja ennen kaikkea kilpailukykyyn säilyttämiseksi. ([www.avix.eu](http://www.avix.eu), 2013)

## 4.2 Tutkimuksen Toteutus

Prosessin kuvauksen ja videoavusteisen analysoinnin lisäksi, haastattelin useita putkirungon valmistusketjuun kuuluvia henkilöitä. Suunnittelu- ja tuotantovaiheista. Haastattelujen tarkoitukseni oli löytää ja ennen kaikkea, tuoda esiin haasteet jokaisesta tuotantovaiheesta suunnittelusta valmiiseen tuotteeseen. Tämän lisäksi halusin käsityksen siitä, miten erilaisia kriittisiä työvaiheita tuotannon eri vaiheissa on, ja miten ne vaikuttavat toisiinsa. Toisin sanoen, miten kriittisesti edeltävän työvaiheen muutokset tulevat vaikuttamaan seuraavassa työvaiheessa.

Insinööriyötä varten haastattelin seuraavia henkilöitä. Insinööriyöni tilaajan eli Haloila Oy:n pääsuunnittelijaa, Haloilan alihankkijan Stera Oy:n tuotannon esimiestä, Steran hitsaajaa ja Haloilan kokoonpanijaa.

## 5. HITSUKSEN AIKA- JA KUORMITTA VUUSTUTKIMUKSEN TULOKSET

### 5.1 Hitsausympäristö

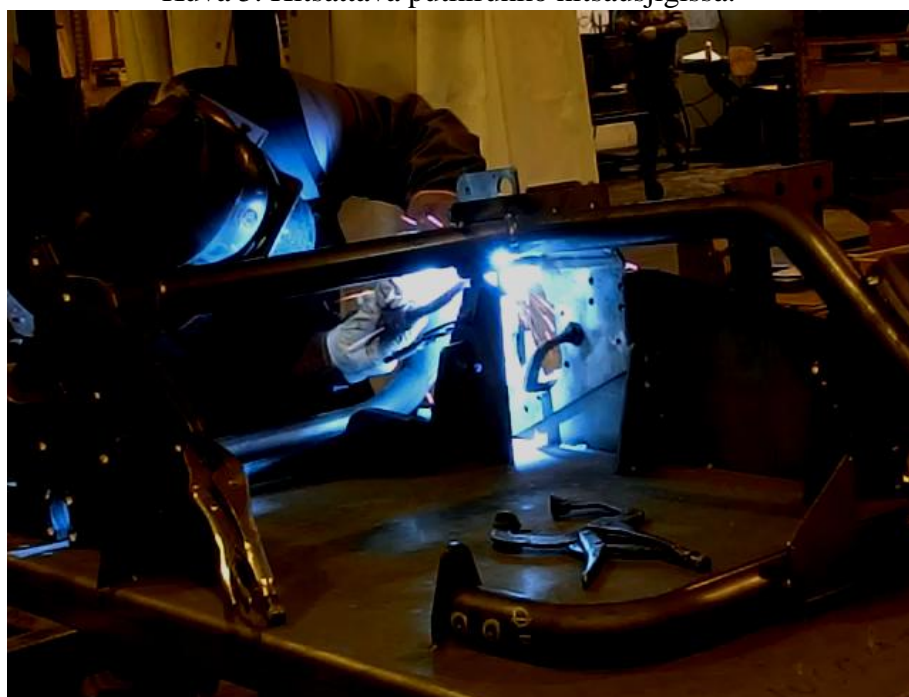
Alle oleva hitsausjigi on Stera Oy:n laserilla valmistama rakenne, jonka vaatimuksina on jäykkyys, mittatarkkuus ja helppo käytettävyys.



Kuva 4. Stera Oy:n valmistama hitsausjigi.



Kuva 5. Hitsattava putkirunko hitsausjigissä.



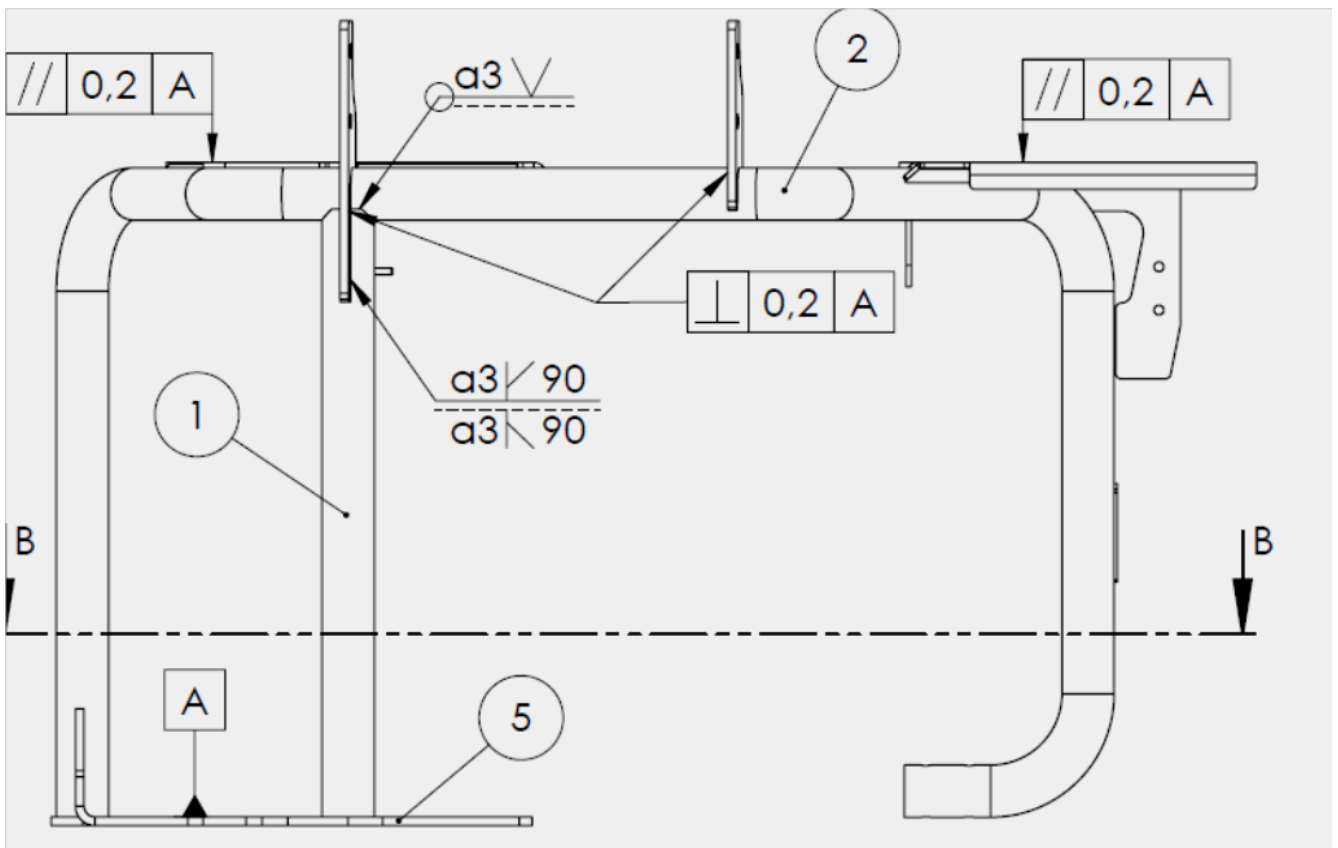
Kuva 6. Hitsaaja työssään.

## 5.2 Putkirungon robotisoidun hitsauksen tarkastelu

Tämän työn osion tarkoituksena on tarkastella tällä hetkellä käsin hitsattavan tuotteen kokoonpanoa, osien paikoitusta, tärkeimpiä mitta- ja muototoleransseja, osien standardointia sekä tärkeimpänä putkirungon soveltuvuutta robottihitsattavaksi. Pohdinta putkirungon soveltuvuudesta robottihitsattavaksi löytyy kappaleesta 6.

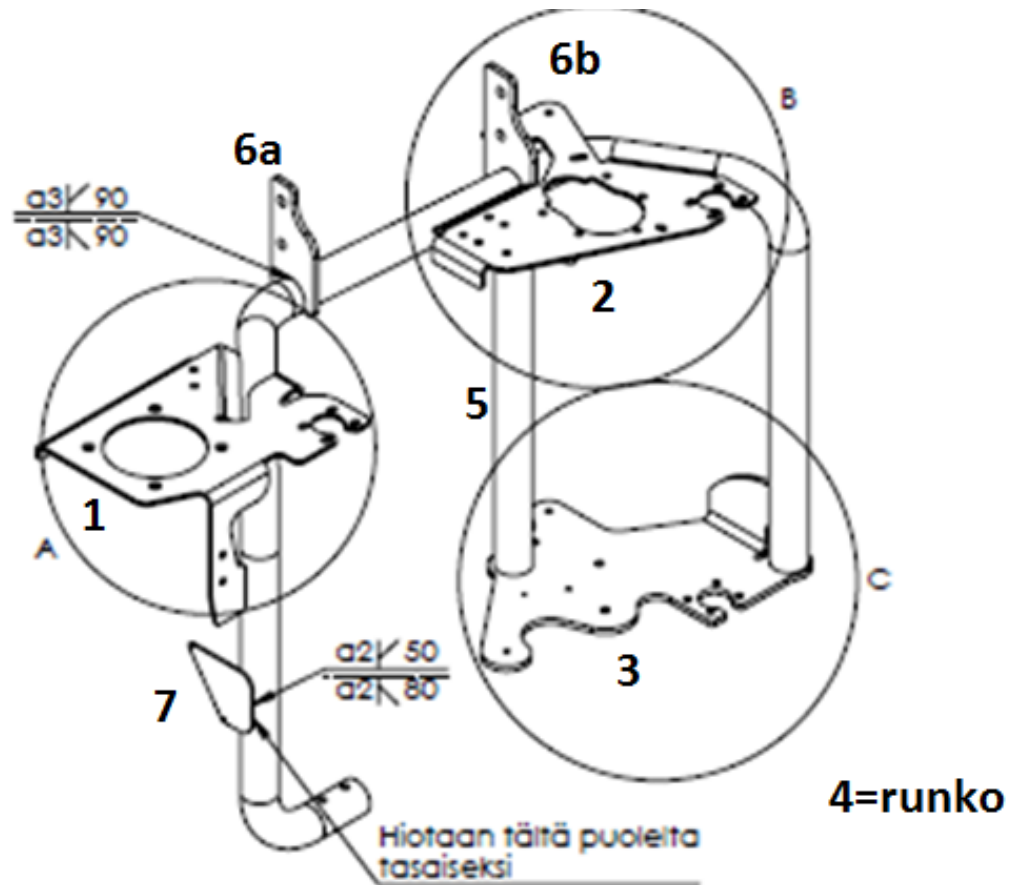
### *Kokoonpano*

Kokoonpano vaiheessa käydään läpi nykyinen kokoonpanojärjestys videoanalyysin pohjalta, sekä pohditaan komponenttien sopivuutta, paikoitusta ja muoto- sekä mittatoleransseja.



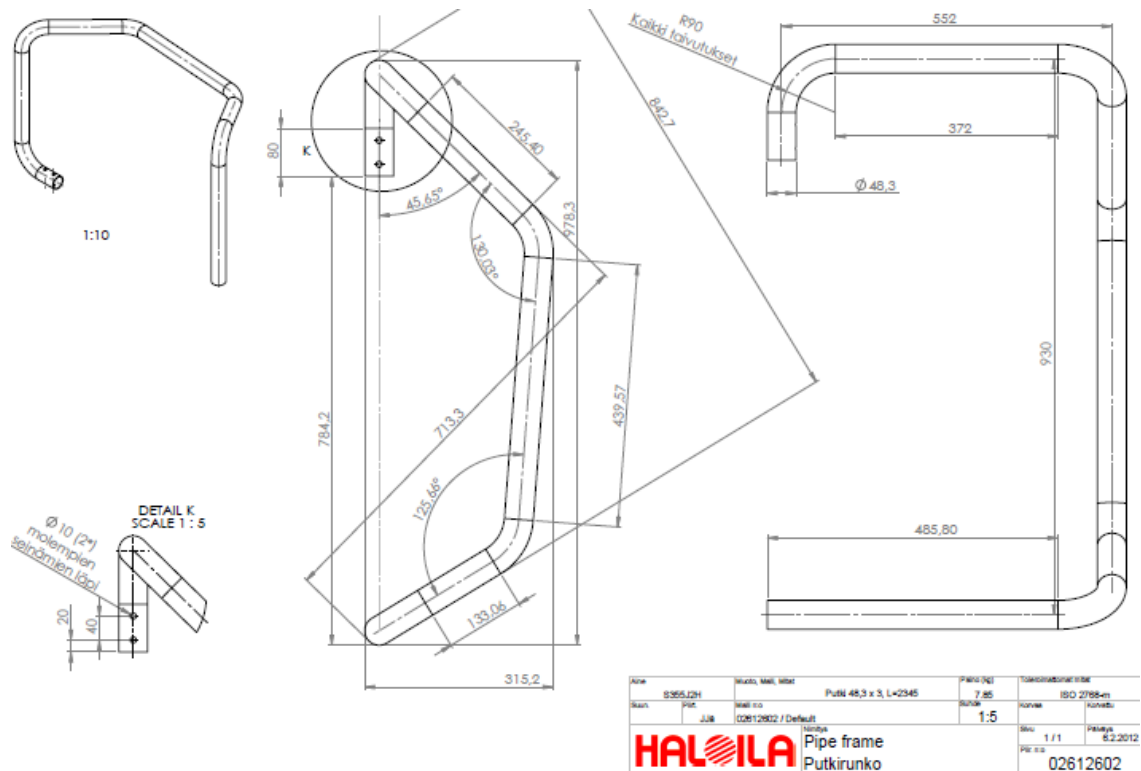
Kuva 7. Putkirunko sivuprofilista.





Kuva 8. Putkirungon kokoonpanojärjestys.

Kuvien 8,10 ja 11 avulla saadaan näkemys kokoonpano vaiheesta. Kappaleet asetellaan yksitellen jigiiin (kuva 4), jossa on jo itsessään paikoitus kappaleille. Kokoonpanojärjestys näkyy kuvasta 8. Ensimmäisenä asetetaan moottorin laippa, sitten kiinnityslevy ja kolmantena pohjalevy, kolmessa ensimmäisessä asennuksessa apuna käytetään puristimia. Neljäntenä asetetaan putkirunko, jigissä on paikoitus putkirungolle.



Kuva 9. Putkirunko taivutuksineen.

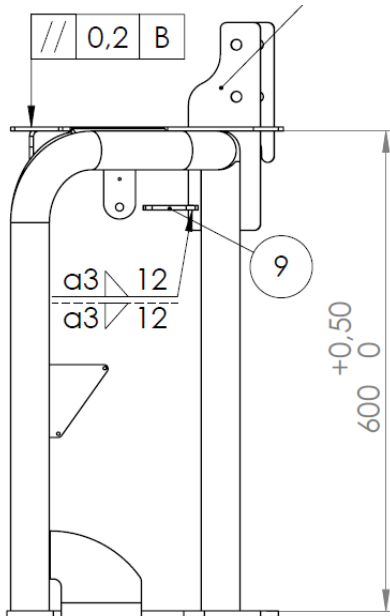
Viidentenä jigiin asennetaan tukiputki, kuvatussa videoanalyysissä hitsaaja käytti asennustyökaluna kumivasaraa tarkkojen toleranssien vuoksi. Myös tukiputkelle oli tarkka paikoitus jigissä. 6a ja b komponentit ovat kiinnitysosia, joista toinen eli 6b asennettiin pienen tukilevyn kanssa, jotta se pysyisi paremmin paikoillaan ja toinen hepattiin kiinni vapaammalla tyylillä. 6a kiinnitysosalle ei ollut tarkkaa paikoitusta. Viimeisenä jigissä kiinni olevaan putkirunkoon hepattiin kiinni bluetooth vastaanottimen pidin. Kappaleelle ei ollut tarkkaa paikoitusta ja heppaus tehtiin ns. ”vapaalla kädellä”.

### *Muoto ja mittatoleranssit*

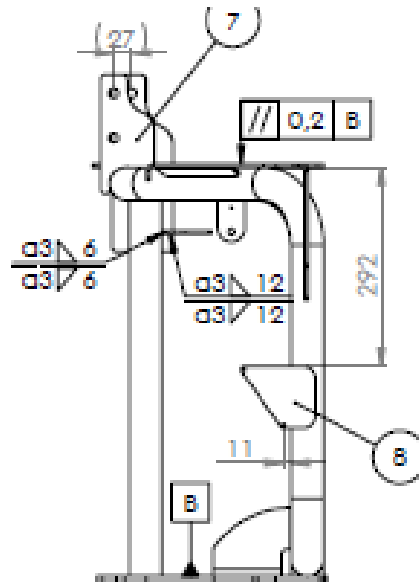
Putkirungon muoto ja mittatoleranssit perustuvat kappaleen mittatarkkuuksiin, putkirungon hitsattavuuteen, lujuuteen ja muovattavuuteen. ([www.onninen.procus.fi/](http://www.onninen.procus.fi/))

Geometriset toleranssit perustuvat standardeihin SFS 4443:1980 ja SFS-EN ISO 1101:2006, jotka esittelevät toleroinnin perusperiaatteet ja vaatimukset kappaleiden toleroinnille. ([www.sfsedu.fi](http://www.sfsedu.fi))

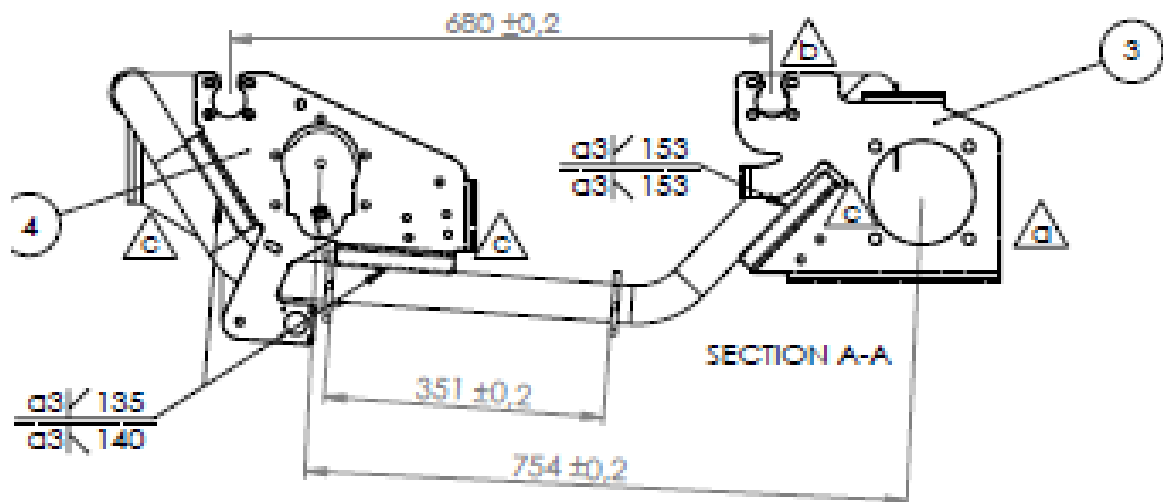
Haastattelujen (taulukko1) ja piirustusten pohjalta havaitaan, mitkä mitat ja muodot ovat valmiiksi hitsatulle kappaleelle tärkeimmät. Kuvassa 7 näkyy, miten moottorin laipan ja kiinnityslevyn tulee olla yhdensuuntaisia pohjanlevyn kanssa, ja miten kiinnitysosien tulee olla kohtisuorassa pohjalevyn suhteen.



Kuva 10. Putkirungon korkeus.



Kuva 11. Bluetooth pitimen mitoitus.



Kuva 12. Moottorin laipan ja kiinnityslevyn välinen etäisyys.

Kuvien 9, 10, 11 ja 12 mittojen, ja suunnittelu- ja tuotantohenkilöstön haastattelun perusteella valmistuksellisesti tärkeimmät mitat ovat putken taivutukset, jotta rungon omat mitat toteutuvat. Hitsauksesta johtuvat vetelyt ja rungon muodonmuutokset on

pyrity estämään kuvan 5 hitsausjigillä, jonka vaatimuksenakin on jäykkyys, jotta runko ei lämmönmuutoksista vääntyisi. Rungon muuttaessa muotoaan hitsauksen takia, myös kuvien 10, 11 ja 12 mitat tulisivat muuttumaan ja näin ollen kappale ei olisi enää toleransseissaan.

### **5.3 Käsinhitsauksen analyysi**

#### *Tutkimuksen tulos*

Video-avusteisesta analyysistä löydettiin useita tuotantovaiheita, joissa olisi kehittämispotentiaalia. Suunnittelun osalta löydettiin kriittisimmät kohdat, jotka vaikuttavat olennaisesti lopputuotteen laatuun. Lisäksi selvisi puutteita, joita ei ainakaan haastattelujen aikaan ollut tarpeeksi huomioitu tuotannon eri vaiheissa. Asioita, jotka helpottavat tuotantovaiheen työntekijöitä työssään merkittävästi.

Tutkimuksen lopputuloksia käsitellään tarkemmin tämän insinööriyön myöhemmässä vaiheessa.

#### *Hitsausprosessin jakaminen*

Analysointia varten käsinhitsausprosessi jaettiin kuuteen eri työvaiheeseen; kokoonpanoon, heppaukseen, 1.hitsaukseen, kappaleen siirtoon, 2.hitsaukseen ja viimeistelyyn.

Kokoonpano on työvaihe, jossa hitsaaja valmistele tulevaa hitsausprosessiaan. Hän kiinnittää rungon hitsausjigiin, kiinnittää tarvittavat komponentit puristimilla kiinni runkoon ja noutaa Migin.

Heppauksessa hitsaaja liittää puristimilla rungossa kiinni olevat komponentit runkoon kiinni siten, että runko ja sen komponentit pysyvät kiinni ennen kuin varsinainen hitsaus on valmis.

1.Hitsaus on työvaihe, jossa hitsaus tapahtuu hitsausjigissä, siltä osin kun se on mahdollista.

Kappaleen siirrossa hitsaaja irrottaa hitsatun kappaleen ja kantaa sen toiseen työpisteeseen, jossa hitsaus suoritetaan loppuun.

2.Hitsauksessa hitsaus suoritetaan loppuun ja hitsausseamat tarkastetaan silmämääräisesti.

Viimeistelyn tarkoituksena on vielä kertaalleen tarkastaa hitsit, sekä puhdistaa hitsattu runko hitsausroiskeista.

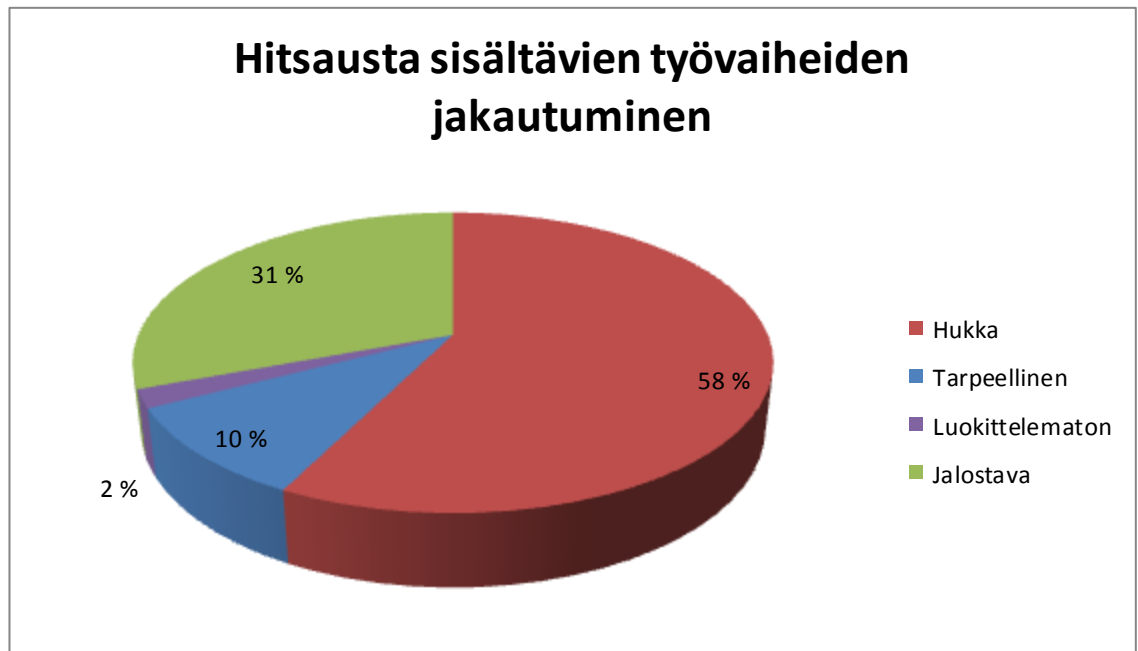
### *Prosessin jakautuminen*

Avix-method ohjelmisto jakaa analysoitavan työvaiheen hukka-, tarpeellinen-, luokittelematon- ja jalostava-osioihin. Jako perustuu työssä tapahtuviin yksityiskohtiin, joita on mm. työkalun noutaminen, kiinnittäminen, ottaminen, maalaaminen, hitsaaminen jne.

Tämän lisäksi ohjelmistolla voi yksityiskohtaisesti tarkastella työn sujumista työergonomian näkökulmasta. Työvaiheesta voi poimia yksittäisiä; kääntymisiä, taivutuksia, venytyksiä, askeleita ja voimankäyttöjä. Näistä poiminnoista ohjelmisto tekee yhteenvedon, josta saa näkökulman työvaiheen tai koko prosessin työergonomiasta.

### *Kaaviot*

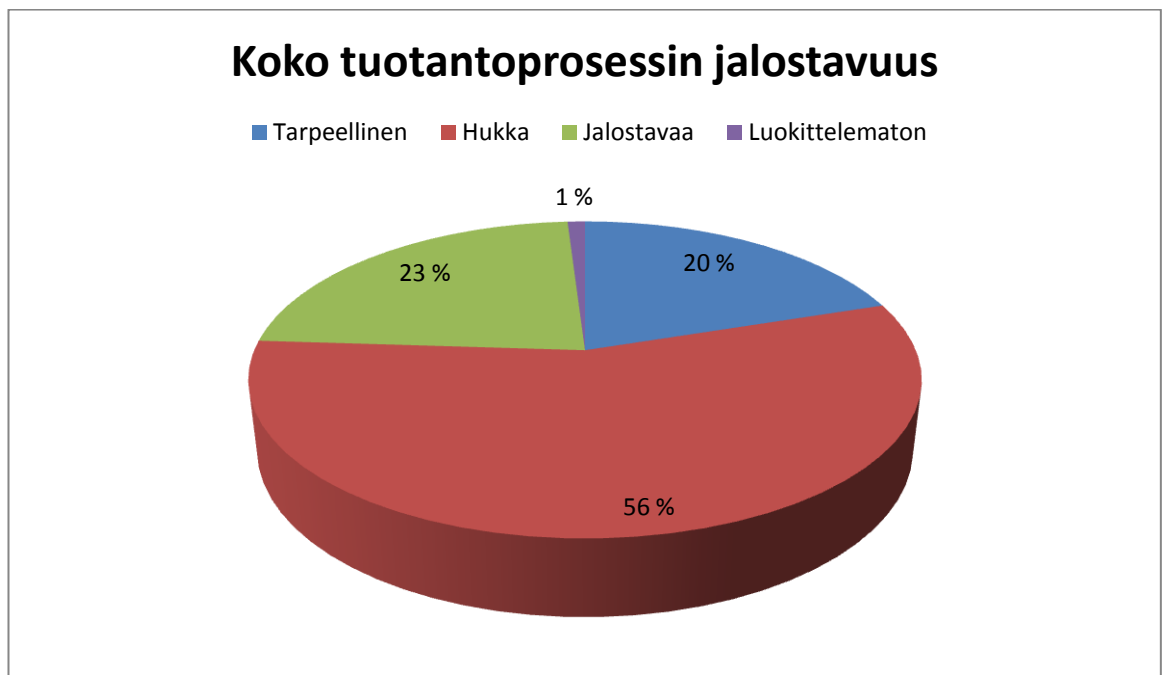
Ensimmäisenä esitetään kaavio 1, jossa on laskettuna hitsausta sisältävien työvaiheiden hukka-, tarpeellinen-, luokittelematon- ja jalostava prosentuaaliset osuudet.



Hukka	Tarpeellinen	Luokittelematon	Jalostava
6,3min, 58 %	1,05min, 10 %	0,2min, 2 %	3,4min, 31 %

Kaavio 1. Hitsausta sisältävien työvaiheiden jakautuminen.

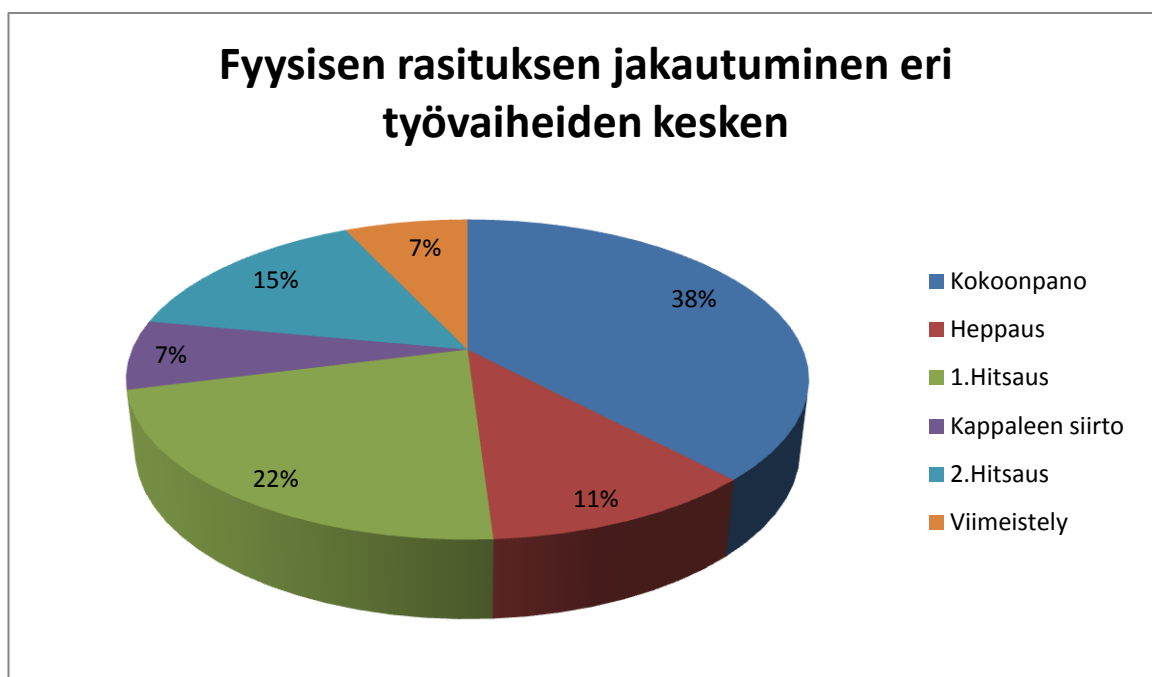
Seuraavana on kaavio 2, jossa esitellään koko putkirungon hitsausprosessin jakautuminen.



Hukka	Tarpeellinen	Luokittelematon	Jalostava
9,55 min 56 %	3,4 min 20 %	0,2 min, 1 %	3,9 min, 23 %

Kaavio 2. Koko tuotantoprosessin jalostavuus.

Viimeisenä on kaavio 3, josta nähdään koko tuotantoprosessin työvaiheiden välinen fyysisen rasituksen jakautuminen.



Kaavio 3. Fyysisen rasituksen jakautuminen eri työvaiheiden kesken.

#### 5.4 Suunnittelu- ja tuotantohenkilöstön haastattelut

Insinööriyötä varten haastattelin neljää eri ihmistä putkirungon tuotannon eri vaiheista. Insinööriyöni tilaajan eli Haloila Oy:n pääsuunnittelijaa, Haloilan alihankkijan tuotannon esimiestä, Steran hitsaajaa ja Haloilan kokoonpanijaa.

##### *Suunnittelija*

Haastattelin Haloilan pääsuunnittelijaa, jotta saisin yleisen käsityksen uuden runkomallin vaatimuksista ja lähtökohdista. Miten kyseiseen malliin on päädytty ja miten sen oletetaan olevan edeltäjiään parempi.

### *Tuotannon esimies*

Steran tuotannon esimiehen haastatteluun päädyttiin, jotta varsinaisen hitsauksen ja tuotannon haasteet ja vaatimukset selventyisivät. Hitsauksen lähtökohtien selvittäminen, uuden muotoilun tuovat valmistukselliset haasteet, valmistuksen kriittisimmät kohdat sekä tuotannon pullonkaulojen selvittäminen.

### *Hitsaaja*

Käytännönläheisen kuvan saamiseksi hitsaustyöstä haastattelin hitsaajaa, joka käsin kokoaa ja hitsaa putkirungon. Hitsaajalta halusin näkemyksen työn tehokkuudesta, työmenetelmästä, hitsausarvoista, valmistusajasta, kappaleiden mittatarkkuudesta, oman työnsä kehittämideoista, työaseman loogisuudesta ja omasta työergonomiasta.

### *Kokoonpanija*

Viimeisenä haastattelin Haloilan kokoonpanijaa. Hänen työnsä on lähimpänä valmista tuotetta, joten hänellä on näkemys siitä, mitä pitäisi tehdä toisin, jotta kokoonpanijan työ olisi tehokkaampaa ja ergonomisempaa. Häneltä sain siis tietoa kokoonpanovaiheen vaikeuksista, komponenttien sopivuudesta, vaikeista ja hankalista työasennoista ja –vaiheista.

### *Haastattelujen yhteenveto- suunnittelu ja toteutus*

Alla esitettävässä taulukossa 1 on tiivistetyt vastaukset suunnittelulle ja työn toteuttajille esitetyistä kysymyksistä. Kysymyksiä 2 allekkain, jolloin ensimmäinen on tarkoitettu työn suunnittelijoille ja toinen toteuttajille. Erilliset ja laajemmat kysymyspatterit suunnittelulle ja toteutukselle löytävät liitteistä.



Taulukko 1. Yhteenvedo haastatteluista.

	SUUNNITTELIJA	ESIMIES	HITSAAJA	KOKOONPANO
Vaativuusmäärittely ja lähtökohdat?	Runko selkeä, kevyt, helppo liitettävyyys	Putkirungon ja osien valmistustarkkuus.	20min	8t
Työvaiheen kesto?				
Miten toleranssiketjut on huomioitu?	Osien tulisi sallia putkelle muotovirhettä, liitettävien osien välinen tarkkuus, Hitsausjigi	Kts. edellä oleva vastaus.	Taivutettu putkirakenne kriittinen.	Kehän kiinnityspellin reikien paikoitus, Takometrin keskitysreikä.
Sarjatuotanto ja eräkkö?	Vuosikulutus noin 200-300 kpl.	Tuotantokapasiteetti riittävä, eräkkö putkirakenteille 20-30	Lämmöntuotosta johtuva putken taipuminen	Portin rakenteellinen suhde putkirakenteeseen. Moottorin asennus
Työvaiheen haasteet?				
Suurimmat muutokset ensimmäiseen prototyyppiin, valmistustehokkuus ja tuotannon ”pullon kaulat”?	Putken taivutustoleranssit. Ajatus putken toleranssien sallimisesta.	Putken valmistustarkkuusvaatimus suuri, sopiva eräkkö. Yksittäiset kappaleen hitsaus ei ole tehokasta, sarjakoon kasvattaminen auttaa.	Putken eläminen. Esikokoonpantu runko,	Ajantasalla oleva työohje, kokoamisjigi, osat yksi yhteen.
Työvaiheen kehittämisiideat?				
Kappaleen soveltuvuus robottihitsaukseen?	Robotilla saumat vakioituu. Vakio sauma varmaankin edellyttää vakio railoa, mitä perusajatuksen mukaan ei taideta saavuttaa.	Ei oikein sovellu, työvaiheen palo aika ei ole suuri verrattuna tuotteen muihin tarkistuksiin. Eräkoot pieniä. Pystyy tekemään, mutta kustannukset ovat suuremmat.	(Hitsauksen kokoonpano vaiheeseen putkirakenteeseen ja levyihin jonkinlainen nastoitus, helpottaisi esikokoonpanoa ja kappaleet olisivat aina kerrasta kohdillaan, ja hitsaus nopeutuisi)	Portin saranointi. Putken vääntymät vaikuttavat liikaa portin sulkeutumiseen, rungossa ei ole kaapelointien läpivientejä, hitsattu vaimennustappi puuttuu.
Suunnittelulliset kehittämisiideat?				

Yhteenvetona voitaneen sanoa, että kappaleen hitsauksen suurimmat haasteet niin suunnittelussa kuin tuotannossakin ovat putkirungon elämisessä, rungon taivutustarkkuudessa, sopivan eräkoon löytämisessä ja yksittäistenkin kappaleiden kustannustehokkuudessa.

### 5.5 Robotti- ja käsinhitsauksen kustannusvertailu

Alla olevassa vertailulaskelmassa verrataan robotin ja ihmisen suorittaman hitsauksen kustannuksia. Alkuarvoina on käytetty haastatteluista ja käsinhitsausanalyysistä saatuja tietoja ja arvoja.

Nämä laskelmat perustuvat siis tuotannollisiin tekijöihin, arvioihin, tuotantohenkilöstön haastatteluihin ja teoreettisiin tietoihin. Laskelman pohjana on LTY:n Esa Hiltusen laatima kaava Excel pohjalle, joka laskee laskelmat 1, 2 ja 3 taulukkoon 2 asetettujen arvojen perusteella. Kaaviot 4 ja 5 muodostuvat taulukon 2 arvoista. Laskelmaa käytetään, jotta saadaan vertailtua ihmisen ja robotin hitsauskustannuseroja.

Laskelmiin ei ole otettu huomioon suunnittelutyötä, ei käsinhitsauksen, eikä robottihitsauksen osalta. Robottihitsaus vaatii tarkempaa ja pidempi kestoista suunnittelutyötä. Taulukoihin koneiden vuotuisen käyttöaikaan on sijoitettu aika, jossa robotti ja toisessa taulukossa ihminen hitsaa vuotuisen tuotantotavoitemäärään eli 300kpl putkirunkoja. Yhdessä putkirungossa on hitsimetrejä 2,421 ja vuotuinen hitsimetrimäärä 300 kappaleen tuotannolla on 726,3m.

Taulukko 2. Robotti- ja käsinhitsauksen kustannusvertailu

#### *Robottihitsaus*

#### *Alkuarvot:*

umpilanka 1,2 mm	
seoskaasu 90 % Ar + 10 % CO <sub>2</sub>	
lisäaineen ostohinta	1 €/kg
suojakaasun ostohinta	2 €/m <sup>3</sup>
energian hinta	0,1 €/kWh
työtunnin hinta	12,5 €/h
koneen ostohinta	60000 €
koneen poisto aika	6 v
korkokanta	6 %

huoltokustannukset	1500 €/v
käyttöaika/v	18 h/v
kaariaikasuhde	0,75

*Arvioidaan hitsausarvoiksi*

hitsiainemäärä	0,1 kg/m	Taulukko 5, liite
hitsausvirta	254 A	
langansyöttö	11 m/min	Taulukko 4, liite
hitsiaineentuotto	5,4 kg/h	1,5x käsinhitsaus, Meuronen, 2011, s.11, taulukko 4
kaasunvirtaus	16 l/min	
hitsausnopeus	90,18 cm/min	
energian kulutus	3 kWh/kg	
lisäaineen hyötyluku	0,95	

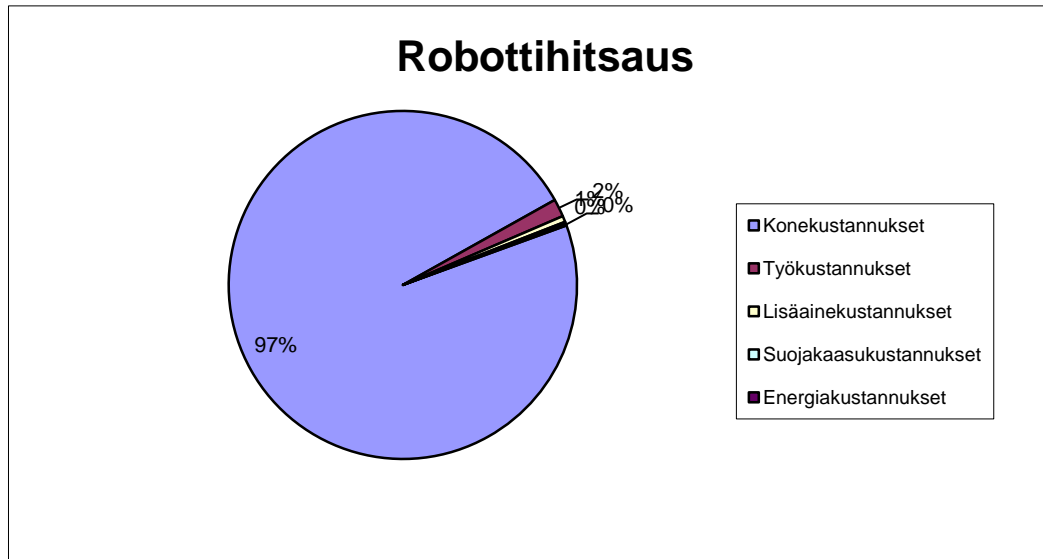
*Käsinhitsaus*

*Alkuarvot:*

umpilanka 1,2 mm	
seoskaasu 80 % Ar + 20 % CO2	
lisäaineen ostohinta	1 €/kg
suojakaasun ostohinta	2 €/m <sup>3</sup>
energian hinta	0,1 €/kWh
työtunnin hinta	25 €/h
koneen ostohinta	10000 €
koneen poisto aika	6 v
korkokanta	6 %
huoltokustannukset	200 €/v
käyttöaika/v	85 h/v
kaariaikasuhde	0,23

*Arvioidaan hitsausarvoiksi*

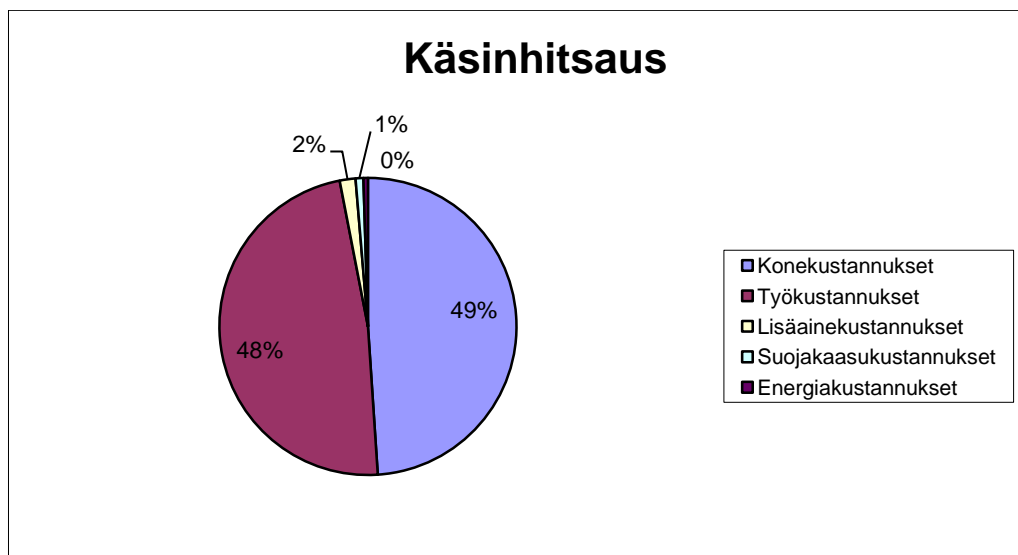
hitsiainemäärä (a3)	0,1	Taulukko 5 ja haastattelut, liite
hitsausvirta	250 A	
langansyöttö	3,4 m/min	Taulukko 4, liite
hitsiaineentuotto	3,695 kg/h	Taulukko 5
kaasunvirtaus	16 l/min	
hitsausnopeus	61,7065 cm/min	
energian kulutus	3 kWh/kg	
lisäaineen hyötyluku	0,95	



Kaavio 4 . Robottihitsauksen kulujen jakautuminen.

	Robotisoitu hitsaus	Käsinhitsaus
Konekustannukset	18,24	3,00
Työkustannukset	0,31	2,94
Lisäainekustannukset	0,11	0,11
Suojakaasukustannukset	0,04	0,05
Energiakustannukset	0,03	0,03
<b>KOKONAISKUSTANNUKSET</b>	<b><u>18,72</u></b>	<b><u>6,13</u></b>

Laskelma 1. Käsin- ja robotisoidun hitsauksen kustannusvertailu (€/m).



Kaavio 5. Käsinhitsauksen kulujen jakautuminen.

Alla olevassa vertailussa koneiden vuotuinen käyttöaika on robotilla 18h ja ihmisellä 85h, kun vuotuinen tuotantomäärä tavoite on 300kpl.

Teoreettisesti robotti tuottaisi vaaditun kappalemäärän 18 tunnissa, tämä tosin vaatisi tehokkaan tuotantolinjan ja FMS-järjestelmän ”ruokkimaan” robottia siten, että materiaalia olisi aina valmiina.

Robotti tekisi työn nopeammin ja olisi tämän jälkeen mahdollista valjastaa esimerkiksi jonkun muun tuotteen valmistukseen, työtunteja jäisi jäljelle vielä 67, jotta se olisi tehnyt yhtä kauan töitä kuin ihminen.

Laskelmien 1 ja 2 perusteella vuotuisen tuotantotavoitemäärän ollessa 300kpl, hitsausrobotti-investointi ei olisi kannattava. Robotin vuotuiset kustannukset olisivat kolminkertaiset.

	Tuotteessa	Vuodessa
Hitsimetrejä	2,421	726,3
Hitsausaika	Robottihitsaus	Käsinhitsaus
Per tuote		
(minuuttia)	3,58	17,06
Vuodessa (tuntia)	18	85
Hitsauskustannus		
€/kpl	<u>45,33</u>	<u>14,837</u>
€/v	13599	4451
Säästö(-)/Tappio		
€/v	<u>9148</u>	

Laskelma 2. 300 kpl:een tuotantotavoite.

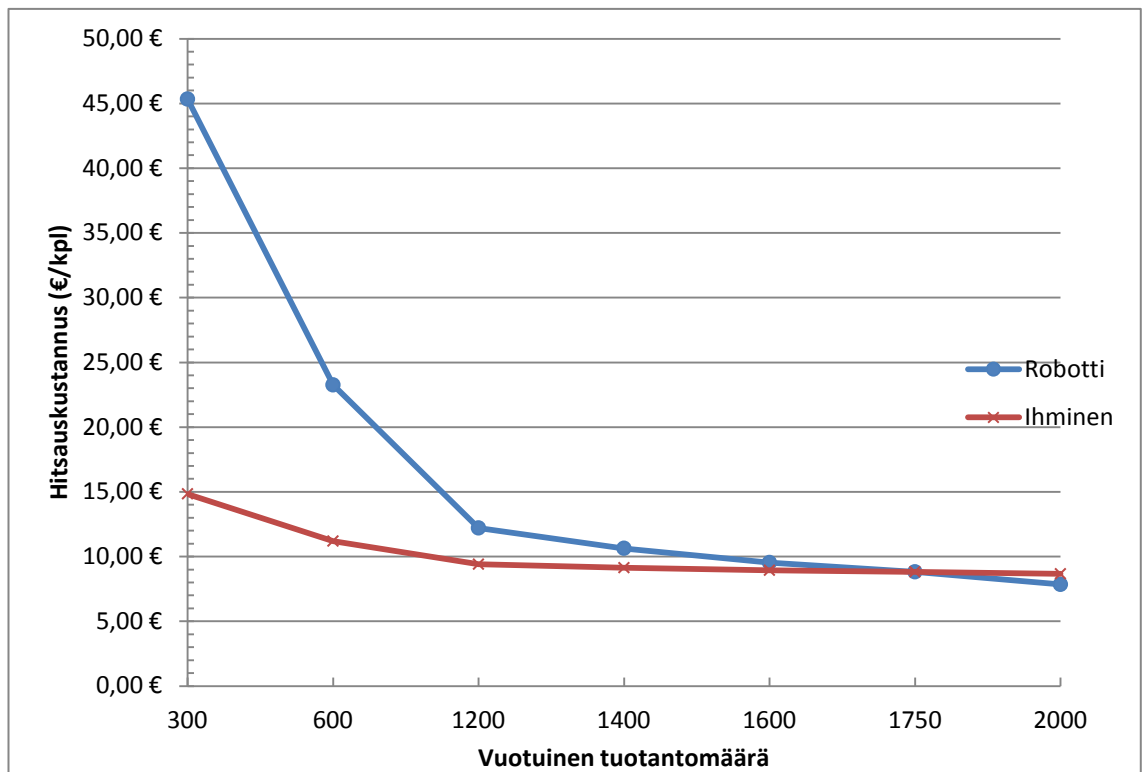
Kolmannessa laskelmassa arvot ovat muuten samat, mutta vuotuisaa robotin käyttöaika nostetaan siten, että robotille asetaan sama käyttöaika kuin ihmisen mig-hitsauslaitteella.

	Tuotteessa	Vuodessa
Hitsimetrejä	2,421	726,3
Hitsausaika	Robottihitsaus	Käsinhitsaus
Per tuote (minuuttia)	3,58	17,06
Vuodessa (tuntia)	18	85
Hitsauskustannus		
€/kpl	<u>10,51</u>	<u>14,837</u>
€/v	3154	4451
Säästö(-)/Tappio		
€/v	<u>-1297</u>	

Laskelma 3. Robottihitsauksella sama vuotuinen kuormitus (85h).

Avaintekijöiksi laskelmassa 3 nousee robotin eduksi nousee sen nopeus ja tehokkuus. Ajallisesti robotilla menee hitsaustyöhön 1/5 ajasta. Robotti hitsaisi tuotteet 18 tunnissa, jonka jälkeen se olisi valjastettava toiseen tuotannolliseen tehtävään. Robotin nopeudella on siis hyötynsä ja haittansa, putkirunkojen lisäksi se tarvitsisi muutakin hitsattavaa ollakseen kustannustehokas. Robotin ostohinnan jälkeen tulevat kulut ovat vain nimelliset. Kuluja syntyy mm. henkilöstön palkkaus- ja koulutuskustannuksista, sekä huolto- ja kunnossapitokustannuksista. (www.robots.com & Pemamek Oy, 2013)

Selvitetään kuinka paljon tarvitsisi vuotuinen hitsattujen putkirunkojen tuotantotavoite olla, jotta robottihitsaus olisi käsinhitsausta kannattavampaa. Seuraavalla sivulla kuviossa 2 on selvitetty taulukon 2 avulla, miten paljon vuotuinen putkirunkojen tuotantomäärä tarvitsisi olla, jotta robottihitsaus olisi kannattavaa.



Kuvio 2. Tuotantomäärän vaikutus kappalekohtaisiin hitsauskustannuksiin.

Kuvion 2 avulla selviää, että vuotuisen tuotantotavoitteen tulisi olla  $\geq 1750$  kappaletta, jotta robotihitsaus olisi käsinhitsaukseen verrattuna yhtä edullista tai halvempaa. 1750 kappaleen kohdalla robotilla olisi vuotuisia käyttötunteja kertynyt 104 ja käsinhitsaukselle 498.

### *Investointilaskelma*

Kuinka määrittää kannattavuus, nousee kysymykseksi robotisointia mietittäessä. Joustavan tuotantoautomaation perinteiset investointilaskelmat ovat hyvin kyseenalaisia seuraavin perustein; alun rahallisten panostusten hyödyt ovat takapainotteiset, riippuen lähivuosien myynnistä, muun tuotannon sopeutumisesta uuteen tuotannolliseen tilanteeseen ja laitteiston käyttöönoton nopeudesta.

Hitsausrobotin tuntihinnan määrittäminen ei ole yksiselitteistä, kuitenkin perinteistä kustannus/aikayksikkö (€/h) ei tulisi käyttää robotin kanssa. Sen sijaan voisi tarkastella valmistuskustannuksia (€/tuote) nykyisellä tuotantotavalla ja verrata sitä investointivaihtoehtoon koko suunnitellulla pitoajalla. Seuraavan esimerkki laskelman

menetelmä kuvaa enemmänkin investoinnin rahoitusvaikutuksia eikä kannattavuutta. Liitteessä 1 on selvitys laskelmissa käytetyistä komponenteista ja lyhenteistä. Investoinnin kannattavuusehto  $R_{\text{Lisäaineenkulutus}} - \text{Tavoite}_{\text{Lisäaineenkulutus}} \geq 0$ .

Takaisinmaksuaika(tavoite)	6	vuotta	n		
Korkokanta	6	%	i		
Perusinvestointi	60000	€	H		
Nykyarvotekijä	4,917	Ani		>Laskettu kaavasta	$(1+i)^n - 1$
Jäännösarvo	10000	€		Jan (arvio), tasapoistoa 16,6% joka vuosi	$i(1+i)^2$
Hitsaustunnin kustannus nyt	25	€/h		Kkh, haastattelu	
Vertailutyökustannus	26,53	€/h		$Kkh \text{ vert} = Kkh * 1,02^{(\frac{6}{2})}$	
Hitsausteho nyt	3,7	Kg/h		Taulukko 2	St käsin
Työtunnit/henkilö	384	h/vuosi		$Skäsityö = \frac{S}{Kkh \text{ vert}}$	
Säästötarve	10 176	€/v		$S = \frac{H - Jan / (1 + i/100)^n}{Ani}$	
Säästettävät miestyötunnit	384	h/vuosi			
Korvattavat miestyövuodet	0				
Robotisoitava lisäainemäärä	1420,8	kg/vuosi		Vaadittava vuotuinen lisäainekulutus	$Skäsityö * St \text{ käsin}$
Arvio vuotuiseksi lisäainekulutukseksi= 94,2 Kg (5,4kg/h*18 h/vuosi)				5,4 kg/h= robotin hitsausteho vertailulaskelmassa	
Näin ollen, $94,2 - 1420,8 \leq 0$ , joten asetetuilla reunaehdoilla investointi on kannattamaton.					

Laskelma 4. Investointilaskelma.

## 6. TULOSTEN POHDINTA

### 6.1 Putkirungon soveltuvuus robottihitsaukseen

Putkirunko on hitsauksellisesti erittäin haastava kappale. Putkirunkoon hitsattavat komponentit ovat kuitenkin yksinkertaisia, mutta robottihitsattavaksi haasteellisia komponenttien ja itse rungon pienen koon, lyhyiden hitsien ja ahtaiden välien vuoksi.

Kappaleen hitsauksen robotisoimiseksi tarvittaisiin muutakin kuin pelkkä hitsausrobotti. Käsinehitsauksessa hitsaaja itse kokoonpanee kappaleen hitsausjigiin, jonka jälkeen hän aloittaa hitsaamisen. Hitsausrobotti tarvitsisi näin ollen rinnalleen kappaleenkäsittelylaitteiston, voisiko robotin integroida FM-järjestelmään? Komponenttien puolesta tämä varmasti onnistuisikin, putkirunko pois lukien, koska kappaleet ovat muodoltaan sellaisia, että niitä olisi yksinkertaista esimerkiksi pinota makasiineihin, joista FM-järjestelmä tai toinen robottikäsi pystyisi tuomaan hitsausrobotille jalostettavaa materiaalia.



Nykyisen käsinhitsauksen muuttaminen robotisoiduksi hitsaukseksi vaatisi todennäköisesti myös pyörivän hitsausjigin, kappaletta hitsataan niin monesta suunnasta, että robotin kanssa synkronoitu pyörivä jigi voisi myös olla yksi toteutustapa. Kappaleen voi hitsata robotilla samanlaisena prosessina kuin käsinkin eli Mig-hitsauksena.

Robottihitsauksen kannalta on myös olennaista kappaleiden samanmuotoisuus, mittatarkkuus ja hitsien samankaltaisuus. Putkirungon valmistuksesta tuotantohenkilöstöä haastatellessani putkirunkoon hitsattavat komponentit ovat tarkkaan toleransseissaan, komponentit ovat keskenään kovin paljon samanmuotoisia ja kuvia 8 ja 12 tarkkaillessa huomaa hitsien olevan hyvin samanlaisia. Tämä on robottihitsauksessa hyvin olennaista. Mitä vähemmän erilaisia hitsejä, sitä nopeampaa robotin ohjelmointi on. Parametrikokeet vähenevät ja samoin käy parametritaulukoille, ja näin ollen ohjelmointi nopeutuu. Robottihitsaus vaatii myös enemmän tilaa verrattuna käsinhitsaukseen, ja kuvaamassani tuotantopisteessä olisi kyllä tilaa robottisolulle, jos työaseman lay-outti järjestettäisiin uudelleen.

## **6.2 Käsinhitsausanalyysin tulosten tulkinta ja kehittämisideat**

### *Hitsausta sisältävien työvaiheiden jakautuminen*

Kaavion 1 perusteella hitsausta sisältävien työvaiheiden eli työvaiheen, joissa hitsilanka palaa prosessin hukkaprosentti on 58. Vajaa kolmasosa, 31 % on jalostavaa työtä, eli työtä, jossa putkirungon jalostusarvo nousee. 10 % on tarpeellista, eli työtä joka on tehtävä ennen kuin kappaleen jalostaminen on mahdollista. Kaaviossa 1 on myös luokittelematon työvaihe, joka johtui työvälineen eli Mig-hitsauslaitteen suuttimen tukkiutumisesta, luokittelemattoman osuus hitsausta sisältävien työvaiheiden jakautumisesta oli 2 %.

### *Koko tuotantoprosessin jalostavuus*

Kaaviossa 2 on esitetty koko hitsausprosessin jalostavuus. Hukkaprosentti laskee koko tuotantoprosessin kaaviossa 58:sta 56:een. Koko prosessin tarpeellisen prosentuaalinen osuus nousee 10:stä 20:een. Jalostavuus prosentti sen sijaan laskee koko

tuotantoprosessissa 31:stä 23:een. Koko hitsausprosessista luokittelemattoman osuus on 1 %.

Kummankin kaavion suurehkot hukkaprosentit tulevat lyhyestä hitsausajasta, tarpeellisesta kokoonpanosta ennen hitsausta ja niin hitsaajan siirtymisistä kuin hitsattavan kappaleenkin siirtämisistä.

#### *Fyysisen rasituksen jakautuminen eri työvaiheiden kesken*

Tämän opinnäytetyön tuloksena saatiin myös yksityiskohtaista tietoa putkirungon hitsausprosessin tämänhetkisestä fyysisestä rasituksesta. Fyysinen rasitus analysoitiin Avix-method ohjelmistolla.

Analysoinnin tuloksena kaaviosta 3 käy ilmi, miten fyysiset ponnistelut ovat jakautuneet työvaiheiden kesken. Kaaviota 3 tarkasteltaessa huomataan kahden työvaiheen rasittavan tuotantotyöntekijää kaikista eniten. Työvaiheet kokoonpano ja ensimmäinen hitsaus.

Kokoonpanovaiheessa hitsaaja joutuu kävelemään paljon, kyykistymään, taivuttamaan keskivartaloaan sekä käyttämään voimaa. Ensimmäisessä hitsauksessa hitsaajan fyysiset rasitukset johtuvat myös siirtymisistä, käsien venytyksistä sekä keskivartalon taivuttamisesta.

#### *Kehittämisideat*

Kehittämisideat koskevat kappaleen nykyistä valmistusmenetelmää.

Suurehkoa hukkaprosenttia saisi alennuttua monella tapaa. Kuitenkin yksi olennaisesti koko hitsausprosessia lyhentävä ja hukkaprosenttia pienentävä muutos olisi työpisteen layoutin uudelleensuunnittelu. Videoavusteisen analyysin perusteella suurimmat hukkavaiheet tulevat siirtymisistä. Videolla komponentteja noudetaan kokoonpanovaiheessa useaan otteeseen kuormalavalta, joka on maassa.

#### *Komponenttikärry ja kääntävä jigi*

Siirtymisien vähentämiseksi hitsaajan tulisi pysyä enemmän paikallaan ja komponenttien tulisi olla lähempänä, käden ulottuvilla. Yhtenä vaihtoehtona voisi olla

liikkuva komponenttikärry, jonne kokoonpanoon tarvittavat komponentit olisivat ladottuna valmiiksi omiin ”makasiineihinsä”. Toisena uutena ratkaisuna voisi olla kääntyvä jigi, jolloin hitsausvaiheetkin olisi vain yksi kahden sijaan. Putkirunkoa ei tarvitsisi siirtää toiseen työpisteeseen hitsauksen viimeistelemiseksi.

### *Esikokoonpano*

Koko hitsausprosessin nopeuttamiseksi tulisi mielestäni myös miettiä ratkaisua, jossa useita putkirunkoja olisi esikokoonpantu jo valmiiksi ja näin ollen suoritettaisiin useamman kokoonpanon hitsaus samalla kertaa, kaariaikasuhte nousisi varmasti.

### **6.3 Henkilökohtaiset haastattelut**

Aikaisemmin työssä esitetty taulukko 1, sisältää kysymyksiä, joiden avulla yritin saada mahdollisimman hyvän yleiskuvauksen putkirungon teknisistä vaatimuksista, haasteista ja robotisoidun hitsauksen kannattavuudesta.

Laskelmien perusteella tämän hetkisen tuotantotavoitteen ja – tarpeen putkirungoille ollessa 200–300 kpl:lta vuodessa, on robotisoitu hitsaus kannattamaton investointi. Kokoonpanohitsausten määrän noustessa huomattavasti tai robotin valjastaminen muuhunkin tuotantoon lisäisi robotisoinnin kannattavuutta kuten laskelma 3 osoittaa. Yksinomaan putkirungon kokoonpanohitsaukseen robotti ei olisi optimaalinen ratkaisu sen tuotantopotentiaalia mietittäessä.

Suhteellisen suuren investoinnin lisäksi tulisivat putkirunko ja siihen kokoonpantavat komponentit myös suunnitella uudelleen robottihitsattaviksi. Robottivalmisteiset tuotteet vaativat enemmän ja tarkempaa suunnittelua, ja näin ollen investointi nykyiselle tuotantotarpeelle olisi kannattamaton. Laskelmat 1, 2 ja 4 ovat robotisointia vastaan. Laskelma 3 tulos on robotisoinnin kannalla, mutta ei vastaa tämän hetkistä robotille suunniteltua kuormitusta, vaan vuotuinen käyttöaika on huomattavasti suurempi, joten sekin osoittaa robotisoinnin olevan kannattamaton tämän hetkiseen tuotantomäärään verrattuna.

## 6.4 Laskelmat

Laskelmassa 1, robotisointi olisi kannattamatonta. Erot tulevat kone- ja työkustannuksista, jolloin hitsauskustannukset metriä kohti (€/m) olisivat robotisointia vastaan. Alkuinvestoinnin jälkeen robotin työkustannukset ovat murto-osan ihmisen työkustannuksista. Lisäksi mietittäväksi tulee, että miten nopeasti robotti saataisiin tuotantovarmaksi ja miten sen huomattavasti suurempi tuotantopotentiaali saataisiin valjastettua muuhunkin tuotantoon. Alun suurten työvoimallisten ja rahallisten panostusten hyödyt ovat hyvin takapainotteiset. Robotilla tulisi olla enemmän käyttötunteja tai suurempi tuotantomäärä  $\geq 1750$  kpl/v, kuten kuvio 2 osoittaa, jotta kappalekohtaiset hitsauskustannukset olisivat robotisoidussa hitsauksessa pienemmät kuin käsinhitsauksessa.

Laskelman 2 perusteella robotisointi olisi myös kannattamaton. Laskelmassa 2 robotin kappalekohtaiset hitsauskustannukset ovat kolminkertaiset käsinhitsaukseen verrattuna.

Laskelmassa 3 robotisointi olisi kannattava, mutta laskelma ei vastaa tämän hetkistä tuotantotarvetta, vaan robotin käyttötunnit ovat ylimitoitettut. Laskelman 3 tarkoituksena on enemmänkin osoittaa millaisen vähimmäis- käyttöajan robotti tarvitsisi ollakseen putkirungon hitsauksessa kustannustehokas. Käsinhitsaus laskelmat ovat tarkemmat ja tämän hetkisessä valmistusmenetelmässä on paljon kehitettävää, joten robotin saavuttama etu laskelmassa 3 jäisi todennäköisesti vielä laskettua pienemmäksi. Laskelma 3 ja kuvio 2 antavat suuntaa siitä, miten paljon enemmän vuotuinen tuotantomäärä ja robotin vuotuinen käyttöaika tulisi olla, jotta robotisointi olisi kannattavaa.

Viimeisessä laskelmassa 4, laskelmasta saatu tulos on robotisointia vastaan, robotilla ei ole tarpeeksi vuotuisia työtunteja, jotta investointi olisi kannattava.

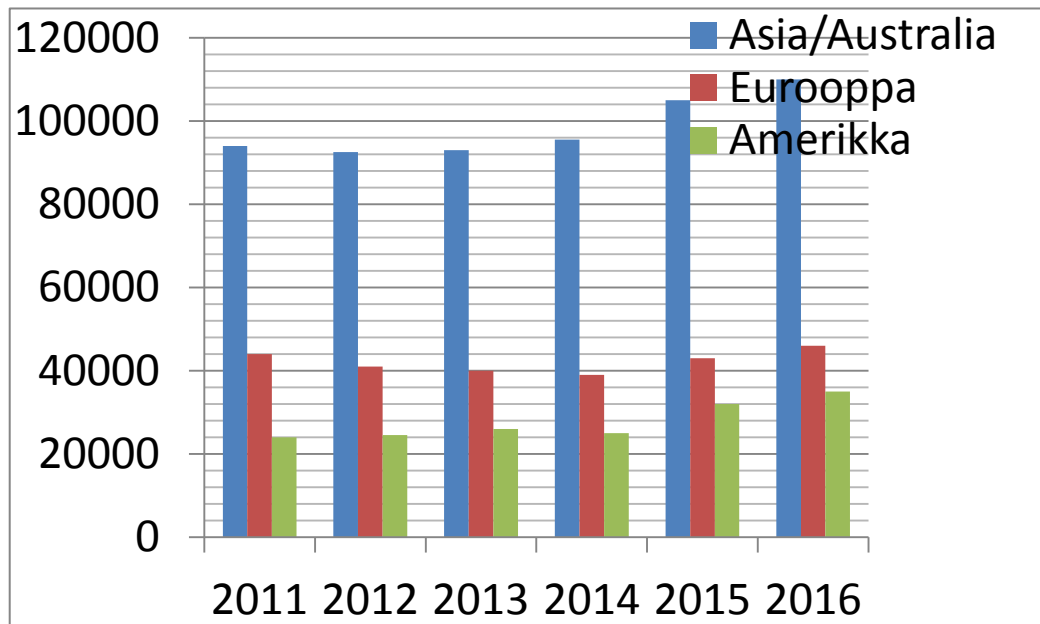
Robotti-investoinnin tuottavuutta ja kannattavuutta tulisi tarkastella hyvin monelta kantilta ja tulevaisuutta silmällä pitäen, pelkät laskennalliset mittarit eivät anna todenmukaista kuvaa robotisoinnin kannattavuudesta. Tuotannollisesti moitteitta toimiva hitsausrobotti peittoaa ihmisen helposti tuotantokapasiteetissä, mutta robotti-investoinnin suunnittelutyö ja sen tuotantopotentiaalin saavuttaminen ovat aikaa vieviä projekteja.

Tulevaisuutta silmällä pitäen tulisi miettiä, miten esimerkiksi ihmisten työvoimakustannukset tulevat muuttumaan, onko tulevaisuudessa saatavuus käsityöllä taattu? Entä robotit, miten energiakustannukset tulevat muuttumaan? Riittääkö käsityö tulevaisuuden tuotantokapasiteetiksi?

Robotisoinnin kannalta ajateltuna lopputuotteet olisivat tasalaatuisempia, sivutyöajat tippuisivat muissa tuotantovaiheissa. Toki robotisoinnilla olisi myös operaattoreille ergonomisia vaikutuksia. Raskas tuotanto ja teollisuus altistavat myös jossain määrin sairauspoissaoloille, varsinkin jos työturvallisuus ja –ergonomia eivät ole kunnossa. Työpaikan miellyttävyys voisi myös kohentua, robotit tekisivät raskaimmat työt ja kokeneemmat hitsarit voisi esimerkiksi valjastaa vaativamman uuden tuotteen suunnitteluun ja testauksiin, töihin, joissa tarvittaisiin ajattelua ja ammattitaito pääsisi oikeuksiinsa.

Robotin ovat yleistymässä teollisuuden jokaisella alalla, jokaisella mantereella, kilpailukyvyyn säilyttämiseksi ja tuotantomäärän noustessa tulevaisuudessa tulisi tosissaan miettiä robotti-investointia. Putkirungon kokoonpanohitsauksen robotisointi ei kuitenkaan ole tämän hetkisen tuotantomäärän perusteella kannattavaa. Kuitenkin tulee muistaa robottien monimuotoinen hyödyntäminen, uusien tuotantovaiheiden tai tuotteiden myötä, robotille tarjottavan vuotuisen työmäärän noustessa robotisoinnin kannattavuuden uudelleen arviointi.

Seuraavaksi esitettyssä kuviossa 3 on esitetty teollisuusrobottien tulevaisuuden määrän kasvu.



Kuvio 3. Ennuste teollisuusrobottien määrän kasvusta. (www.industrial-robots.com, 2013)

## 7. YHTEENVETO

Tutkimuksen tarkoituksena oli nähdä, miten hitsaus suoritetaan Stera Oy:ssä tällä hetkellä, ja saada käsitys siitä, olisiko prosessin automaatiotason kehittäminen ja robotisoituun hitsaukseen tarvittavat investoinnit kannattavia. Lisäksi haluttiin myös selvittää nykyisen tuotantomenetelmän tehokkuus sekä tapa, jolla työergonomiaa voisi parantaa. Työn teoria osuus koostui piensarjatuotannosta, robotiikasta ja robottihitsauksesta.

Työn tuotoksina saatiin myös yksityiskohtaisempaa tietoa yksittäisistä työvaiheista, niiden tehokkuudesta, kehittämistarpeista, työn fyysisistä ja psyykkisistä rasituksista ja tämän hetkisen prosessin tehokkuudesta.

Työn käytännön osuudessa perehdyttiin nykyiseen tuotantomenetelmään ja tuotantoaikoihin. Hitsausprosessi analysoitiin Avix-method ohjelmistolla, jolla saatiin yksityiskohtaista tietoa hitsausprosessin tuotantovaiheista, -ajoista ja fyysisistä rasituksista.

Robotisoidun hitsauksen lähtökohtia selvitettiin tekemällä muistilista, josta kävi ilmi putkirungolle tärkeimmät mitta- ja muototoleranssit.

Robotisoinnin kannattavuuden ja tuotantoketjun haasteiden selvittämiseksi haastateltiin myös suunnittelu- ja tuotantohenkilöstöä, mitkä olivat heidän näkemyksensä nykyisistä haasteista ja robotisoinnin kannattavuudesta.

Robotisoinnin kannattavuuden arvioimiseksi tehtiin kustannusvertailulaskelma ihmisen ja robotin tekemälle hitsaustyölle €/m ja €/kpl, tuotantotavoitelaskelma (300 kpl/v), sekä laskelma, jossa robotilla oli yhtä suuri vuotuinen käyttöaika kuin käsinhitsauksella sekä investointilaskelma.

Laskelmat osoittautuivat robotisoinnin kannattavuuden vastaisiksi. Kuitenkin käsintehtäviin hitsauksiin saatiin huomattavasti tarkemmat lähtötiedot ja robotisoinnin laskelmat perustuivat enimmälti arvioihin ja teoriapohjaisiin tietoihin, joskin ne ovat mielestäni hieman optimistisia.

Robotisoinnin kannalta saatiin uusia näkökulmia automaatiotason kehittämisestä, sekä näkemyksiä siitä, miten tehokas nykyinen tuotantomalli on ja millaisella vuotuisella tuotantomäärällä robotisointi olisi kannattavaa. Insinööriyöni tavoitteet täyttyivät kaikilta osin ja työ kokonaisuutena onnistui hyvin.

Ongelmakohdaksi insinööriyössäni koin tiedon kokoamisen mahdollisimman yhtenäiseksi paketiksi. Opin katsomaan asioita uusista ja erilaisista näkökulmista, kun tietoa piti yhdistellä ja sen jälkeen soveltaa käytännössä. Tuotteen tuotantomenetelmän modernisoinnissa on matkan varrella hyvin monta työvaihetta, jotka kaikki yksityiskohtineen tulisi huomioida automaatiotasoa kohotettaessa.

Koin insinööriyöni onnistuneeksi ja toivon, että tätä insinööriyötä avuksi käyttäen tulevaisuudessa mietittäisiin tosissaan muitakin tuotantovaiheita, joissa robottia voisi mahdollisesti käyttää, ja näin ollen robotin vuotuinen käyttöaste voisi nousta kannattavalle tasolle.

Järjestelmällisen suunnittelun jälkeen mielestäni seuraavana käytännössä toteuttava insinööriyö pitäisi sisällään, joko erilaisia robotisoitavia tuotantovaiheita,

robottihitsauksen koeajoja tai simuloitteja robottihitsauksen todellisen tehokkuuden selvittämisessä putkirunkojen piensarjatuotannossa.

Lopuksi haluan kiittää kaikkia, jotka olivat osallisena tässä insinööriyössä. Erytiskiitokset Stera Oy:n Risto Merolle, Haloila Oy:n suunnittelijalle Yrjö Suolahdelle, kokoonpanijalle Mikko Vähätalolle ja Juha Vanhaselle, joka vastaa insinööriyöstäni toimeksiantajan puolelta. Erytiskiitos myös ohjaajalleni Ari Putkoselle.

## 8. LÄHTEET

Kuivanen, Robotiikka, 1999, Vantaa. Suomen Robotiikkayhdistys ry. Talentum Oyj

Billing, M. 2012. Tampere. Oppimisympäristö robotiikan ja etäohjelmoinnin opetukseen. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö, konetekniikan koulutusohjelma.

Aalto, H., Heilala, J., Hirvelä, T., Kuivanen, R., Laitinen, M., Lehtinen, H., Lempiäinen, J., Lylynoja, J., Renfors, J., Selin, K., Siintoharju, T., Temmes, J., Tuovila, T., Veikkolainen, M., Vihinen, J., Virtanen, A., Robotiikka, Suomen robotiikkayhdistys ry., 1999, ISBN 951-9438-59-9, 188s.

Cary, B. H. & Helzer. S. C. 2005. Modern Welding Technology. 715 s.

Martikainen, J. 2008. Hitsaustekniikan jatkokurssi. Luentomoniste, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 213 s.

Kemppi kotisivut, 2013, viitattu 6.6.2013, saatavana <<http://www.kemppi.com/inet/kemppi/contman.nsf/Print/5E8AE7333A82609DC225718E0021E652?OpenDocument>>.

Hiltunen ,2005, Hitsausrobotit – langattomuutta ja laaduntarkastusta, Hitsaustekniikkalehti, (6).

Hiltunen, 2009, Robottihitsaus, Hitsaustekniikka-lehti, (6).

Grönlund, 1985, Hitsaustekniikka, s.7.

Hiltunen, E. 2005. Hitsauksen automatisointimahdollisuuksien huomiointi. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 34 s.

Lempiäinen, J. & Savolainen, J. 2003. Hyvin suunniteltu – puoliksi valmistettu. Helsinki, 180 s.

Meuronen I, 2011, Tuottavuuden parantaminen robottihitsauksella – keinoja kilpailukyvyyn kasvattamiseksi, Hitsaustekniikka-lehti, (3).



Hiltunen E, 2005, Hitsaustekniikkaa suunnittelijoille, Hitsauksen automatisointimahdollisuuksien huomiointi, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Hiltunen, E. & Naams, I. 2000. Robottihitsauksen faktat ja fiktiot Suomessa. Hitsaustekniikka 5/2000. 20–23 s.

Kemppi kotisivut, 2013, viitattu 15.8.2013, saatavana  
<[http://www.kemppi.com/inet/kemppi/fi/akp.nsf/frameset/frameset?OpenDocument&left=/inet/kemppi/fi/akp.nsf/WEB\\_Nav?OpenView&navcat=WeldingABC&main=/inet/kemppi/contman.nsf/0/5EA64CEDFF42FC30C225718D003E66A7?opendocument&top=/inet/kemppi/fi/akp.nsf/Top?ReadForm&topcat=WeldingABC](http://www.kemppi.com/inet/kemppi/fi/akp.nsf/frameset/frameset?OpenDocument&left=/inet/kemppi/fi/akp.nsf/WEB_Nav?OpenView&navcat=WeldingABC&main=/inet/kemppi/contman.nsf/0/5EA64CEDFF42FC30C225718D003E66A7?opendocument&top=/inet/kemppi/fi/akp.nsf/Top?ReadForm&topcat=WeldingABC)>

Lempiäinen, J. & Savolainen, J. 2003. *Hyvin suunniteltu - puoliksi valmistettu*.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K. H. 2007. *Engineering Design*.

Latokartano J, 2011, Luentomateriaali. Teollisuus robotiikan perusteet. Robottihitsauksen asiantuntijakoulutus, kurssi 5. Lappeenranta. s.14-23.

Hiltunen E, 2011. Luentomateriaali. Hitsauksen robotisointi ja robottihitsausjärjestelmä. Robottihitsauksen asiantuntijakoulutus, kurssi 5. Lappeenranta. s.20-28.

Reunanen T, 2011, Nollapistekiinnitys teknologioiden soveltaminen ja robotisoitu panostus, Panoste-projektin julkaisu ¼, Turku, s.10-11.

Häkkinen, K., Pötry, J. ja Joutsen P. 2003. Konepajateollisuuden alihankintaprosessien kehittämisedellytykset ja -tavat pk-sektorilla. Loppuraportti. Viitattu 10.10.2013, saatavana  
<[www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2190.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2190.pdf)>

Avixin kotisivut, 2013, viitattu 15.7.2013, saatavana <<http://www.avix.eu/index.php?id=36&L=1>>.

Suolahti Y., Mero R., Vähätalo M. ja hitsaaja, 2013. Henkilökohtaiset haastattelut. Haloila ja Stera Oy.

Pemamek Oy, 2011, Luentomateriaali.

Robot works kotisivut, 2013, viitattu 20.10.2013, saatavana <<http://www.robots.com/robots>>.

## KUVIEN LÄHTEET

Haloila, 2013, suunnittelu-osasto, komponentti-, ja kokoonpanokuvat.

Teollisuusrobotti vaihtaa kappaletta työstökoneeseen, viitattu 15.7.2013, saatavana  
<[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:5-Achsen\\_Bearbeitungszentrum.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:5-Achsen_Bearbeitungszentrum.jpg)>.

Nivelvarsirobotti akseleineen, viitattu 16.7.2013, saatavana <[www.yaskawa.co.jp](http://www.yaskawa.co.jp)>.

Railon seurantajärjestelmien jakautuminen, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2011, robottihitsauksen asiantuntijakoulutuksen luentomateriaali, kurssi 4.

Rakenteen hitsattavuus, Grönlund E, 1985, Hitsaustekniikka, s.7.

Stera Oy, 2013, Tuotanto.

Ennuste teollisuusrobottien määrän kasvusta, viitattu 10.11.2013, saatavana <[www.ifg.org/industrial-robots/statistics/](http://www.ifg.org/industrial-robots/statistics/)>.

## Robotisointiprojektin investointilaskelman selvitykset

Kulut (=perusinvestointi, H, jäljempänä esitetyissä laskelmissa)

Tyypillinen laskennassa käytetty takaisinmaksuaika on 3-7 vuotta. Tämänkin jälkeen laitteiston arvo ei ole nolla. Tässä esimerkkitapauksessa on käytetty 16,6 % tasapoistoa per vuosi.

Nykyarvomenetelmän sovellus:

1) Määritellään

- Laskentakorkokanta, **i (%)**, **6 %**
- Takaisinmaksuaika(tavoite), **n** (vuosia) **6**
- Perusinvestoinnin suuruus, **H (€)** **60 000€**
- Investoinnin jäännösarvo takaisinmaksuajan jälkeen, **Ja<sub>n</sub> (€)** **10 000€**, arvio
- Jaksollisten maksujen nykyarvotekijä (i:n ja n:n funktio), **a<sub>ni</sub> (-)** **4,917**, laskettu kaavasta  $\frac{(1+i)^n-1}{i(1+i)^2} = \frac{(1+0,06)^6-1}{0,06(1+0,06)^2} = 4,917$

2) Käytetään alla olevaa kaavaa, josta selviää vuotuinen säästötarve, **S (€/vuosi)** **10 176,11€/v**

$$S = \frac{[H - J a_n / (1 + i/100)^n]}{a_{ni}}$$

$$S = \frac{((60000 - 10000 / (1 + \frac{0,06}{100})^6)}{4,917} = 10\,176,11 \text{ €/v}$$

Kaava 1. vuotuinen säästötarve

Nykyarvomenetelmän sovellus:

3) Säästötarpeen oletetaan syntyvän vähentyneistä hitsauskäsityövoimakustannuksista.

- Määritellään hitsauksen nykyinen vuotuinen työvoimakustannus, **K<sub>kh</sub> (€/h)** **25€/h**, sähköpostihaastattelut Juha Vanhasen kanssa.
- Lasketaan robotin tuleva työvoimakustannus **K<sub>kh vert</sub> (€/h)** **26,5302 €/h**,  $25 \times 1,02^{(6/2)}$
- Vuotuiset työvoimakustannukset kasvavat esim. **2 % / vuosi** ----> lasketaan takaisinmaksuajalle arvio keskimääräisestä työvoimakustannuksesta:

- $K_{kh \text{ vert}} = K_{kh} * 1,02^{(6/2)}$
- Lasketaan vuotuinen työtuntien säästötarve,  $S_{\text{käsityö}}$  (h/vuosi), joka saavutettava, jotta investointi olisi kannattava\*

$$S_{\text{käsityö}} = \frac{S}{K_{kh \text{ vert}}}$$

$$S_{\text{käsityö}} = \frac{10\,176,11 \text{ €/v}}{26,5302 \text{ €/h}} = 383,56 \text{ h/v, } 384 \text{ h/v}$$

Kaava 2. Työtuntien säästötarve

- 4) Lisäaineellinen hitsaus (MIG/MAG, FCAW, SAW):

Lasketaan nykyinen keskimääräinen lisäaineen sulatusteho  $St_{\text{käsin}}$  (Kg/h), 3,7 kg/h, Taulukko 2

Nykyarvomenetelmän sovellus:

- 5) Lasketaan robotilta vaadittava vuotuinen lisäaineenkulutus:

$$Tavoite_{\text{lisäaineenkulutus}} = S_{\text{käsityö}} * St_{\text{käsin}} \quad 384 \times 3,7 \text{ kg/h} = 1420,8 \text{ kg/v}$$

- 6) Arvioidaan robotille siirrettävä vuotuinen lisäaineenkulutus \*,  $R_{\text{Lisäaineenkulutus}}$  (Kg/vuosi)  $18 \text{ h/v} \times 5,4 \text{ kg/h} = 94,2 \text{ kg/v}$

\*Työkaluna esimerkiksi hitsattavuusanalyysit, taulukosta 2.

Investoinnin kannattavuusehto:

$$R_{\text{Lisäaineenkulutus}} - Tavoite_{\text{Lisäaineenkulutus}} \geq 0$$

→Annetuilla reunaehdoilla (6 vuotta, 6 % etc.) investointi on kannattamaton.

Taulukko 3. Tuontomäärän vaikutus hitsauskustannuksiin (€/Kpl).

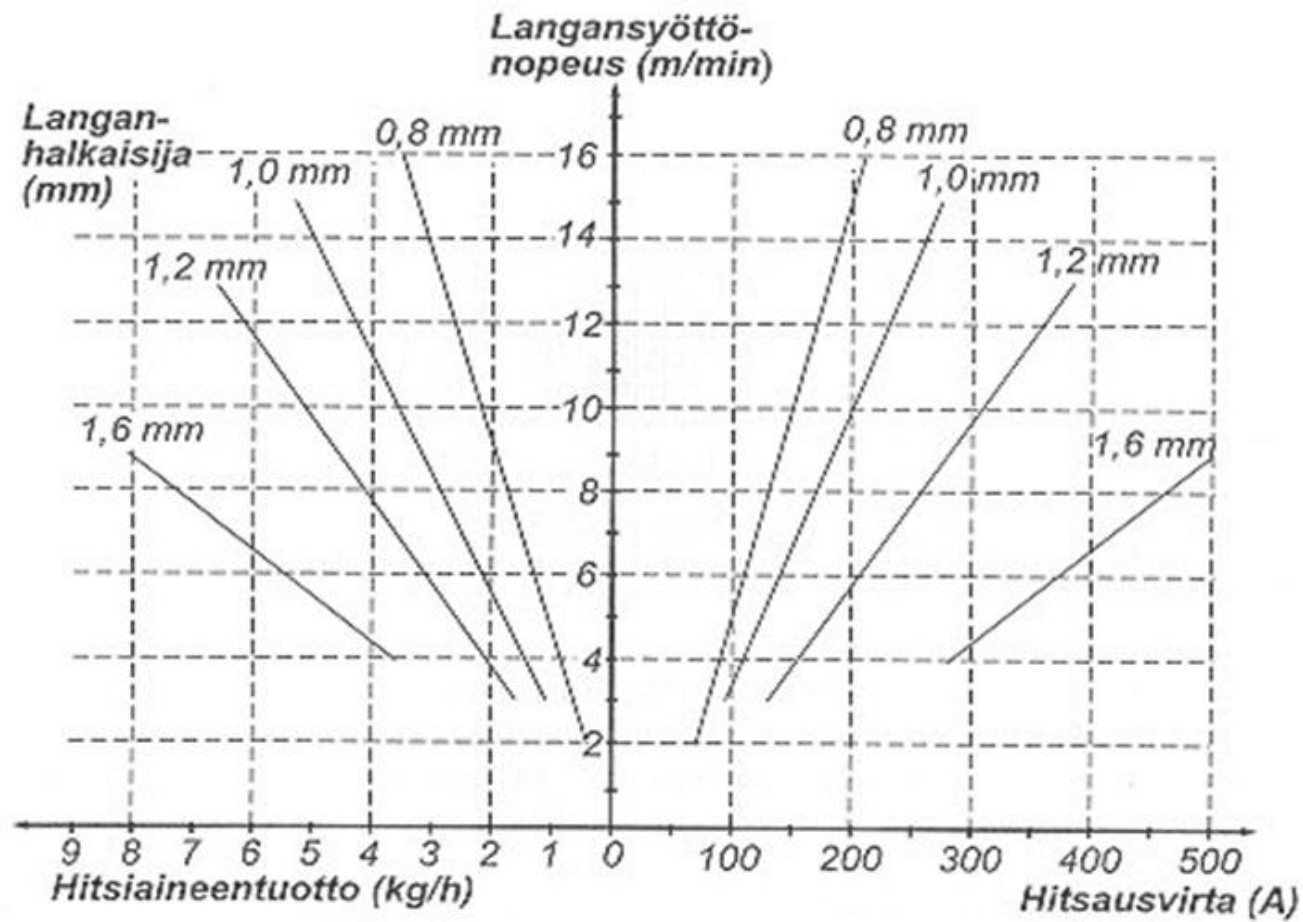
kpl	Robotti	Ihminen
300	45,33	14,837
600	23,25	11,185
1200	12,2	9,4
1400	10,63	9,13
1600	9,53	8,93
1750	8,81	8,8145
2000	7,84	8,66

	Suunnittelija	Tuotannon esimies
Vaatimusmäärittely ja lähtökohdat?	Ensimmäisessä prototyyppi rungossa(levypalkki rakenne) oli jäykkyysoongelma, päädyttiin putkirunko, rakenteeseen, jossa; selkeä perusrunko, keveys, helppo liitettävyys (hitsaus).	Putken valmistus- eli taivutustarkkuus, vetely otettava huomioon saumojen sijainnissa ja määrässä, putken ja muiden osien valmistustarkkuus siten, ettei se johda suuriin käsityötunteihin.
Toleranssiketjut suunnittelusta-kokoonpanoon ja valmiiseen tuotteeseen, miten on huomioitu?	Osien tulisi sallia putkelle muotovirhettä, mutta silti liitettävien osien välinen tarkkuus tulisi olla kohdillaan (hitsausjigi.)	kts. edellä oleva vastaus
Millaista sarjatuotanto lähtökohtaisesti on suunniteltu? Eräkkö?	Vuosikulutus noin 200–300 kpl.	Tuotanto kapasiteetti riittävä, sopiva eräkkö taivutetuille putkirakenteille n.20-30kpl.
Keskeisimmät muutokset ensimmäiseen prototyyppi runkoon, mitä ei osattu huomioida? Tuotannon ”pullon kaulat” ja valmistustehokkuus?	Putken taivutustoleranssit ovat tuottaneet ongelmia, ajatus putken toleranssien sallimisesta pitää ehkä ottaa uudelleen käsittelyyn.	Putken valmistustarkkuusvaatimus on suuri, sopiva eräkkö auttane tähänkin. Yksittäiset kappaleen hitsaus ei ole tehokasta, mutta sarjakoon kasvattaminen auttaa, jolloin työmaa on järjesteltävä oikein.
Oma näkemys kappaleen soveltuvuudesta robotihitsattavaksi?	Robotilla saumat vakioituvat, tämä hyvä. Vakio sauma varmaankin edellyttää vakio railoa, mitä perusajatuksen mukaan ei taideta saavuttaa.	Ei oikein sovellu, työvaiheen palo aika ei ole kovinkaan suuri verrattuna tuotteen muihin tarkistuksiin. Eräkoot pieniä. Pystyy tekemään, mutta kustannukset ovat suuremmat.

	Hitsaaja	Kokoonpanija
Työvaiheen kesto?	20min	8t
Työvaiheen haasteet?	Lämmöntuotosta johtuva putken taipuminen on työvaiheen ykköshaaste. (Hitsausjärjestys ja koko hitsaustyövaiheen standardointi,tulisi aina tapahtua samalla tavalla, jotta myös lopputuote olisi samanlainen.) Haasteellinen kappaleen muodon ja muodonmuutosten takia.	Portin rakenteellinen suhde putkirakenteeseen, millien heitto aiheuttaa jopa putkirungon työstöä. Moottorin asennus on hankala.
Työpisteen layout ja parannusehdotukset	- (Hitsattavat kappaleet ja käytettävät työkalut esimerkiksi kärryyn, jotta säästytään kulkemiselta ja lattialta nostamiselta. Kummatkin hitsaukset samassa työpisteessä, Hitsausjiginä voisi toimia pyörivä pöytä, jotta hitsaajan ei tarvitsisi kulkea, vaan olisi paikallaan ja pöytä pyörisi.)	Nosturi ja kokoamisjigi auttaisivat kokoonpanoa.
Onko työohje ajan tasalla?	Alkutekijöissä (Muokkautuu valmistettavan kappaleen mukaan).	Varsinaista työohjetta ei ole, asennusjärjestyksen vakiointi auttaisi työn standardoinnissa..
Suunnittelulliset kehittämissideat	- (Hitsauksen kokoonpano vaiheeseen putkirakenteeseen ja levyihin jonkinlainen nastoitus, helpottaisi esikokoonpanoa ja kappaleet olisivat aina kerrasta kohdillaan, myös hitsaus nopeutuisi ku hitsaajan ei tarvitsisi keskittyä kappaleen paikallaan pitämiseen.)	Portin saranointi liian heppoinen, Portissa ei ole minkäänlaista säätöä, putken vääntymät vaikuttavat liikaa portin sulkeutumiseen, rungossa ei ole kaapelointien läpivientejä,hitsattu vaimennustappi puuttuu.
Komponenttien toleranssit ja sopivuus	Ei vaihteluja. Taivutettu putkirakenne kriittinen, jos heittoa, vaikeuksia sovittaa jopa jigiin.	Kehän kiinnityspellin reikien paikoitus, ei kohdillaan. Takometrin keskitysreikä.
Työasennot ja -turvallisuus	Muutamia nostaja lukuun ottamatta ei räsistä tai turvallisuusriskejä. (Avix video-analyysissä näkyi useita kumartumisia,taivutuksia,venytyksiä,kävelemistä,voimankäyttöä ja nostoja, kaikki tällaiset liikkeet ohjelma tulkitsee ylimääräisenä fyysisenä kuormituksena)	Portin ja moottorin asennus aiheuttaa vaikeuksia ja ovat myös osittain työturvallisuus tekijöitä, jigin puute työvaiheessa korostuu.

Työvaiheen kehittämisideat	Putken eläminen saattaa aiheuttaa vaikeuksia työn loppuvaiheessa. (esikokoonpantu runko, jolloin työvaiheessa tehdään pelkkä hitsaus, edellyttää komponenttien muuttamista, voiko liitoksia vähentää?)	Ajan tasalla oleva työohje, kokoamisjigi, osat yksi yhteen, jotta kappaleita ei tarvitse työstää.
----------------------------	--	---

Taulukko 4. Hitsiaineentuotto



Taulukko 5. Hitsiainemäärä

V-hiitit

Al- neen pak- saus mm	Ilma- rako mm	50°			60°			70°			60° Laki			60° Vaaka		
		Jalko			Jalko			Pysty			Laki			Vaaka		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
4	1	11,5	11	0,09	13	12,5	0,10	15	16,5	0,13	17,5	18	0,14	13	14,5	0,11
5	1	16,5	16	0,13	19,5	19	0,15	22,5	24,5	0,19	26	28	0,22	19,5	21	0,16
6	1	23	21,5	0,17	27	25,5	0,20	31	37	0,29	36	38,5	0,30	27	30	0,24
7	1,5	33,5	32,5	0,26	39	38	0,30	45	40	0,38	51,5	56	0,44	39	42	0,33
8	1,5	42	40	0,31	49	46,5	0,37	57	59,5	0,47	65,5	70	0,55	49	56	0,44
9	1,5	51	49	0,38	60,5	56	0,44	70	75,5	0,59	81,5	87,5	0,69	60,5	65	0,51
10	2	65,5	62	0,49	77,5	72	0,57	90	96,5	0,76	104	109	0,86	77,5	81	0,64
11	2	78,5	71,5	0,56	92	83,5	0,66	107	113	0,89	124	130	1,02	92	96,5	0,76
12	2	91	83	0,65	107	97,5	0,77	125	134	1,05	145	157	1,23	107	113	0,89
14	2	120	110	0,86	141	130	1,02	165	171	1,34	193	204	1,60	141	149	1,17
15	2	135	123	0,97	160	146	1,15	188	197	1,55	219	231	1,81	160	171	1,34
16	2	151	132	1,04	180	157	1,23	211	223	1,75	247	257	2,02	180	186	1,46
18	2	189	170	1,33	223	204	1,60	265	276	2,17	308	320	2,51	223	233	1,83
20	2	227	206	1,63	271	247	1,94	320	334	2,62	376	396	3,11	271	281	2,21
25	2	341	313	2,46	411	375	2,94	488	510	4,00	577	606	4,76	411	425	3,34

1 Teoreettinen hitsin tilavuus cm<sup>3</sup>/m  
 2 Todellinen hitsin tilavuus (otettu huomioon poikittaistulostuminen) cm<sup>3</sup>/m  
 3 Hitsiainemäärä kg/m

Pienahiitit

a-mitta	Hitsin teor. poikki- pinta	Jalkopisena		Alapisena		Vaakapisena		Yläpisena	
		cm <sup>2</sup>	kg/m	cm <sup>2</sup> /m	kg/m	cm <sup>2</sup> /m	kg/m	cm <sup>2</sup> /m	kg/m
2	4	5	0,04	6	0,05	5,5	0,04	5,5	0,04
2,5	6,5	7,5	0,06	8	0,06	8,5	0,07	8,5	0,07
3	9	10,5	0,08	12,5	0,10	11	0,09	12	0,09
3,5	12,5	14	0,11	16	0,13	15	0,12	16,5	0,13
4	16	18	0,14	21	0,16	19,5	0,15	22	0,17
4,5	20,5	22,5	0,18	26	0,20	24,5	0,19	26,5	0,21
5	25	27,5	0,22	31,5	0,25	30,5	0,24	33	0,26
5,5	30,5	33,5	0,26	37	0,29	36	0,28	40,5	0,32
6	36	40	0,31	42	0,33	43	0,34	47,5	0,37
6,5	42,5	46,5	0,37	49,5	0,38	51	0,40	56	0,44
7	49	54,5	0,43	57	0,45	58	0,44	65	0,51
7,5	56,5	60,5	0,47	65	0,51	64	0,50	73,5	0,58
8	64	70	0,55	73,5	0,58	76,5	0,60	82,5	0,65
9	81	88	0,69	95	0,47	95	0,75	109	0,86
10	100	109	0,85	114	0,89	116	0,91	130	1,02
11	121	131	1,03	138	1,08	143	1,12	157	1,23
12	144	156	1,22	162	1,27	169	1,33	188	1,48
13	169	179	1,41	190	1,49	195	1,53	220	1,73
14	196	207	1,62	224	1,76	227	1,78	257	2,02
15	225	237	1,86	248	1,95	264	2,07	294	2,31