

HITSAUSLIITOSTEN OPTIMOINTI

Osmankäämi Mona

Opinnäytetyö

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

2024

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Mona Osmankäämi	Vuosi	2024
Ohjaaja(t)	TkT Ari Pikkarainen		
Toimeksiantaja	Yrityksen nimeä ei julkaista		
Työn nimi	Hitsausliitosten optimointi		
Sivumäärä	57 + 6		

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia toimeksiantajayritykselle RHS-palkkien laserleikkausta ja sen hyödyntämistä laitteistokokoonpanojen hitsattavuudessa. Työssä selvitettiin, voidaanko suurten laitteiden valmistamista helpottaa RHS-palkin laserleikkauksella ja mitä tulee ottaa huomioon, jotta valmistettavien kokoonpanojen osalta päästään haluttuihin mittoihin ja lopputulokseen.

Työssä etsittiin tietoa laserleikkauksesta ja hitsauksesta. Lisäksi valittiin kolme eri yritystä, joilta tilattiin valmistettavaksi samat kappaleet. Näitä kappaleita vertailtiin ja sovitettiin toisiinsa, jolloin simuloitiin tilannetta, missä suuren laitteistokokoonpanon laserleikkattavia kappaleita voi tulla eri yrityksiltä. Teoriatiedolla saatiin pohjaa, minkä avulla pystyttiin päättämään millainen koe tulisi olla ja mitä jo suunnitteluvaiheessa tulisi ottaa huomioon.

Työssä mallinnettiin ja suunniteltiin kuusi kappaletta erilaisin toleranssein, joilla pystyttäisiin todentamaan, kuinka hyvin ne soveltuvat toisiinsa. Kappaleiden saavuttua ne mitattiin mittalaitteiden avulla ja niiden onnistumista arvioitiin silmämääräisesti. Kappaleita soviteltiin toisiinsa ja saatiin lisätietoa siitä, mitä tulee ottaa tulevaisuudessa huomioon, kun RHS-laserleikkausta hyödynnetään rakenteissa.

Opinnäytetyön lopputulokseksi saatiin muun muassa suositellut toleranssit laserleikkausta käytettäessä. Tältä osin todettiin, että kappaleiden toleranssi tulisi olla 1 mm, jolloin valmistajasta riippumatta kappaleet saadaan sovitettua toisiinsa. Lisäksi havaittiin RHS-palkkiaihion omien ulkomittatoleranssien olevan merkityksellinen monien laserliitostapojen suunnittelussa. Tällöin käytettävän toleranssin tulee sisältää 1 %:n sallitun heiton palkin ulkomitassa. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että RHS-palkin laserleikkauksesta voidaan saavuttaa hyötyjä valmistuksen osalta, kuten mittojen tarkentuminen ja valmistuksen helpottuminen.

Avainsanat	hitsaus, koneensuunnittelu, laserleikkaus, palkit, toleranssit
Muita tietoja	Työhön liittyy toimeksiantajalle toimitettu ohjeistus laserleikkauksen toleransseista ja hitsausliitoksista.

Mechanical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Mona Osmankäämi	Year	2024
Supervisor(s)	Ari Pikkarainen, D.Sc. (tech.)		
Commissioned by	Company name is not disclosed		
Title	Optimization of welding joints		
Number of pages	57 + 6		

In this thesis laser cutting of RHS beams was considered for the commissioning company. The weldability of laser cut hardware assemblies was studied and whether the production of large equipment can be improved by laser cutting. The main material for laser cutting was RHS beam. This work aimed to find out what needs to be considered in order to achieve the desired dimensions and correct end-result for the assemblies to be manufactured.

The required information needed to be gathered to proceed with the work was theory on laser cutting and welding. In addition, three different companies were selected and requested to laser cut the same pieces. These pieces were then compared and fitted to each other, simulating a situation where laser-cut parts of a large hardware assembly are made by different companies. Theoretical knowledge also provided help in deciding what the experiment parameters should be and what should be considered already in the design phase.

Six pieces were modelled and designed with different tolerances to verify how well they fit together. Once the pieces arrived, they were measured using measuring instruments and their quality was evaluated visually. The pieces were fitted with each other and results were obtained on what needs to be considered in the future when using RHS laser cutting in structure design.

The results of the thesis included the recommended tolerances when using laser cutting. It was determined that the tolerance of the pieces should be 1 mm, so that regardless of the manufacturer, the pieces could be fitted to each other easily. In addition, it was found that the RHS beam external dimensional tolerances is a significant factor and should also be considered. In such case, the tolerance used must include a 1% extra allowance for the external dimension of the beam. As a result, it can be concluded that benefits can be gained from laser cutting of the RHS beam in terms of manufacturing, including making the dimensions more accurate and making the assembly easier to manufacture.

Keywords beams, laser, cutting, machine design, tolerances, welding

Special remarks The thesis includes instructions for laser cutting tolerances and weld joints produced for commissioner.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	YRITYSESITTELY	10
2.1	Toimeksiantajan käyttämät hitsausmenetelmät	12
2.2	Yrityksen toimintaympäristö	12
3	METALLILIITOSTEN TEORIAA	13
3.1	Laserleikkaus	13
3.1.1	Putkilaserleikkaus	13
3.2	Hitsaus	16
3.2.1	Hitsauskiinnittimet ja jigit	22
3.3	Koneensuunnittelu	23
3.3.1	Piirustukset	24
3.3.2	Creo	25
4	KOEKAPPALEIDEN SUUNNITTELU	26
4.1	Kehitettävät kohteet toimeksiantajalla	26
4.2	Kuljetin	27
4.3	Mallintaminen	30
4.4	Koepalat	35
5	KOEKAPPALEIDEN MITTAUS JA ANALYSOINTI	37
5.1	Silmämääräinen tarkastus ja huomiot	37
5.2	Mittaukset	40
5.3	Hitsaus	44
6	TULOKSET	48
6.1	Laserleikkauksen suositellut käyttökohteet	48
6.2	Saavutetut hyödyt	50
6.3	Ohjeistukset	51
6.3.1	Lasertoleranssit	51
6.3.2	Hitsausasennot	51
6.3.3	Merkinnät	52
6.3.4	Tiedostomuodot	52
7	POHDINTA	53

LÄHTEET.....	55
LIITTEET	57

ALKUSANAT

Haluan kiittää Lapin Ammattikorkeakoulun opettajia hyvästä tuesta ja opetuksesta. Lisäksi haluan kiittää toimeksiantajaa saamistani tiedoista ja opastuksesta tätä opinnäytetyötä tehtäessä. Kiitän myös yrityksiä, joiden avulla tämä opinnäytetyö saatiin tehtyä.

Mona Osmankäämi 22.11.2024

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
DXF	Drawing Interchange Format
FEM	Finite Element Method
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
RHS	Rounded Hollow Section
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
TIG	Tungsten Inert Gas

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on hitsausliitosten optimointi. Työn tarkoituksena on parantaa toimeksiantajan laitteiden hitsausliitoksissa käyttämiä menetelmiä ja niiden suunnitteluun liittyvää ohjeistusta. Lisäksi tutkitaan uudentyyppisten hitsausliitosten toimivuutta ja niillä mahdollisesti saavutettavia hyötyjä toimeksiantajalle. Samalla pyritään havaitsemaan mahdolliset uudet ongelmat ja haasteet suunnittelu- ja valmistusvaiheessa, joita näiden uusien menetelmien käyttöönotto voi aiheuttaa.

Toimeksiantajayritys suunnittelee ja toimittaa monipuolisesti erilaisia koneeteollisuuden laitteita, mukaan lukien tuotantolaitoksissa käytettäviä kuljettimia. Tämän opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää muun muassa näiden kuljettimien ja muiden laitteiden suunnittelussa.

Suunniteltavat laitteet ovat pitkälti asiakaskohtaisia, jonka takia toimeksiantaja ei normaalisti hyödynnä jigijä laitteen valmistusvaiheessa. Jigi on teollisuudessa käytettävä apurakenne, jonka avulla haluttu tuote tai rakenne valmistetaan. Jigien edut tulevat esille yleensä vasta suurempien erien valmistuksessa. Haastavia tuotteiden rakenteista tekee esimerkiksi niiden pituus, joka on useita metrejä ja hitsauksen lämmöstä syntyvät taipumat. Taipumien korjaamiseksi voidaan joutua käyttämään lämpöoikaisua.

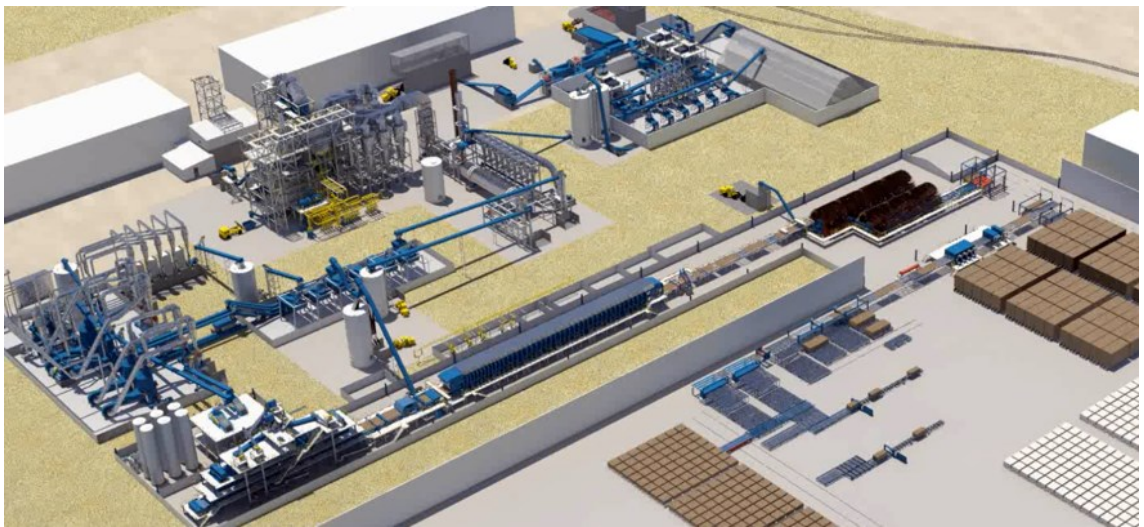
Opinnäytetyössä tutkitaan ja selvitetään, voidaanko laserleikkauksen (putkilaser) avulla toteutettujen toisiinsa lomittuvien RHS-putkirakenteiden antamaa tukea käyttää hyväksi jigimäisesti, mikä helpottaisi kappaleiden yhteen hitsausta. Lisäksi halutaan selvittää, voidaanko tämän avulla välttää lopputuotteen lämpöoikaisuvaihe.

Työssä mallinnetaan koekappaleet, jotka tilataan useammasta yrityksestä ja joita tullaan työn aikana sovittamaan yhteen. Tällä pyritään selvittämään eri valmistajien tuottamien kappaleiden yhteensopivuutta, ja selvittämään vaaditut suunnittelutoleranssit, jotta vältetään ongelmilta kappaleiden yhteensovituksessa. Kokeen perusteella saadun tiedon pohjalta luodaan ohjeistus ja esimerkkimallit toimeksiantajayritykselle, jossa niitä pystytään hyödyntämään tulevien tuotteiden suunnittelussa. Nämä ohjeet eivät ole julkisesti saatavilla.

Työssä käytetään paljon alan ammattikirjallisuutta lähteinä, mutta myös ulkomaisissa julkaisuissa olevia tutkimuksia ja väitöskirjoja aiheesta. Tämän lisäksi materiaalia on saatu suoraan toimeksiantajalta ja putkilaserleikkausta tekeviltä yrityksiltä. Konetekniikan opinnot antavat hyvän tietopohjan työn suorittamiseen ja aikaisempi ammattini hitsaajana auttaa lähestymään aihetta myös kokemuspohjaisesti.

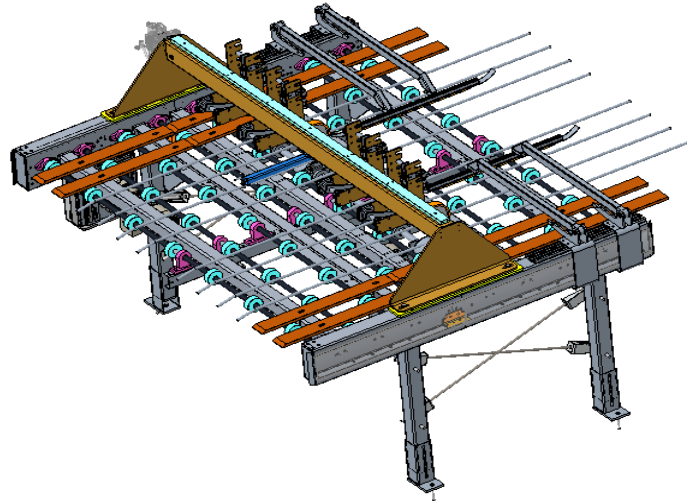
2 YRITYSESITTELY

Toimeksiantaja on jo pidempään puuteollisuusalaalla toimivien yritysten laitteistoja suunnitteleva ja toimittava yritys. Yritys on maailmanlaajuinen ja sen valikoimiin kuuluu monipuolisesti erilaisia laitteita asiakkaiden tarpeeseen. Laitteet koostuvat pääasiassa suurikokoisista teräsrakenteista, joissa on käytetty sekä pultti- että hitsausliitoksia (kuvio 1). Alalla vallitsevan kilpailutilanteen takia yritys ei halua nimeään suoraan näkyviin tässä työssä, joten jatkossa yrityksestä käytetään vain termiä toimeksiantaja.



Kuvio 1. Toimeksiantajan valmistamia laitteistoja

Yrityksen osana toimii Suomessa sijaitseva suunnittelutoimisto. Suomessa toimistolla suunnitellaan yrityksen toimialan päätuotteille yhteensopivia lisä- ja apulaitteita, kuten kuljettimia (kuvio 2), nostimia ja pinontalaitteita.



Kuvio 2. Esimerkki rullakuljettimesta

Suomen toimistolla ainoastaan suunnitellaan laitteistoja. Laitteiden valmistuksessa käytetään monia koti- ja ulkomaisia yrityksiä alihankkijoina. Alihankkijat toteuttavat laitteiden valmistuksen piirustusten ja mallien perusteella. Tähän kuuluu muun muassa osien ja kokoonpanojen valmistus sekä laitteiston kokoonpano. Laitteiden valmistusta alihankkijoiden tiloissa käy valvomassa ja tarkastamassa yrityksen työntekijä. Hyväksytyt ja tarkastetut laitteistot toimitetaan asiakkaalle (kuvio 3), jonka tiloissa myös yrityksen työntekijät käyvät avustamassa ja valvomassa asennusta ja käyttöönottoa.



Kuvio 3. Esimerkki asiakkaalle toimitetusta laitteistosta.

2.1 Toimeksiantajan käyttämät hitsausmenetelmät

Toimeksiantajan yleisimmät käytetyt hitsausmenetelmät ovat seuraavat:

- laitteen metallirakenteen hitsaaminen MAG:illa hitsaamossa
- ohuiden rosteriputkien TIG-hitsaus hitsaamossa
- asennushitsaus puikkohitsauksella työmaalla.

Normaalisti laite valmistetaan kokonaan konepajalla. Tämän jälkeen laite lähetetään asiakkaan tiloihin asennettavaksi. Siellä laite asennushitsataan paikalleen puikkohitsaamalla. Opinnäytetyön aihe keskittyy laitteen kokoonpanovaiheessa tapahtuvaan hitsaamiseen konepajalla.

Hitsauksessa käytetään aktiivista kaasua ja MAG-hitsauslaitetta. Tällä hetkellä toimeksiantajayrityksessä ei huomioida paljoa missä asennoissa tai miten hitsaus pystytään todellisuudessa toteuttamaan. Tämän seikan parannusehdotuksia tullaan lisäämään tulosten syntymisen jälkeen tehtävään hitsausohjeistukseen.

2.2 Yrityksen toimintaympäristö

Toimeksiantajan tiloista löytyy työtä varten tarvittavaa kirjallisuutta, työvälineitä ja hitsaukseen tarvittavat laitteistot, materiaalit ja suojarahusteet. Toimeksiantaja tarjoaa myös tietokoneen ohjelmiseen, jonka avulla suoritetaan mallinnus ja luodaan valmistusta varten tarvittavat mallitiedostot ja piirustukset. Toimeksiantajayrityksessä käytettävä ohjekirja suunnittelutyötä varten on Koneenpiirustus 1&2, tekijänä Aimo Pere.

Toimeksiantajalla on käytössä 3D-mallinnusta varten Creo CAD-ohjelmisto, versio 7.0.9.0. Ohjelman avulla luodaan suunniteltavasta laitteesta malli, piirustukset ja tarvittaessa DXF- ja STEP-tiedostot. DXF on yleinen piirustusten mukana lähetettävä tiedosto, jonka avulla esimerkiksi levyosia pystytään helposti leikkaamaan tarkoin mitoin ja pitkälti automatisoidusti.

3 METALLILIITOSTEN TEORIAA

Pääpaino työssä on rakenteiden toiminnallisessa suunnittelussa, mitoittamisessa sekä toleranssien määrittämisessä. Tietoperustan avulla opinnäytetyössä rakennetaan CAD-malli esimerkkikappaleista, määritetään hitsausmenetelmät ja luodaan piirustukset, joilla esimerkkikappaleet tilataan eri valmistajilta ja toteutetaan työn tutkimisvaihe. Työssä ei ole tarkoituksena simuloida rakenteen kestävyyttä.

3.1 Laserleikkaus

Laserleikkaus on menetelmä, jossa numeerisesti ohjattu lasersäde leikkaa kappaleen haluttuun muotoon sulattamalla materiaalia, samalla laserin apukaasun puhaltaessa sulaneen materiaalin pois. Jos käytettävä kaasu on aktiivikaasua, esimerkiksi happea, se toimii tehostaen laserin leikkausvoimaa. Laserin tarkan sulattamisen ja apukaasun hyvä yhteistoimivuus on syy sille, miksi laserleikkausta pidetään tarkkana, siistinä, ja nopeana leikkausmenetelmänä. Pinnanlaatu on lähellä koneistuksella saadun pinnan laatua, joka taas on erittäin merkittävä hyöty jatkotoimien kannalta. (Riveiro ym 2011, 1–2.)

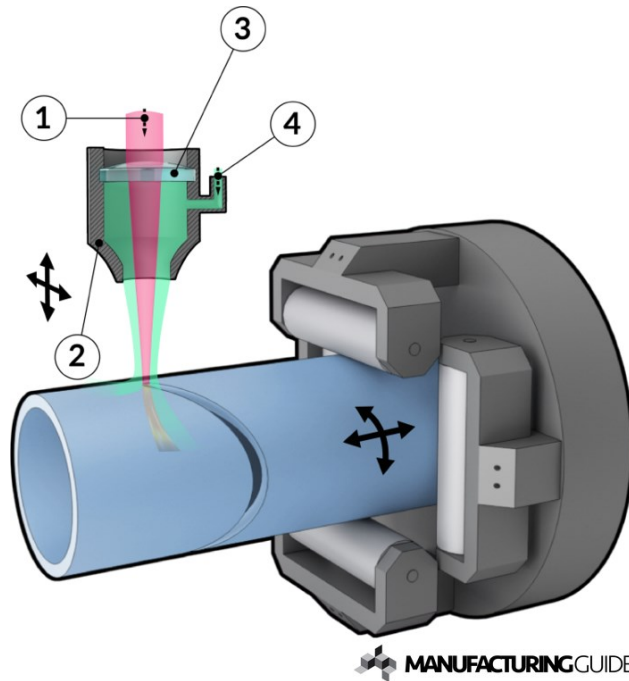
Laseria verratessa muihin leikkaustapoihin, kuten vesi- plasma-, happileikkaus, se on kalleimpia, mutta sen nopeus ja tarkkuus tekee siitä parhaan valinnan monissa tilanteissa. Sillä voidaan tehdä monimutkaisia muotoja, jotka eivät ole muilla menetelmillä mahdollisia. Laserleikkauksen etuna on myös sen soveltuvuus kaikille metallimateriaaleille. (Piscini 2020, 35; Irsel & Guzey 2021, 12.)

Pääasiallisesti rajoittavana tekijänä laserleikkauksen käytölle on suurin sallittu materiaalin vahvuus. Tällä hetkellä yleisimmin laserilla voidaan leikata 30 millimetriä paksua levyä. Putkilaser-laitteistossa rajoitteena ovat myös työalueen koko ja liian pitkä tai lyhyt työstettävä kappale. (Piscini 2020, 35.)

3.1.1 Putkilaserleikkaus

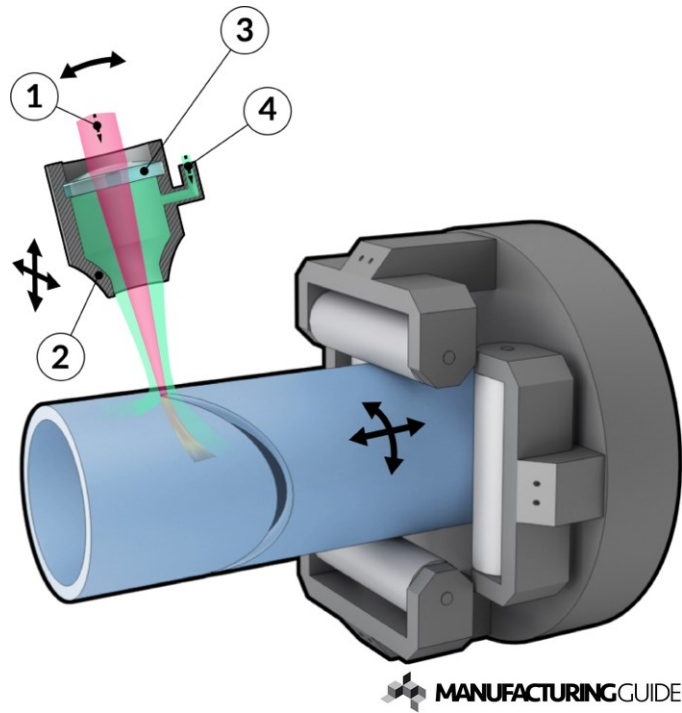
Putkilaserleikkaus (kuvio 4, kuvio 5) eroaa tavallisesta laserleikkauksesta siten, että työstettävä kappale eli putki tai palkki, syötetään RHS-palkin muotoiseen rullalliseen istukkaan. Istukka pyörii putken pituussuunnan ympäri, ja rullat siirtävät

kappaletta pituussuunnassa. Tämän ansiosta palkkia voidaan liikuttaa pituussuuntaisesti eteen- ja taaksepäin ja kääntää 360 astetta halutulla tavalla leikkauksen aikana. Riippuen leikkauslaitteesta, leikkaus tapahtuu joko suoraan leikkauuskärjellä osoitettuna palkin pintaa vasten, tai esimerkiksi 45 asteen kulmassa. (Piscini 2020, 32–35.)



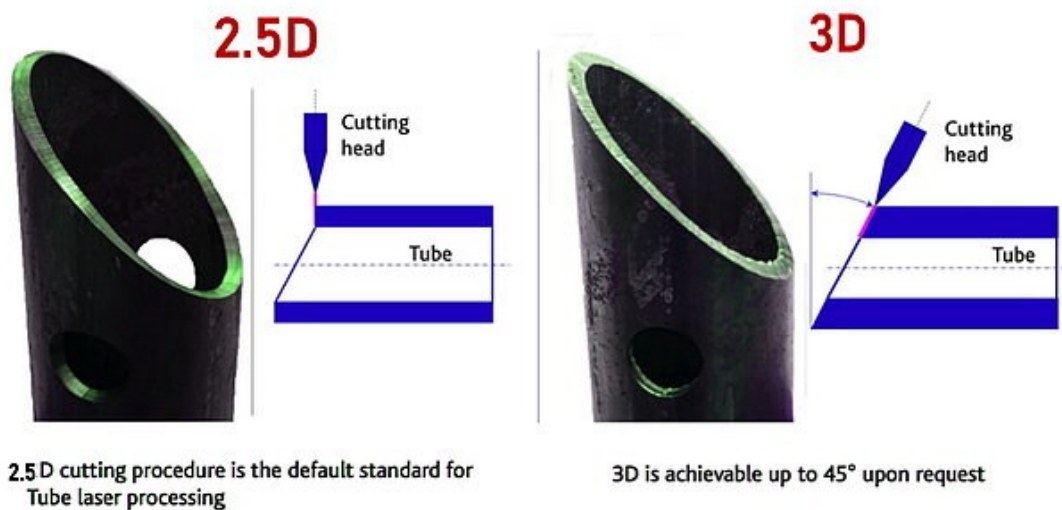
Kuvio 4. 2D-laserleikkauksen periaate (ManufacturingGuide 2024a)

Suoraa leikkausta kutsutaan 2D-leikkaukseksi (kuvio 4) ja eri kulmissa tapahtuvaa leikkausta 3D-leikkaukseksi (kuvio 5). 3D-leikkaustyö mahdollistaa paremmin ja tehokkaammin palkin työstämistä ja vähentää työstöaikaa. (Piscini 2020, 32–35.)



Kuvio 5. 3D laserleikkauksen periaate (ManufacturingGuide 2024b)

2D-leikkaus voi rajoittaa palkkiin haluttua muotoilua esimerkiksi viisteiden osalta (kuvio 6). Jos leikkaukärkeä ei saada käännettyä 45 asteen kulmaan, viisteiden tekeminen yhdellä kiinnityksellä voi olla mahdotonta. (Piscini 2020, 32–35.)



2.5D cutting procedure is the default standard for Tube laser processing

3D is achievable up to 45° upon request

Kuvio 6. 2D- ja 3D-laserleikkausten ero (Fibersaw 2024)

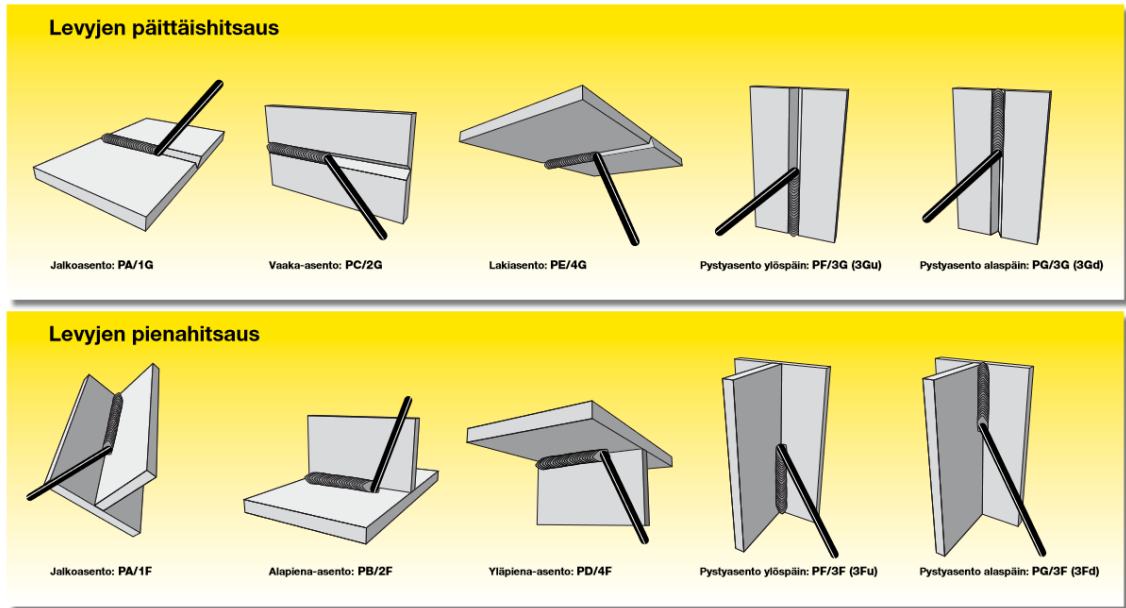
Nykyaikaisilla putkilaser leikkauslaitteilla voidaan laserin leikkaussädettä säädellä niin, että laser leikkaa vain yhden seinämän verran menemättä kokonaan läpi kappaleesta. RHS-kääntöpöytä mahdollistaa pitkien ja eri kulmille yltävien muotojen tekemisen yhdellä leikkauksella. Laserleikkauksen tarkkuudet ja toistettavuudet vaihtelevat riippuen laitteistosta, mutta voivat olla jopa mikrometrien luokkaa. (Piscini 2020, 32–35.)

3.2 Hitsaus

Hitsaus on tapahtuma, jossa kappaleita liitetään toisiinsa tai kappaleen pintaan tuodaan sulaa liitosainetta. Jäähdytymisen jälkeen kappaleet ovat liittyneinä toisiinsa. (Lepola & Ylikangas 2023, 13.)

Hitsaustekniikan valitsemiseen vaikuttavat monet eri asiat. Ensisijaiset tärkeimmät seikat ovat käytettävä perusaine, hitsausasento ja hitsattavan kappaleen hitsattavuus. Lisäksi hyvä on ottaa huomioon ainepaksuudet, käytettävissä oleva laitteisto ja laatuvaatimukset. Laatuvaatimukset määritellään yleensä kestävyysnäkökulmasta. Tiukat laatuvaatimukset aiheuttavat työhön lisäkustannuksia esimerkiksi ammattitaitoisuusvaatimusten ja tarvittavien esivalmistelujen, kuten railon valmistelun takia. (Lepola & Ylikangas 2023, 208; ESAB 2024b.)

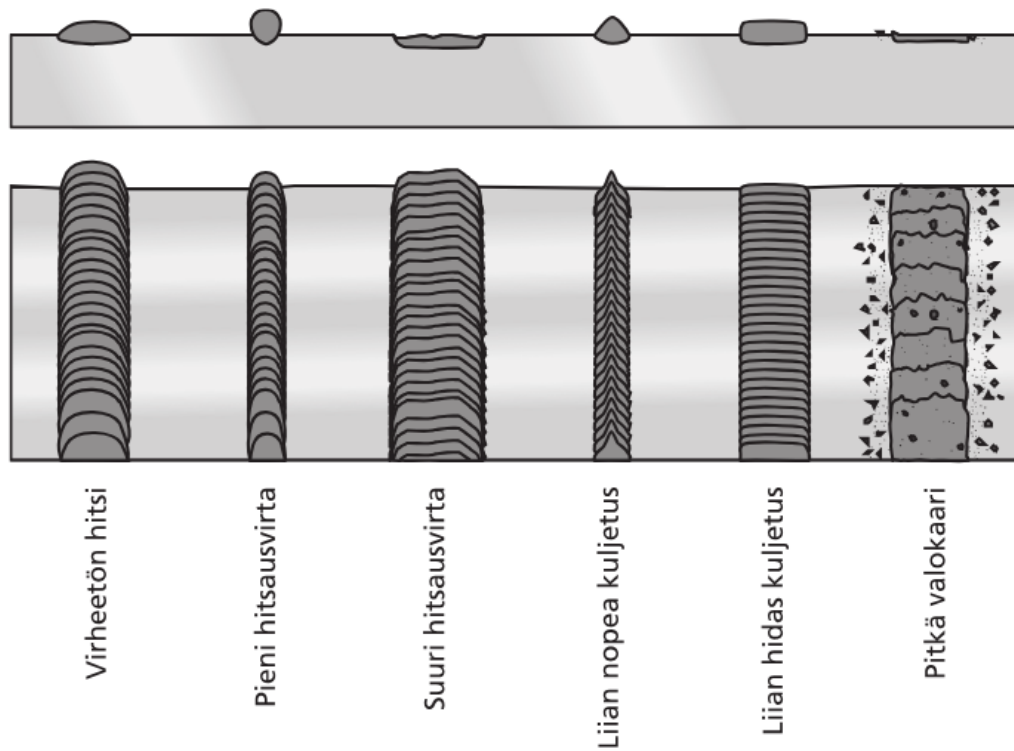
Hitsausasentoja on useampia erilaisia (kuvio 7) ja niistä helpoin toteuttaa on jalkoasento (PA). Jalkoasennossa hitsaaja näkee hitsin helpommin ja saa tähdättyä hitsauslangan railon pohjalle. Kun hitsiä ei hitsata painovoimaa vastaan, sulan hallinta on helpompaa ja hitsiin ei ilmene kateettipoikkeamaa. Jalkoasennosta seuraavaksi helpoin asento on vaakahitsaus, tarkemmin määriteltynä alapienahitsaus (PB), jossa hitsi tähdätään kahden levyn muodostamaan nurkkaan. (ESAB 2024b.)



Kuvio 7. Yleisimpiä hitsausasentoja levyille (ESAB 2024a)

Hitsaus ei ole täysin ongelmaton tapa liittää kappaleita yhteen. Hitsauksessa syntyy lähes poikkeuksetta aina pieniä tai suuria virheitä (kuvio 8), jotka vaikuttavat hitsausliitoksen lujuuteen ja kestävyYTEEN (Lepola & Ylikangas 2023, 235–239).

Virheitä voidaan ennaltaehkäistä erilaisilla ennakkotoimenpiteillä sekä työn suorittamiseen liittyvillä valinnoilla ja toimenpiteillä. Virheiden mahdollisuuden pientyessä voidaan myös paremmin luottaa siihen, että hitsin lujuus saavuttaa sille asetetut vaaditut kriteerit. (Lepola & Ylikangas 2023, 53, 93, 96, 134, 408.)



Kuvio 8. Erilaisia hitsausvirheitä (Lepola & Ylikangas 2023, 56)

Jotkut hitsauslajit vaativat erityistä hitsauskokeen suorittanutta henkilöä. Henkilö on kokeella todistanut kykenevänsä toteuttamaan vaadittua hitsausta ja siten pystyy suoriutumaan vaaditusta haastavasta työstä. (Lepola & Ylikangas 2023, 244.)

Kaksi yleisintä koneteollisuudessa käytettyä hitsaustekniikkaa ovat MIG/MAG hitsaus (kuvio 10) ja puikkohitsaus (kuvio 9). Niiden käyttötilanteet ja toimintatapa poikkeavat toisistaan monilta osin, mutta niitä käytetään myös paljon yhdessä esimerkiksi korkealle asennettavan rakenteen takia.



Kuvio 9. Asennushitsausta puikkokoneella (Yeswelder 2024)

MIG- ja MAG-hitsauksen ero on käytettävässä apukaasussa ja niiden käyttökohdeet ovat erit. MIG-hitsausta käytetään hitsattaessa muita kuin rautametalleja, esimerkiksi alumiinia, titaania tai kuparia. MAG-hitsausta käytetään teräksen hitsaamiseen. (Lepola & Ylikangas 2023, 71.) MAG-hitsauksessa käytetään aktiivista kaasua, MIG-hitsauksessa ainoastaan passiivista kaasua ja lisäainetta. (Heinonen, Keinänen & Kärkkäinen 2016, 195.) Tässä opinnäytetyössä hitsauskohteena ovat teräspalkkirakenteet, joten teoriaosuudessa keskitytään MAG-hitsaukseen.



Kuvio 10. MIG/MAG-kokoonpanohitsausta (Vahterus 2024)

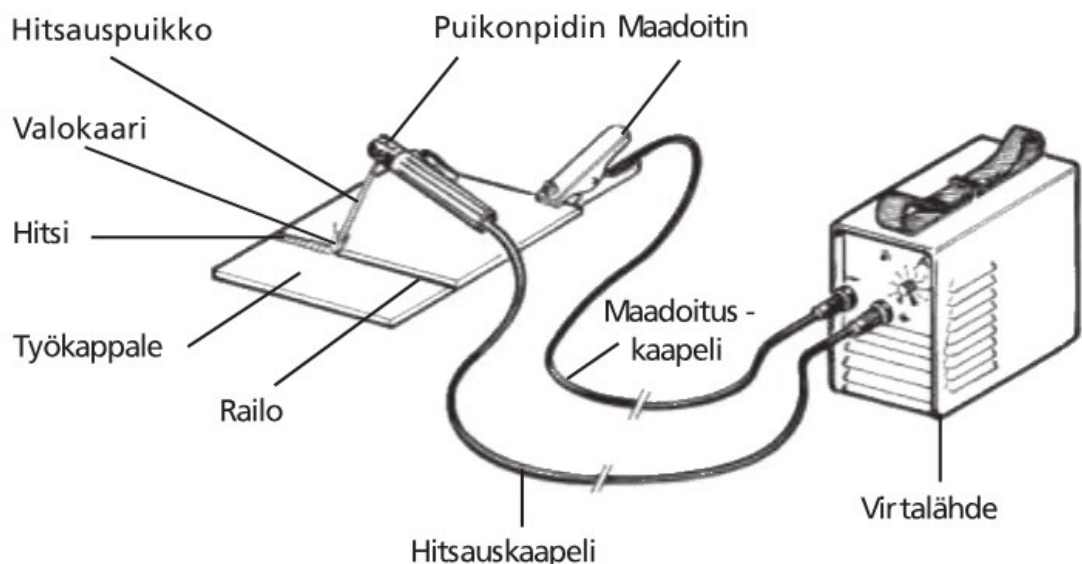
MAG-hitsauksessa hitsaus tapahtuu puoliautomaattisesti laitteistolla (kuvio 11), joka syöttää lankaa ja suojakaasua (Lepola & Ylikangas 2023, 71). Hitsaajan tarvitsee hallita vain sulan liikuttamista, koneellisen automaation huolehtiessa muusta. MAG-laitteiston säädöt ovat nykyaikana hyvin moninaiset. Niiden avulla voidaan hienosäätää esimerkiksi hitsauksen aloitus/lopetus -jännitettä, hitsauksen virran vaihtelua ja hitsisulan lämmön hallitsemista. Tällöin puhutaan erilaisista kaarityypeistä. Näitä ovat lyhyt-, seka-, kuuma- ja pulssikaarihitsaus. Lyhytkaarihitsausta käytetään yleisesti hitsaustapahtumissa, joissa on haastavia hitsausasentoja lyhytkaarihitsauksen helpon hallittavuuden takia. (Lepola & Ylikangas 2023, 81–82; AGA 2014, 15–18.)



Kuvio 11. MIG/MAG-hitsauskoneita (Lepola & Ylikangas 2023, 71)

Vanhemmilla manuaalisemmilla laitteilla pystytään yleensä hitsaamaan vain kolmella erilaisella hitsauskaarialueella: lyhyt-, seka- ja kuumakaari. Sekakaari-alueella pyritään välttämään hitsauksessa. Kuumakaarihitsausta käytetään paljon, kun ainevahvuudet ovat suuria ja halutaan hyvää tunkemaa. Kuumakaaren huono puoli on pitkissä hitsauksissa syntyvä lämpö, joka alkaa taivuttamaan rautaa. (Lepola & Ylikangas 2023, 81–82; AGA 2014. 15–18.) Raudan taipumiseen voidaan kuitenkin vaikuttaa hitsausjärjestyksellä, hitsausmatkoilla, hitsin suuruudella ja esijännityksellä. (Lepola & Ylikangas 2023, 349–353.)

Puikkohitsauksessa (kuvio 12) hitsaaja kiinnittää hitsauspuikon puikonpidikkeen ja sytyttää valokaaren puikon päähän koskettamalla sillä maadoitettua työkappaletta. Valokaari sulattaa puikon kärkeä ja työkappaletta halutusta kohdasta. Hitsausprosessissa puikko muuttuu sulaksi ja kovettuu hitsiksi. Toisin kuin MAG-hitsauksessa, puikkohitsauksessa ei käytetä kaasua, vaan puikon pinnassa on suojaava päällyste, joka jää hitsauksen lopuksi hitsisauman pintaan. Pintaan jäänyttä kerrosta kutsutaan kuonaksi, joka irrotetaan naputtelemalla kuonahakulla jäähmettynyttä hitsiä, jolloin kuona irtoaa helposti pinnalta. (Lepola & Ylikangas 2023, 48–56.)



Kuvio 12. Puikkohitsauskone (Lepola & Ylikangas 2023, 48)

Puikkohitsauksen iso etu on puikon sietokyky ympäristölle. Se toimii hyvin tuulessa ja kosteassa eikä hitsausauman laatu heikkene, vaikka hitsausmateriaali olisi huonompaa. Puikkohitsaus ei myöskään vaadi kaasua ja laitteistot ovat nykyisin pienehköjä, minkä takia niiden kanssa pääsee ahtaisiin paikkoihin. Siksi puikolla tehdään yleisesti paljon korjaushitsauksia ja tulityöalueen ulkopuolisia hitsauksia. Puikkohitsaus ei ole kuitenkaan yhtä tehokkaasti tuottavaa kuin MAG-hitsaus. (Lepola & Ylikangas 2023, 60, 82–83; Heinonen, Keinänen & Kärkkäinen 2016, 203–204.)

3.2.1 Hitsauskiinnittimet ja jigit

Hitsausjigi on apuväline, jolla asetellaan paikalleen kappaleet, jotka halutaan hitsata toisiinsa. Jigin avulla mittoja ei välttämättä tarvitse koko aikaa tarkastaa, vaan kappale asettuu jigin avulla kohdalleen oikeaan muotoon, jonka jälkeen se silloitetaan kiinni. Jigi otetaan pois tämän jälkeen lopullista hitsausta varten. (Naksri, Chuchom & Chaiprapat 2021, 1–12.)

Hitsauskiinnitin on rakenne, jonka avulla halutun kokoonpanon osat asetetaan oikeille paikoilleen ja ne pysyvät kiinni toisissaan ilman silloitushitsiä. Hitsauskiinnittimiä saatetaan käyttää esimerkiksi robottihitsauksessa, jossa robotti hoitaa hitsaamisen ja silloitushitsiä ei tarvita. Kiinnitin voi sisältää esimerkiksi levypuristimia, paikoitusaukkoja/reikiä ja kierrereikiä, joiden avulla reiällinen kappale voidaan paikoittaa kohdalleen. Kiinnitin voi sisältää myös tuentoja. (Pandit 2022, 50–52.)

Yleisesti teollisuudessa on käytössä hitsauskiinnitin, joka sisältää myös jigin. Ne yhdessä sekä paikoittavat kappaleet kohdalleen, että pitävät ne kiinni työvaiheen ajan. Jigillinen hitsauskiinnitin pitää sisällään vasteita, toisin sanoen pintoja, joita vasten levy asetetaan paikalleen. (Naksri, Chuchom & Chaiprapat 2021, 1–12.)

Hitsausjigit ja kiinnittimet eivät välttämättä sovellu pieniin tuotantomääriin, koska niiden valmistus voi olla kallista, riippuen kokoonpanon monimutkaisuudesta ja toleranssitarkkuuksista. Jigin/kiinnittimen lisäksi asetettujen kappaleiden tulee olla mahdollisimman samanlaisia, jotta jigi/kiinnitin toimii aina halutulla tavalla. Kiinnittimen/jigin käyttö vaatii myös usein oikeanlaista hitsausjärjestystä. Syitä miksi jigia/hitsauskiinnitintä käytetään:

- Kappale hitsataan vain yhdeltä puolelta, jolloin lämmöstä johtuvaa liikehdintää syntyy vain yhteen suuntaan.
- Kappaleen mittaaminen paikalleen ei onnistu esimerkiksi kappaleen muotojen ja rakenteen takia.
- Kappale vaatii ennakkkoa, joka pystytään toteuttamaan vain kiinnittimen avulla.
- Hitsattua kokonaisuutta ei pystytä koneistamaan haluttuihin mittoihin tai suoraksi.

(Naksri, Chuchom & Chaiprapat 2021, 1–12; Pandit 2022, 50–52.)

3.3 Koneensuunnittelu

Suunnitteluvaiheessa suunnitellaan asiakkaalle haluttu tuote. Tuotteen valmistamista varten toimitetaan osa- ja kokoonpanopiirustuksia, joiden avulla laitteen valmistaja saa tiedon, miten laitteisto tulee rakentaa. Suunnittelussa käytetään yhteneväisiä piirrosmerkintöjä ja standardeja, joiden avulla varmistetaan se, että jokainen suunnittelija pystyy ymmärtämään toistensa tekemiä malleja ja piirustuksia. (Pere 2016, 1-1 – 1-4; Maaranen & Heinonen 2014, 15, 85–86.)

Tuotteen kokonaishinta rakentuu monista eri alueista, joihin suunnittelija pystyvät omilla valinnoillaan vaikuttamaan. Tällaisia ovat esimerkiksi materiaalivalinnat, oikean valmistustavan valinta työstettävälle osalle ja muotoilun tarkoituksenmukaisuus. Jokaisella halutulla levyn reiällä ja muodolla tulisi olla selkeä syy ja tarkoitus. Jokainen haluttu työstö ja ominaisuus maksaa, ja tarpeettomien muotojen tekeminen tuotteeseen lisää tuotteen yleistä valmistushintaa tai ylläpitohintaa. (Pere 2016, 7-45, 7-64, 19-54 – 19-58, 25-1 – 25-2.)

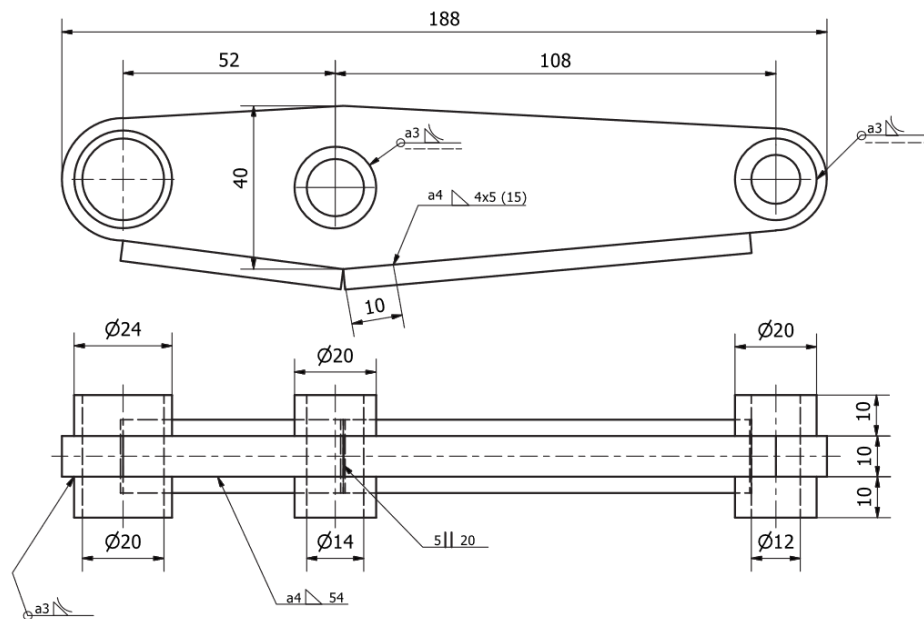
Asiakkaalle toimitettu valmis tuote saattaa vaatia ylläpitoa ja huoltoja jälkikäteenkin mikä tulisi huomioida suunnittelussa. Tällä varmistetaan koneen elinikää pidentävä huollon mahdollisuus ja esimerkiksi varaosien saatavuus. (Pere 2016, 25–3.)

Uusien menetelmien vaikutus tuotteen elinkaaren kokonaishintaan pyritään ottamaan huomioon tämän opinnäytetyön aikana, jotta esimerkiksi opinnäytetyössä

tuloksena suositellut menetelmät ja ratkaisut olisivat toimeksiantajan kannalta taloudellisesti kannattavia. Työn perusteella syntyvään ohjeistukseen liitetään myös tietoa näistä asioista, jotta uusia menetelmiä voidaan käyttää tilanteissa, joissa niillä on merkitystä.

3.3.1 Piirustukset

Piirustuksien avulla kyetään ilmaisemaan halutun tuotteen muodot ja mitat yksiselitteisesti niin ettei niille jää tulkinnan varaa. Piirustuksien muotoviivojen lisäksi apuna käytetään mitoituksia, toleransseja, elementtimerkintöjä ja tarvittaessa tarkentavaa tekstiä. Nykyään suunnitteluohjelmien avulla voidaan suunniteltu kappale esittää myös 3D-muodossa sivulta kuvaten, jolloin piirustuksien ymmärtäminen nopeutuu ja helpottuu. (Pere 2016, 1-1 – 1-4, 2-11 – 2-23; Maaranen & Heinonen 2014, 7-9.)



Kuvio 13. Esimerkki piirustuksesta, joka sisältää hitsausmerkintöjä (Maaranen & Heinonen 2014, 186)

Kappaleen piirustuksen lisäksi voidaan tehdä työohjeita sisältäviä piirustuksia, joita ovat hitsaus- ja koneistuspiirustukset (kuvio 13). Erillisillä ohjeilla voidaan välttyä piirustuksilta, jotka sisältävät kaiken, mutta tekevät sen tulkitsemisesta sekavaa. Nykyään myös piirustusten lisäksi valmistamista helpottaa DXF (Drawing Interchange Format) kuva. DXF on 2D-kuva valmistettavasta kappaleesta, joka

sisältää sen muodot ja yksityiskohdat oikeassa mittakaavassa. Työstettävien yksityiskohtien, kuten reikien tai leikkausten, mittoja ja sijaintia ei tarvitse syöttää työstölaitteeseen (esimerkiksi CNC-työstökeskus) vaan tarvittavat tiedot tulevat DXF-kuvasta. Jotkin laitteet pystyvät käyttämään DXF-kuvia sellaisenaan, toisissa kuva ladataan työasemalle, jossa se käsitellään koneen tarvittavaan muotoon. Tämä helpottaa ja nopeuttaa muun muassa levyosien polttoleikkausta tai rei'ittämistä. DXF-kuvat eivät yleensä sisällä mittoja tai muita piirustusmerkintöjä vaan pelkän kappaleen sivukuvannon 2D-version 1:1 koossa. Piirustuksia tarvitaan yhä esimerkiksi manuaalista tarkistusta varten. (Pere 2016, 1-1 – 1-4, 2-11 – 2-23, 2-31 – 2-34.)

Nykyään käytetään myös 3D-mallitiedostoja, esimerkiksi STEP-muodossa. Joillain metallipajoilla voidaan nopeuttaa uusien tuotteiden lisäämistä koneisiin käyttämällä 3D-mallia, jolloin kone saa kaiken tarvitsemansa tiedon suoraan mallista, eikä manuaalista ohjelmointia juuri tarvita. (Pere 2016, 2-11 – 2-23, 2-31 – 2-34.)

3.3.2 Creo

Creo on PTC:n 3D-CAD (Computer Aided Design) ohjelma, jolla voidaan mallintaa 3D-tuotteita tietokoneella. Ohjelmalla voidaan luoda virtuaalisia 3D-malleja ja kokoonpanoja. Ohjelmalla luoduille malleille voidaan tehdä myös FEM-simulaatioita, joilla havainnollistetaan mallinnetun muodon rakenteiden kestävyyttä ja ominaisuuksia. Malleista saadaan suoraan ohjelman avulla tehtyä erilaisia piirustuksia, joiden avulla suunniteltu malli voidaan valmistaa. (PTC 2024.)

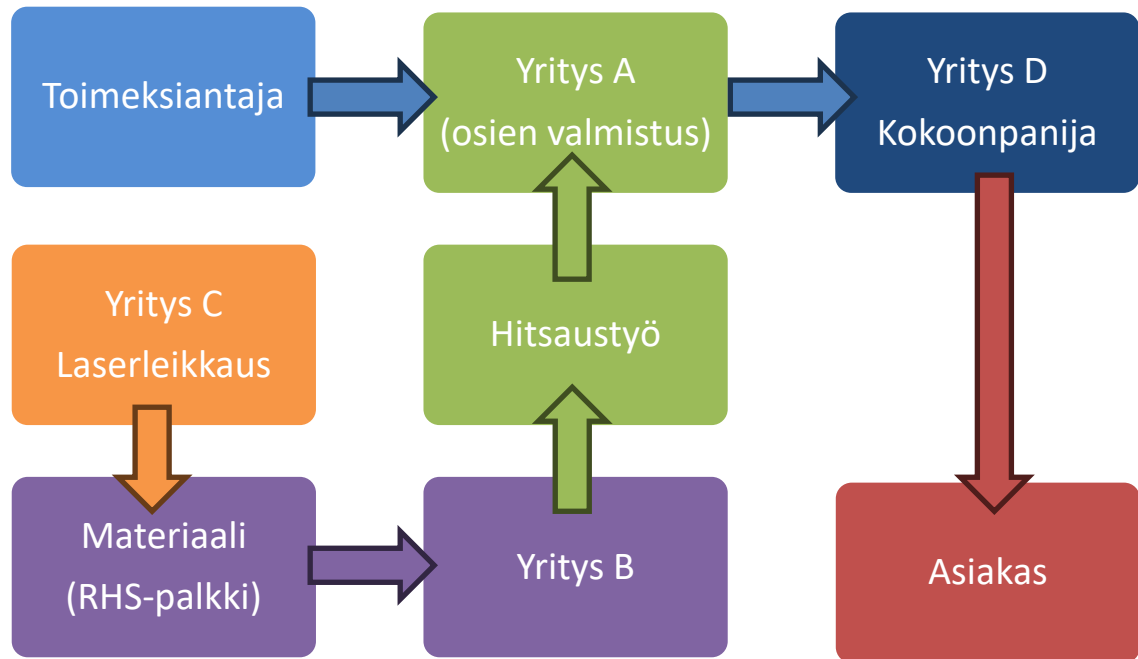
4 KOEKAPPALEIDEN SUUNNITTELU

Työn toteutuksen pääasiallisena tavoitteena oli tuottaa toimeksiantajalle mahdollisimman hyödylliset mallit ja ohjeistukset, joiden avulla toimeksiantaja voi parantaa osien ja kokoonpanojen valmistusprosesseja. Menetelmiä valittaessa pyrittiin huomioimaan myös muut valmistusmenetelmät, joita käytetään kappaleiden valmistamiseen ja tehtiin ohjeistukset niin että niiden noudattaminen ei aiheuta valmistuksen kannalta ongelmia.

4.1 Kehitettävät kohteet toimeksiantajalla

Haastavimpia toteutettavia kohteita toimeksiantajalla ovat pitkistä RHS-palkeista valmistetut laitteet, joiden tarkkuusvaatimukset suoruuden suhteen ovat pituudesta huolimatta suuria. Nykyisellään suoruusvaatimusten saavuttamiseksi on jouduttu käyttämään valmistuksessa lämpöoikaisua, koska hitsausprosessi on aiheuttanut kokoonpanossa vääntelyä. Tähän voidaan vaikuttaa suunnittelussa piirustuksilla tai erillisillä työohjeilla, joissa muun muassa kerrotaan hitsauksen järjestyksestä ja työvaiheista. Jos kappaleen tai kokoonpanon valmistus vaatii vielä enemmän tietoa valmistavalle taholle, voidaan mukaan tehdä erillinen ohjeistus. Tämän työn tavoitteiden toteuduttua voitaisiin välttää monia hitaita ja haasteellisia vaiheita kokoonpanossa, kuten lämpöoikaisu, rungon toimiessa itse itseään tukevana rakenteena kokoonpanoa kasatessa. Edellä mainittujen asioiden avulla voidaan mahdollisesti vähentää ylimääräistä työtä ja työvaiheita valmistuksessa, mikä vaikuttaa valmistuksen kokonaishintaan.

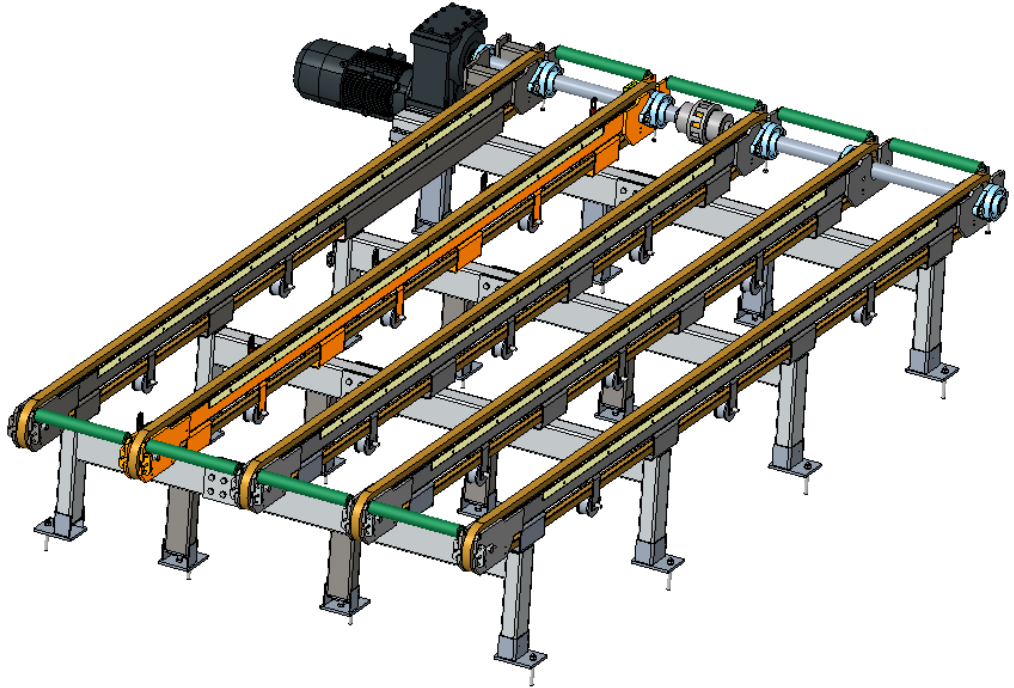
Opinnäytetyössä simuloitiin tilannetta, jossa suunnitellut kappaleet tulevat eri valmistajilta. Tästä huolimatta kappaleiden tulisi sopia toisiinsa ongelmitta, jolloin kokoonpanijan ei tarvitsisi jälkikäsitellä laservalmistettuja osia mitenkään. Pahimmassa tapauksessa kappale voi tulla useiden eri yritysten hankintaketjujen (kuvio 14) kautta, jolloin toimeksiantaja ei pysty vaikuttamaan ohjeistamalla tai olemalla suoraan yhteydessä laserleikkausta suorittavaan yritykseen.



Kuvio 14. Laserleikkauksen mahdollinen hankintaprosessi

4.2 Kuljetin

Mallinnettava kokoonpano, johon tämän työn tuloksia tullaan ensisijaisesti käyttämään, on toimeksiantajayrityksessä suunniteltavat kuljettimet, joista esimerkki kuviossa 15. Kuljettimen leveys ja pituus voi vaihdella asiakkaan toiveiden ja tarpeiden mukaan, minkä takia kuljettimia suunnitellaan asiakkaan tarpeeseen yksilöllisesti. Kuljettimella kulkevan materiaalin painosta ja leveydestä riippuen, kuljettimen koko voi kasvaa tai pienentyä. Leveiden kuljettimien ongelmana on toimituskonttiin sovittaminen ja kuljettimen kuljetus asiakkaan työmaalle. Tällöin kuljettimen rakenteita on jouduttu katkaisemaan keskeltä ja yhdistämään myöhemmin uudestaan toisiinsa asiakkaan työmaalla.

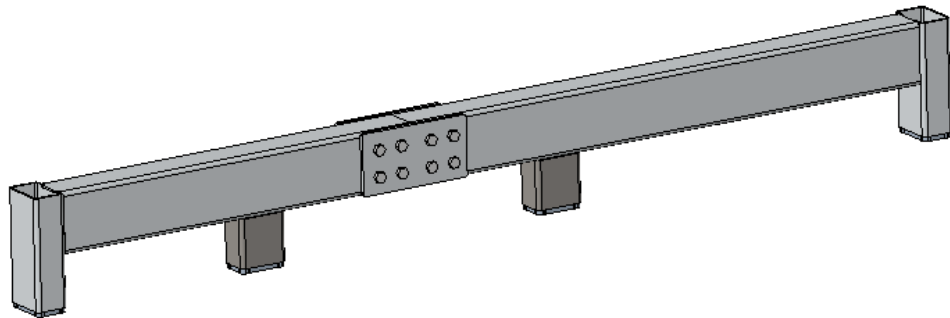


Kuvio 15. RHS-runkorakenteinen kuljetin

Kuljetinta rakennettaessa joudutaan ottamaan huomioon materiaalin mukana tuomia haasteita. RHS-palkki on standardoitua materiaalia, jota käytetään usein konerakenteita tehtäessä sen perusluotettavan lujuuden ja laadun tasaisuuden takia. Haasteeksi kuljettimien kohdalla RHS-palkissa voi muodostua niiden saatavilla olevat pituudet. RHS-palkkia myydään yleisesti 6 metriä pitkinä tankoina varastoinnin ja kuljettamisen helppouden takia. Jos kuljetin on pidempi kuin 6 metriä, joudutaan rakennetta yhdistämään hitsaus- tai pulttiliitoksilla.

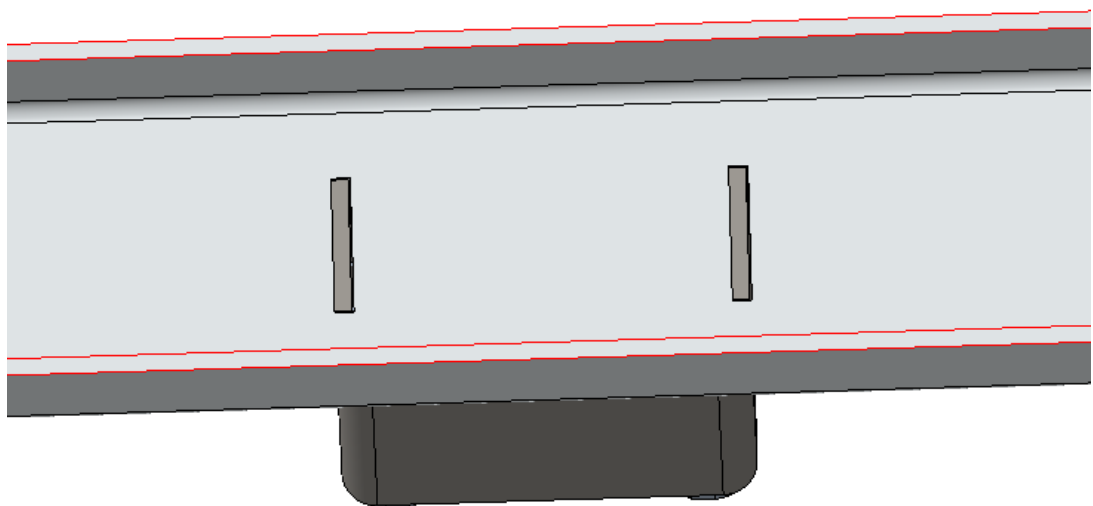
RHS:n muoto ja ontto rakenne aiheuttaa myös toisenlaisen ongelman valmistetuissa kokoonpanoissa: niitä ei pystytä koneistamaan suoraksi materiaalin paksuuden heikentymättä. Hitsauksen aiheuttaman lämpöväntelyn korjaukseen RHS-rakenteissa koneistus sopii vain harvoissa tapauksissa. Tällöin vaihtoehdoksi jää yleensä lämpöoikaisu.

Tällä opinnäytetyöllä haettiin lämpöoikaisulle vaihtoehtoa. Voitaisiinko laserleikkausta hyödyntämällä saada RHS-kokoonpanon kappaleet paikalleen ja vähentää lämmöstä johtuvaa vääntymistä? Lisäksi selvitettiin, onko kokoonpano helpompaa laserleikatuilla kappaleilla, nopeuttaisiko se mahdollisesti kokoonpanemista sekä helpottaisiko se kokoonpanomittojen saavuttamista.



Kuvio 16. Kuljettimen jalkarakenne

Tässä työssä mallinnettiin laserleikattavia osia kuviossa 16 esitettyyn kuljettimen jalkarakenteeseen. Jalkarakenteen pituus vaihtelee laitekohtaisesti, ja kokoonpano sekä sen osat saatetaan tilata useilta eri valmistajilta. Tämän takia jigien valmistamisesta ei saada suurta hyötyä. Jigien sijaan halutaan käyttää laserleikattuja kappaleita, jotka sopivat toisiinsa palapelimäisesti ja helpottavat kasamista. Laserleikkausta voitaisiin käyttää jalkarakenteessa päätypalikoiden sekä lyhyiden välijalkapalkkien liittämiseen runkopalkkiin (kuvio 17), jolloin ne lomittuisivat toisiinsa ja määräisivät syntyvän kokoonpanon muodon ja mitat automaattisesti.



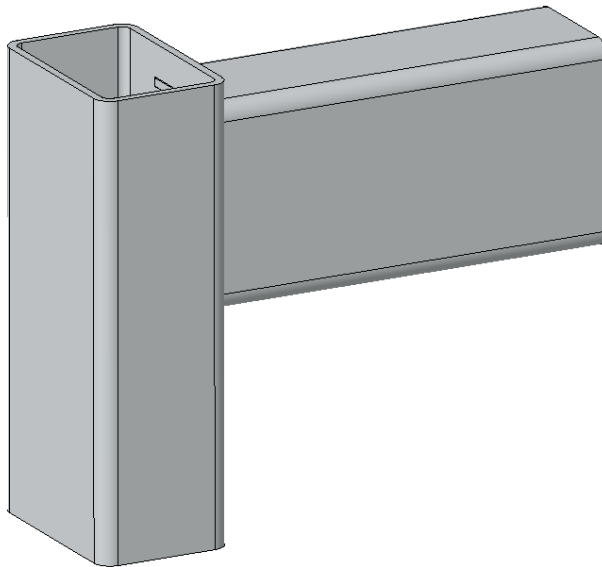
Kuvio 17. Jalkapalkin lomittuminen runkopalkkiin

4.3 Mallintaminen

Mallintamisen kohteeksi valittiin toimeksiantajan olemassa olevasta tuotteesta osia, joiden arveltiin olevan hyviä kohteita laserleikkauskokeilulle. Työssä mallinnettiin näihin kohteisiin uudet osat, jotka toteuttavat alkuperäiset vaatimukset, mutta hyödyntävät laserleikkausta niiden valmistuksessa ja kokoonpanossa.

Osaan kappaleista tehtiin paikoitusreiät ja toisiin kappaleihin kielekkeet, joiden on tarkoitus sopia paikoitusreikiin. Näitä kappaleita mallinnettiin useampi variaatio eri toleransseilla ja lisävaatimuksilla.

Työssä käytettiin mallina RHS-palkkia, jonka mitat ovat 120x80x5 millimetriä. Materiaalina palkilla on S355J2H.

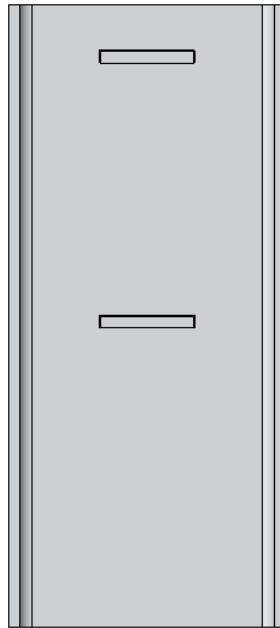


Kuvio 18. Päätykappaleen liitos runkopalkkiin

Kappaleet toisiinsa kohdistavan (kuvio 18) paikoitusreiän koko ja sijainti ovat tärkeimmät saavutettavaan mittatarkkuuteen vaikuttavat muuttujat työssä. Reiän kokoa ja toleransseja muuttamalla valmistettiin useampi esimerkkikappale. Määritettyjä mittoja ja valmiin kappaleen saavutettuja mittoja vertaamalla pystyttiin arvioida saavutettu tarkkuus. Eri toleransseilla valmistettujen esimerkkikappaleiden yhteensopivuutta kokeiltiin myös toisiinsa, jolloin saatiin käsitys kappaleiden toisiinsa liittämisen helppoudesta ja liitoksen väljyydestä. Mitattujen tarkkuuksien ja

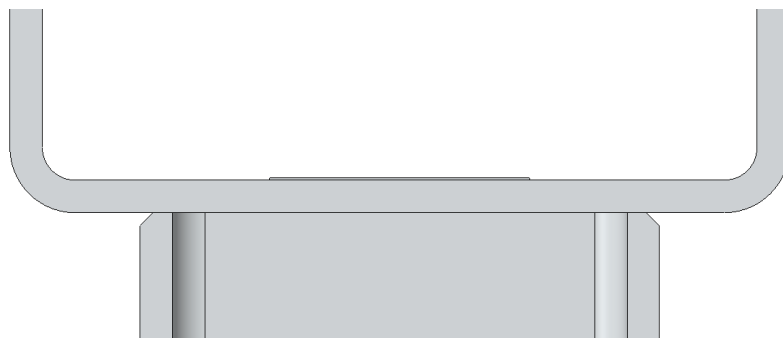
kokeilemalla hyväksi todettujen toleranssien pohjalta toimeksiantajalle määritettiin suositukset, millaisilla toleransseilla tulevaisuudessa mallinnetut kappaleet tulee tehdä, jotta ne valmistajasta riippumatta aina sopivat toisiinsa.

Vastakappaleen kieleke asemoituu reikäkappaleen reiän alapintaa vasten (kuvio 19). Tämän tulee olla suora pinta, jolloin asemoinnissa kokoonpanijan tulee ottaa huomioon vain sivuttainen mittaaminen.



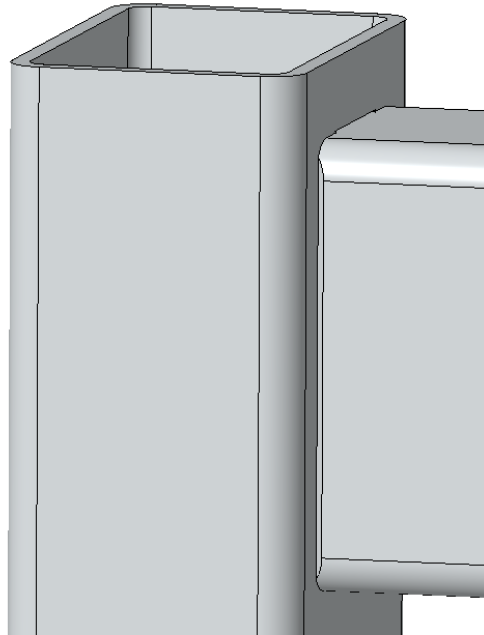
Kuvio 19. Kielekkeen sijoittuminen kohdistusreikään

Kielekkeiden sijainniksi valittiin rungon ylä- ja alareuna, jolloin sivuille jää RHS-palkin muodon takia pitkät hitsattavat reunat. Näille reunoille kokeillaan osassa kappaleissa laserleikata kuvion 20 ja 21 mukainen viiste, hitsausta helpottamaan/parantamaan.



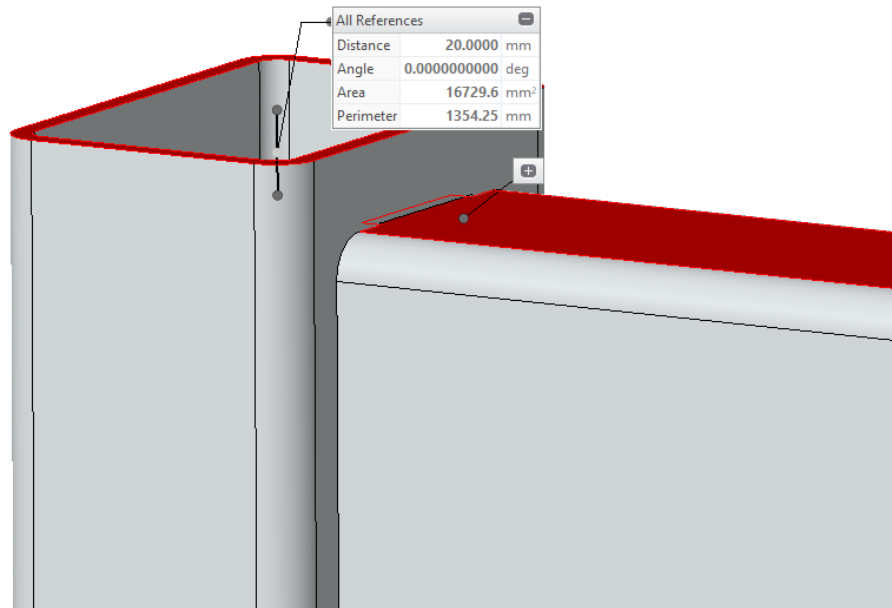
Kuvio 20. Viiste yläpuolelta kuvattuna

Kuljettimen päällä kulkeva paino luo tähän kohtaan myös leikkausvoimaa, jonka takia sivulla olevan hitsin onnistuminen olisi erittäin tärkeää. Jos kieleke olisi sivulla, viisteytys ei onnistuisi kielekkeen kohtaan kappaleessa, vaan se jouduttaiisiin tekemä reiän sisäsiivuun, joka ei välttämättä ole hitsausta ajatellen paras mahdollinen ratkaisu.



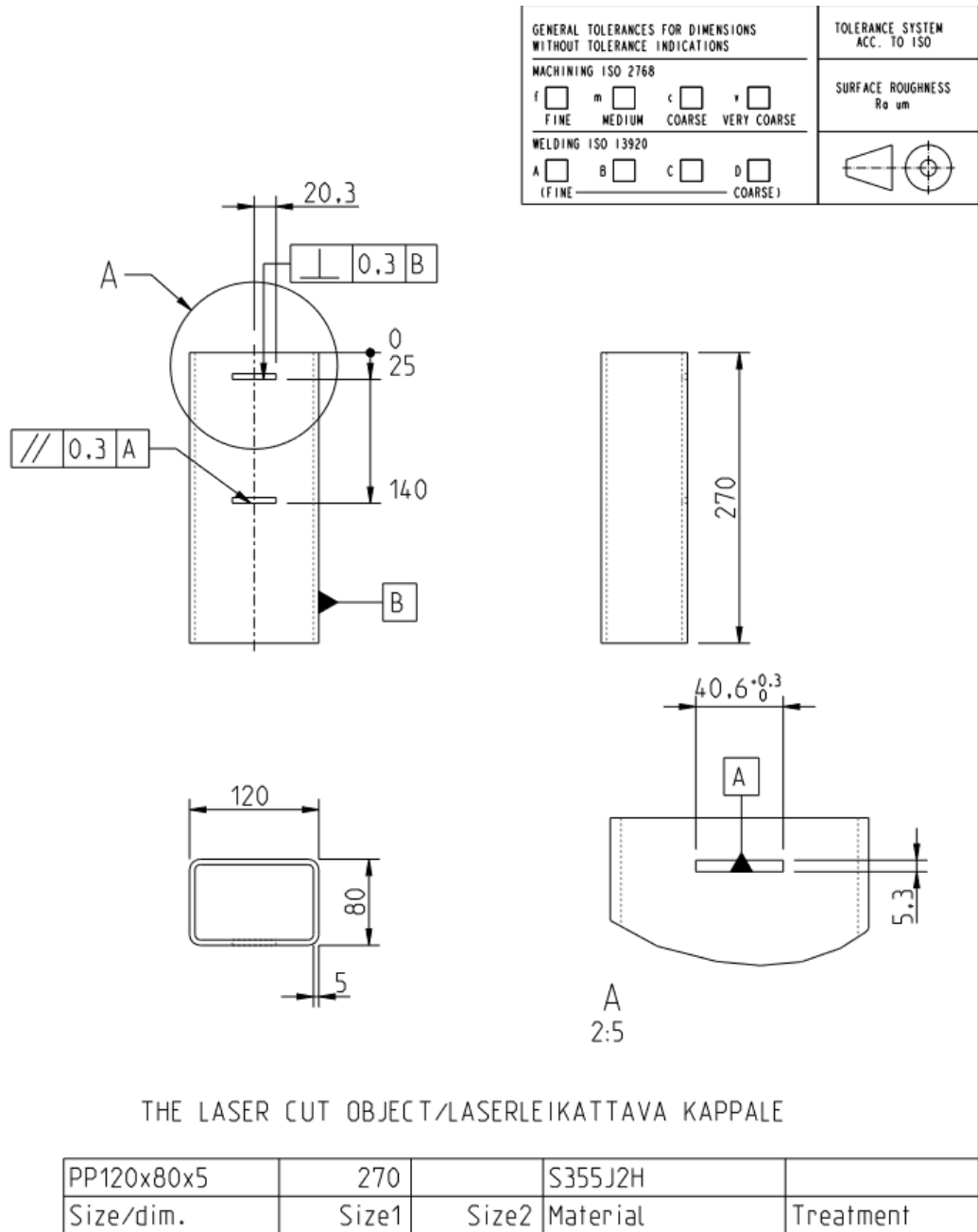
Kuvio 21. Viiste sivulta kuvattuna

Jokaisella eri toleranssilla mallinnetulla kappaleella tavoitteena on saavuttaa rungon lopullisten mittojen pysyminen samana. Tällöin reiän asemointia joudutaan kompensoimaan toleranssien mukaan. Tärkeä mitta tässä työssä on poikittaisen RHS-palkin korkeus pystypalkin päähän nähden. Mitan tulisi olla 20 millimetriä, (kuvio 22) jotta laitteisto tulisi halutulle korkeudelle mitä tässä opinnäytetyössä simuloidaan. Myöhemmin taulukoissa tähän mittaan lisätään lisäksi reiän korkeus, joten taulukoiden tavoitearvo on 25 millimetriä.



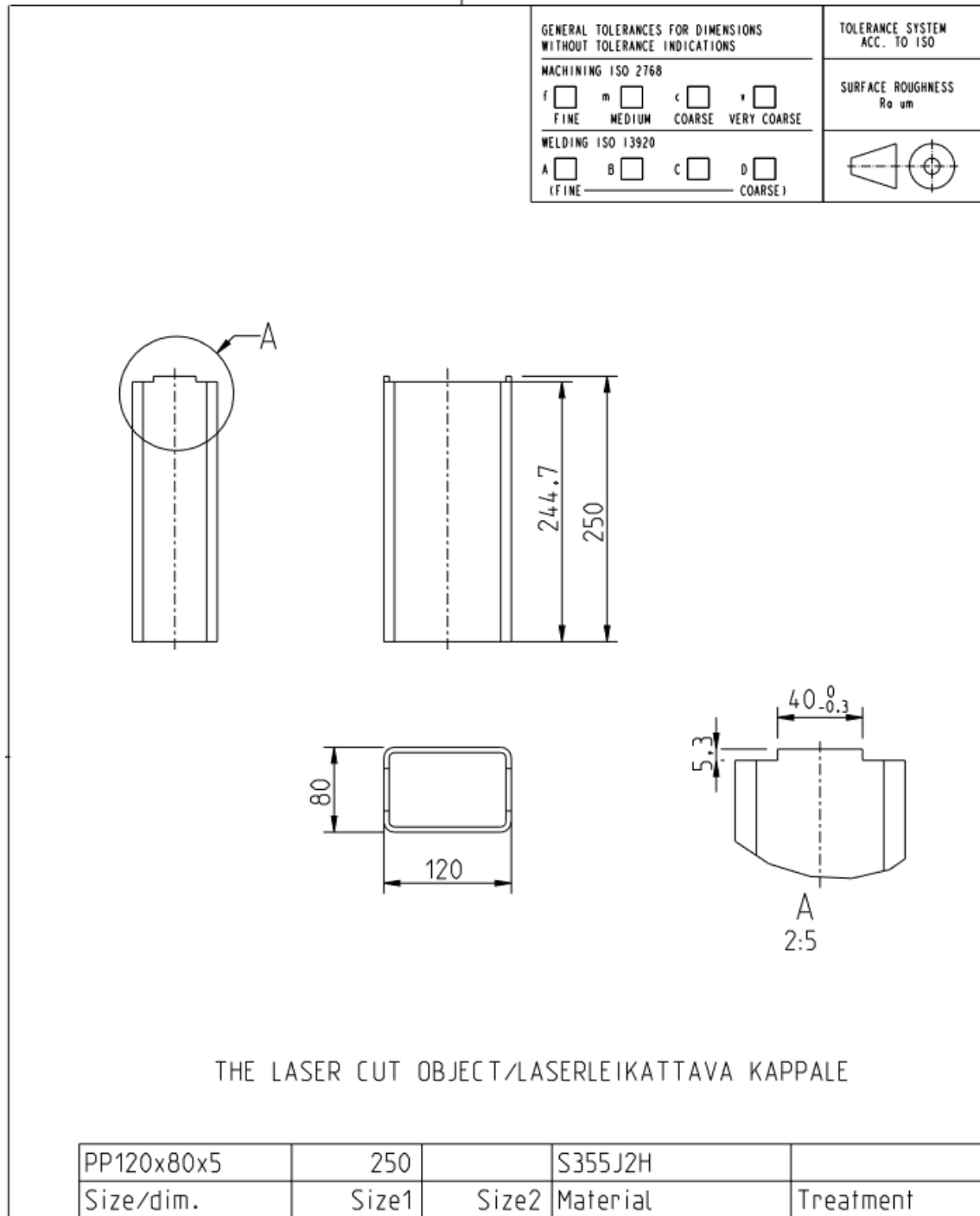
Kuvio 22. Runkopalkin ja päätypalkin pinnan etäisyys

Piirustuksiin merkittiin laserilla leikattavan reiän mitta ja toleranssi. Kappaleet suunniteltiin ja tilattiin kolmella eri toleranssimäärittelyllä. Paikotusreikien (kuvio 23) leveydet eri toleranssimäärittelyillä ovat 40,6 millimetriä, 41 millimetriä ja 42 millimetriä, eli reiän ja kielekkeen välinen mitta olisi 0,3 millimetriä, 0,5 millimetriä ja 1 millimetri puolellaan. Kappaleen reikien kulmat jätettiin tarkoituksella teräviksi, koska riippuen kappaleen tekijästä, kone tekee automaattisesti nurkkaan reikäkevennyksen, tai pyöristää nurkkaan laserin säteen paksuuden verran. Tässä työssä laserin kooksi on selvitetty 0,3 millimetriä. Kaikkien suunniteltujen kappaleiden piirustukset löytyvät liitteistä 1–6.



Kuvio 23. Reikäkappaleen piirustukset

Leikatun vastakappaleen (kuvio 24) kielekkeen leveys on 40 millimetriä, toleranssina -0,3 millimetriä. Tämä asettaa reiälle sen mitan, jonka avulla saadaan selvitettyä millä toleranssilla ja reiän kokoa muuttamalla kappaleet saadaan sovitettua parhaiten toisiinsa.

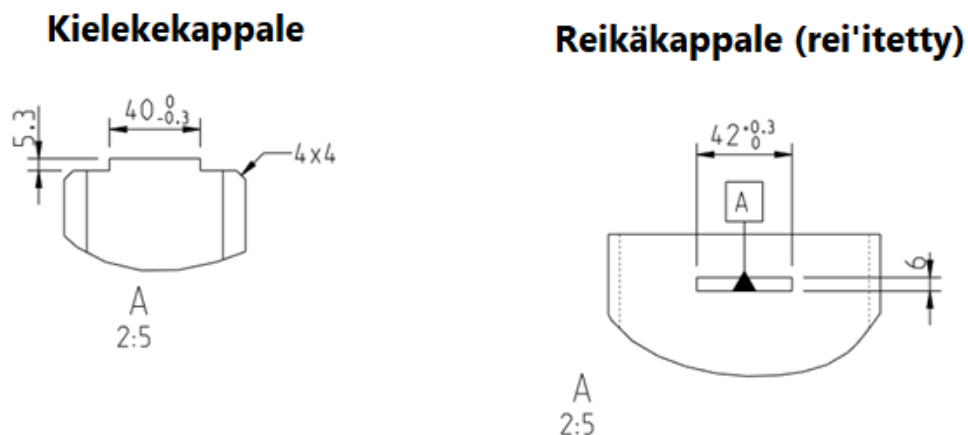


Kuvio 24. Kielekekappaleen piirustukset ilman viistettä

4.4 Koepalat

Koekappaleet (kuvio 25) tilattiin kolmesta eri Suomessa sijaitsevasta yrityksestä. Yrityksiä tässä työssä kutsutaan yrityksiksi A, B ja C. Yritykset A ja B saivat samat kappaleet valmistettavaksi, mutta yritys C:n laitteisto ei kykene 3D-leikkaukseen, minkä takia yritykseltä ei tilattu viisteellisiä kappaleita. Näiden yritysten kappaleita

vertailtiin ja sovitettiin toisiinsa ja tämän myötä tehtiin päätelmät, kuinka eri toimittajien tuottamat kappaleet sopivat toisiinsa, sekä tuloksena saatiin suositellavat toleranssit. Taulukossa 1 on listattu eri yrityksiltä tilatut kappaleet.



Kuvio 25. Valmistettavat kappaleet

Yritys B ilmoitti, ettei valmista tuotteita kuin ruostumattomasta teräksestä, mutta ne päätettiin silti tilata, jotta saataisiin laajempi mahdollisuus vertailla eri yritysten tekemien kappaleiden sopivuutta toisiinsa. Tämän myötä valmistauduttiin myös koekappaleiden hitsauksen suhteen hitsaamaan MIG/MAGin lisäksi ruostumattomalla teräspuikolla yritys B:n tuotteet toisiinsa.

Taulukko 1. Eri yrityksiltä tilattavien kappaleiden määrittelyt

	A	B	C
Reikä 40.6 +0.3	x	x	x
Reikä 41 +0.3	x	x	x
Reikä 42 +0.3	x	x	x
Viisteetön pykälä	x	x	x
2x2 viistetty pykälä	x	x	
4x4 pykälä	x	x	

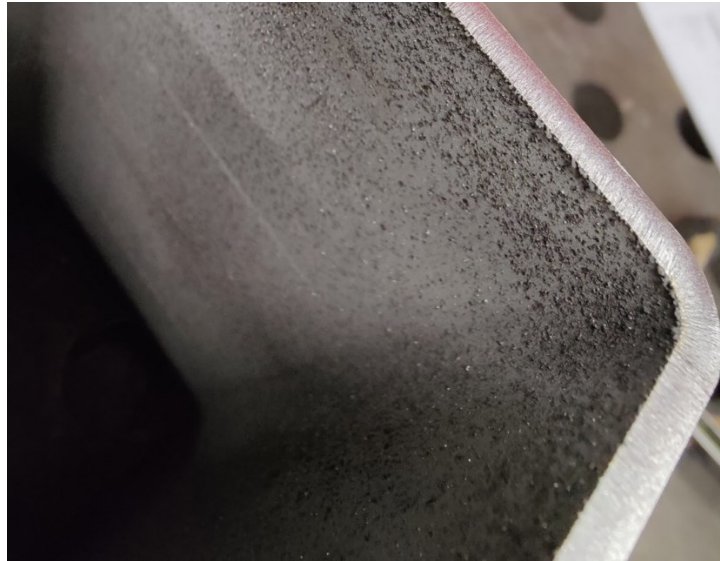
5 KOEKAPPALEIDEN MITTAUS JA ANALYSOINTI

Kappaleiden valmistus ja toimittaminen kesti jokaisella toimittajalla noin kaksi viikkoa. Kappaleet tarkastettiin silmämääräisesti ja mitattiin erilaisia työkaluja apuna käyttäen. Lopuksi osa kappaleista hitsattiin toisiinsa. Päämäärä tällä on selvittää, saadaanko eri toleranssiset kappaleet sovitettua toisiinsa ja kerätä havaintoja seikoista, jotka tulee ottaa tulevaisuudessa huomioon, kun tämänkaltaisia osia tehdään.

Teräskappaleiden hinnaksi tuli noin 35–60 euroa per kappale. RHS-palkin (120x80x5 S355J2H) raaka-ainehinta on tällä hetkellä yrityksestä riippuen noin 32–62 euroa/metri (Hartman 2024; KSteel 2024; Starcart 2024; Teräsmyynti 2024). Tulevaisuudessa on toki hyvä huomioida, että hintaan voi sisältyä myös käsittelykuluja ja kuljetuskuluja. Opinnäytetyön kappaleet olivat pieniä ja mahtuivat siksi helposti eurolavalle kuljetettavaksi. Tämä sama tilanne ei koske esimerkiksi, jos tilattava aihiomateriaali on 6 tai 12 metriä pitkää ja painavampaa, mikä näkyy kuljetuskustannuksissa enemmän.

5.1 Silmämääräinen tarkastus ja huomiot

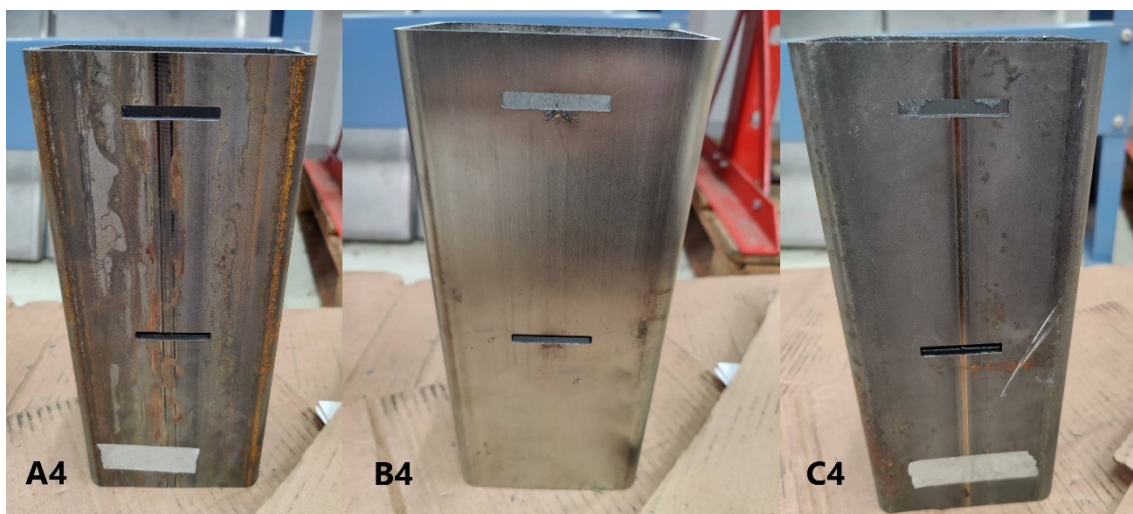
Silmämääräisellä tarkastuksella pystyttiin erottamaan jo heti alussa eroavaisuuksia yritysten kappaleiden välillä. Osaan kappaleista oli syntynyt kuvan 26 mukaista laserleikkauksen yhteydessä poltossa syntyvää rautaa/polttopölyä palkin sisälle.



Kuvio 26. Leikkauksessa syntynyttä polttopölyä. Kappale B4

Polttoleikkausrae palkin sisällä voidaan poistaa eri menetelmillä, jos se on tarpeen, mutta jos kappale on pitkä ja sen sisään ei yletetä sitä poistamaan, se voi jäädä sinne. Ajan mittaan mahdollinen kosteus voi tehdä tuosta pinnasta ruosteisen, joka voi heikentää jollain määrin kappaleen elinikää ja kestoä.

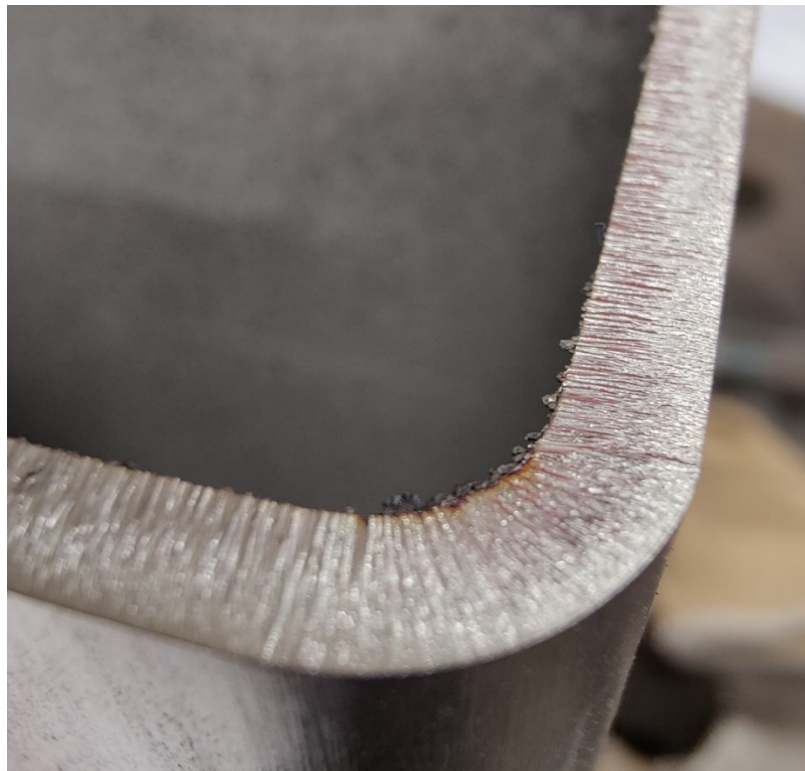
Yritys B:ltä pyydettiin tarjousta teräskappaleista, mutta heillä ei ollut mahdollista tehdä osia muusta materiaalista kuin ruostumattomasta teräksestä. Tästä huolimatta tilattiin mallikappaleet myös kyseiseltä yritykseltä, jotta saadaan suurempi otanta eri valmistajien kappaleita sovitettavaksi toisiinsa. Yritys B oli toisaalta ainoa, jonka osat olivat viistetty, kun taas muiden yritysten kohdalla viistettä ei pystytty tekemään laitteiston rajoitusten tai muun syyn takia.



Kuvio 27. Eri yritysten valmistamien kappaleiden vertailua.

Joidenkin palkkien pinnoissa ilmeni kevyttä pintaruostetta (kuvio 27) joka tulee hioa pois ainakin hitsin alueen läheltä ennen hitsausta. Pintaruostetta yleensä tulee kappaleisiin kuljetuksen yhteydessä tai varastoinnin puutteiden takia.

Kappaleiden laserleikkaus synnytti leikatuille pinnoille polttoleikkausviiltoja (kuvio 28) jotka voivat olla kriittisiä jossain kappaleissa. Laserleikkaus ei ole pinnanlaadullisesti siis samanlainen kuin koneistus, mutta sillä saadaan erittäin siistiä ja tarkkaa jälkeä.



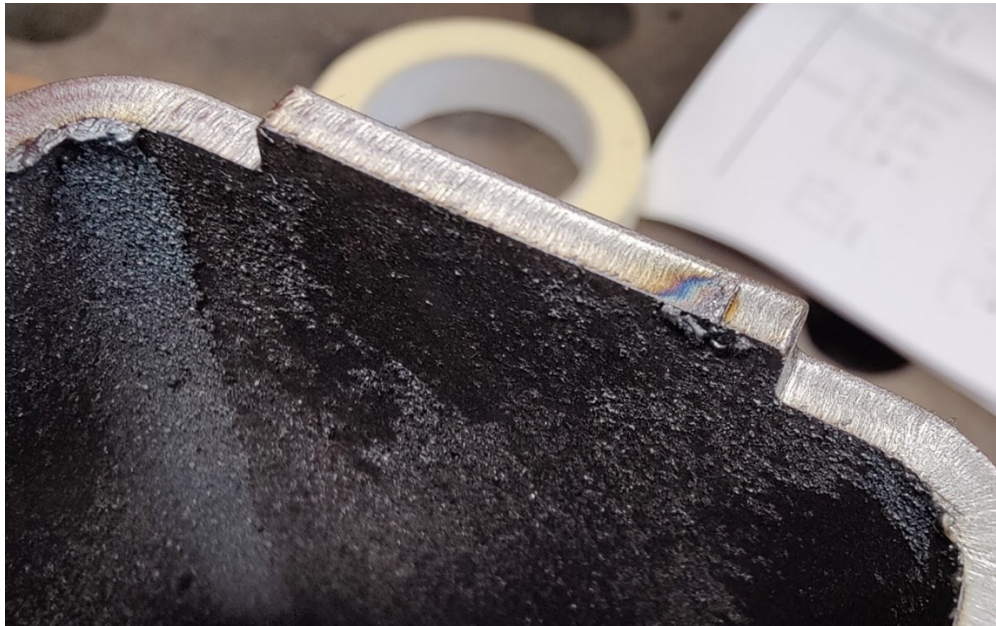
Kuvio 28. Viiltoja leikkauskohdassa. Kappale B4

Paksujen kappaleiden laserleikkauksessa esiintyy myös purseita laserin vastaisella puolella (kuvio 29), joka saattaa estää lovimaisissa kohdissa kappaleiden paikoittamisen toisiinsa. Näiden purseiden poistoon vaaditaan mahdollisesti viilaa, tai muuta työkalua, jolla purse saadaan poistettua, vahingoittamatta tarkkaa laserleikattua kohtaa, jolla kappaleet voidaan paikoittaa toisiinsa.



Kuvio 29. Pursetta leikatun kappaleen takapuolella. Kappale C3

Kappaleissa myös ilmeni aloitus/lopetuskohta (kuvio 30) laserpinnassa, joka jättää tietynlaisen palomerkinnän. Tämä voi kriittisessä paikassa olla heikentävä tekijä.



Kuvio 30. Leikkauksen aloitus/lopetuskohta. Kappale A1

5.2 Mittaukset

Kappaleille suoritettiin tarkastusmittaukset määritellyille mitoille, jotka mainittiin piirustuksissa. Näistä tuloksista luotiin tarkastuspäiväkirjan mukainen taulukko.

Mittaukset suoritettiin erilaisilla mittalaitteilla, kuten työntömitan ja rullamitan avulla (kuviot 31 ja 32).



Kuvio 31. Tarkastusmittauksia työntömitalla. Kappale B4

Apuna käytettiin myös suorakulmaa. Laserleikkauksen pinnallinen suoruusleikkaus vaihteli joissain kappaleissa (taulukko 2, mitta B), mutta heitto oli hyvin vähäistä tästä huolimatta.

Taulukko 2. Kielekekappaleen tarkastusmittaustulokset (mitat millimetreinä)

Kappale	A	B	C	D	E
A1	250	5,2-5,3	39,9	ei	120
A2	250	5,2-5,4	39,92-39,95	ei	120
A3	250	5,2-5,3	39,96-39,97	ei	120
B1	250	5,1-5,5	39,9	ei	121
B2	250	5,52-5,53	39,45-40,05	2,75	120,5
B3	250	5,3-5,4	39,9-40	4,3	121
C1	250	5,0-5,5	39,7-39,8	ei	120,5-121

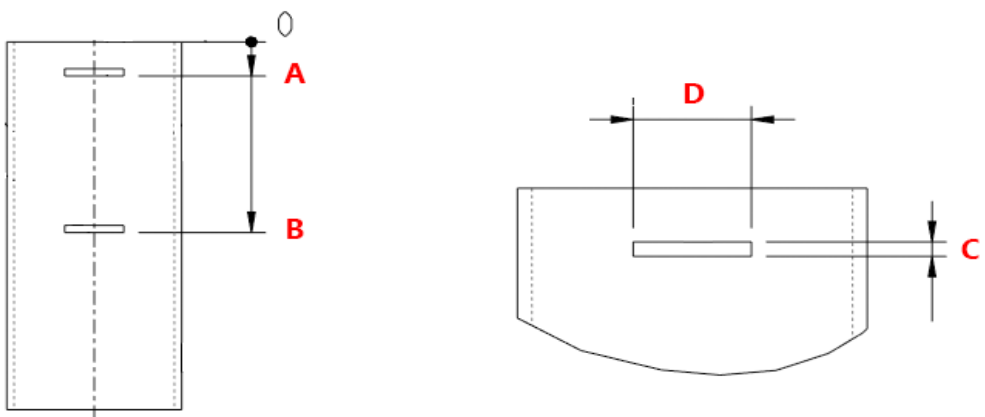
Mittauksissa merkittävin löydös oli B-yrityksen kappaleiden ulkomitat (taulukko 2, mitta E), jotka saattoivat heittää jopa 1 millimetriä (kuvio 32). Tämän takia osa, varsinkin runsaasti purseita sisältävistä kappaleista eivät sopineet toisiinsa ah-
taimmilla toleranssimäärittäyksillä.



Kuvio 32. RHS-palkkiaihiössä toleranssien mukainen mittapoikkeama. Kappale C1

Valitun RHS-palkin standardi (SFS-EN 10219-2:2019) sallii 1 % poikkeaman palkin ulkomitoissa, joka tässä tapauksessa on lähellä sallittua maksimia. Tämä havainto on hyvä ottaa huomioon tulevaisuudessa, suunniteltaessa samankaltaisia kappaleita käyttäen RHS-palkkia.

Taulukko 3. Reikäkappaleen tarkastusmittaustulokset (mitat millimetreinä)



Reikäkappale

Kappale	A	B	C	D
A4	25	140	5,1	40,4-40,5
A5	25	140	5,3	40,9-40,95
A6	25	140	5,8-5,9	41,94-42
B4	25	140	5,4	40,65
B5	25	140	5,6	41,05
B6	25	140	6,1	42,02
C2	25	140	5,3-5,4	40,6-40,65
C3	25	140	5,6	41-41,03
C4	25	140	6,06-6,1	42,01

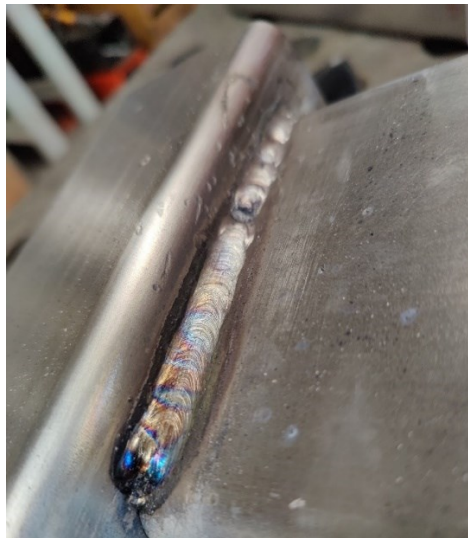
Taulukossa 3 on esitetty reikäkappaleiden mittaustulokset. Kappaleet C2 ja B1, C1 ja C2 sekä B4 ja B2 eivät sopineet toisiinsa. Tiukoilla toleransseilla olevat (A4, B4, C2) joiden toleranssi oli 0,3 oli sovittaessa muihin kappaleisiin hyvin tiukka tai sopimaton (kuvio 33).



Kuvio 33. Liian tiukka sovitus. Kappaleet C1 ja C2

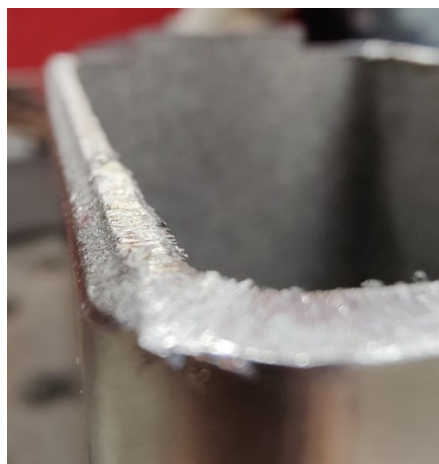
5.3 Hitsaus

Toisiinsa hitsattavat kappaleet ovat A1 ja C2, B6 ja B3, B5 ja B2, A2 ja C3. Ko-
keessa hitsattiin ruostumattomat teräskappaleet toisiinsa, koska ei ole suositel-
tavaa hitsata terästä ja ruostumatonta terästä toisiinsa. Ruostumattoman teräk-
sen kappaleet puikkohitsattiin toisiinsa 2,5 millimetrin RST/haponkestävä hit-
sauspuikolla (kuvio 34).



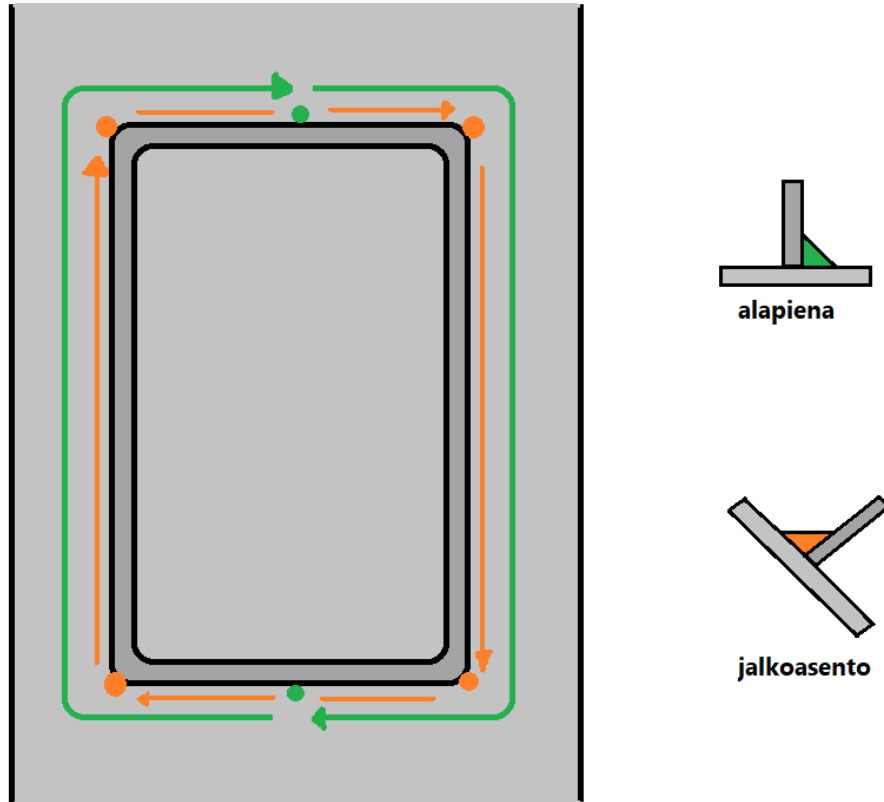
Kuvio 34. Ruostumattoman teräksen puikkohitsausnaama hitsattuna jalkoasen-
nossa. Kappale B5+B2

Hitsatessa huomioon otettiin hitsausasento, hitsausjärjestys ja niiden vaikutus
kappaleiden liittämiseen. Kappaleyhdistelmään A2/C3, kappaleeseen A2 tehtiin
viiste parantamaan hitsin tunkeutuvuutta (kuvio 35). Viiste tehtiin piirrosten mu-
kaisesti.



Kuvio 35. Viiste kappaleessa A2

Kappaleen hitsaus suoritettiin hitsauksen kestävyyden kannalta parhaimmissa asennoissa eli jalko- ja alapiena-asennoissa (kuvio 36). Jos kappale hitsattaisiin kokonaan jalkoasennossa, kaikki hitsien aloitus ja lopetuskohdat olisivat kulmissa, joka voisi heikentää kappaleen rakennetta.



Jalkoasennossa hitsattu jolloin lopetukset nurkissa.

Hitsattu alapienana, jolloin lopetukset tulevat haluttuihin kohtiin ja niitä on vähemmän.

Kuvio 36. Kaaviokuva alapiena- ja jalkoasentohitsauksesta

Tämän välttämiseksi kappaleen viistetyin sivun viiste hitsattiin jalkoasennossa (kuvio 37), mutta muutoin kappale hitsattiin ympäriinsä alapiena-asennossa (kuvio 38) ja aloitus ja lopetuskohdat hiottiin.



Kuvio 37. Viisteen hitsaus jalkoasennossa. Kappaleet C3 ja A2

Railo on tässä tapauksessa puoli-V-railo, mikä ei ole paras mahdollinen ratkaisu, mutta RHS-palkin muoto estää tekemästä viistettä molemmille puolille. Jos railo voitaisiin tehdä molemmille puolille, kyseessä olisi V-railo.



Kuvio 38. Ympärihitsaus alapiena-asennossa. Kappaleet C2 ja A1

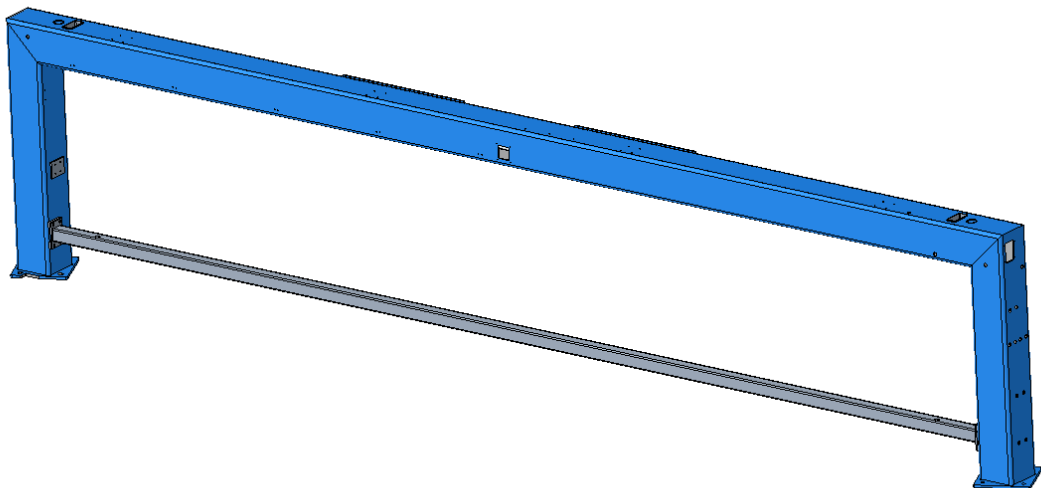
Tätä opinnäytetyötä tehtäessä käytettiin lyhyitä kappaleita ja tutkittiin laserleikatujen kappaleiden sopivuutta toisiinsa. Todellisuudessa hitsattavat laitekokoonpanot ovat pitkiä ja leveitä, joten niiden valmistaja mahdollisesti hitsaa ne niin, että toinen kappaleista on vaaka-asennossa ja toinen pystyasennossa. Tällöin hitsaus tapahtuu RHS:n alapuolelta RHS:n päälle. Jos valmistaja haluaa toimia näin, eikä halua hitsata hitsiä alapiena-asennossa, tulee ottaa huomioon kokoonpanoa suunniteltaessa ja lujuuksia laskiessa, että hitsi saatetaan tehdä ei-optimaalisesti. Tällöin virheiden määrä voi olla suurempi ja hitsin kestävyys huonompi.

6 TULOKSET

Mitattujen ja tutkittujen kappaleiden perusteella sekä olemassa olevaa tietoa hyödyntäen päätettiin tehdä seuraavat suositukset laserleikattavien kappaleiden suunnittelua varten. Tuloksien perusteella luotiin kirjallinen ohjeistus toimeksiantajan käyttöön.

6.1 Laserleikkauksen suositellut käyttökohteet

Esimerkkitapauksessa pitkiä RHS-palkkeja toisiinsa hitsattaessa huomattiin, että hyötyä voisi olla varsinkin kokoonpanijalle työn helpottamiseksi. Kielekeosuus voisi olla pidempi, jolloin pystypalkin ja pitkän vaakapalkin asemointi toisiinsa olisi helpompaa.



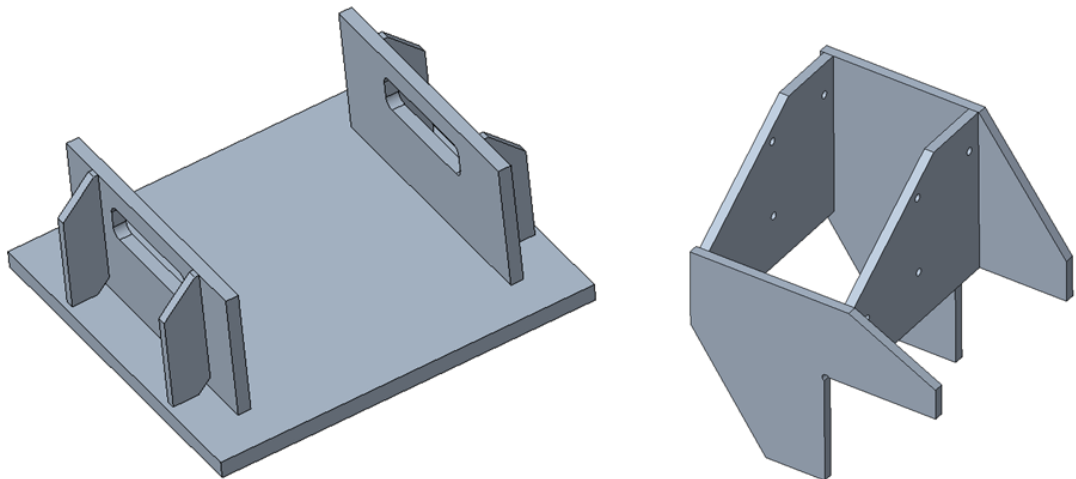
Kuvio 39. Useita metrejä pitkä rakenne

Jos viisteiden teko on mahdollista, sen hyödyntäminen yhdistettäessä pitkiä RHS-palkkeja (kuvio 39) toisiinsa voisi tuoda myös hyötyä valmistukseen. Tällöin tosin on suositeltavaa käyttää mahdollista juuritukea (kuvio 40), joka asemoidaan paikalleen ennen palkkien hitsausta toisiinsa.



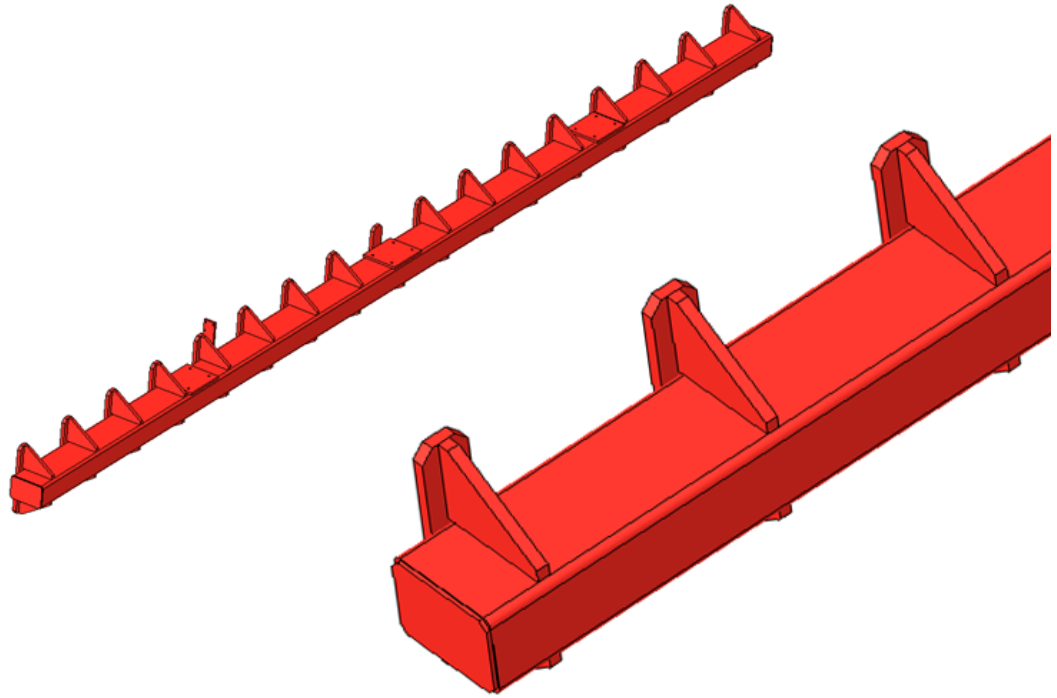
Kuvio 40. Juurituki viistetyn RHS-palkin sisällä (Lepola & Ylikangas 2023, 376.)

Laserleikkauksen suurin hyöty ilmenee tapauksessa, jossa kappaleilla on suuri tarkkuusvaatimus toistensa suhteen asemoinnissa tai kappale on hankala mitoitaa (kuvio 41) paikalleen perinteisten mittatyökalujen avulla. Tällaisten kappaleiden kokoonpano myös helpottuu rakenteen ollessa itseään tukeva.



Kuvio 41. Hankalasti mitoitettavia kappaleita

Tämän lisäksi toinen merkittävä käyttökohte on pitkä RHS, johon täytyy asemoida pitkälle matkalle useita samankaltaisia palasia, esimerkiksi levyjä pystyssä tarkalla mitoituksella (kuvio 42). Pitkien matkojen mittaaminen rullamitalla tuo työhön omat haasteensa, jotka voidaan laserleikkauksen avulla välttää, kun kappaleet asemoituvat toisiinsa automaattisesti.



Kuvio 42. Pitkiä kappaleita, joissa aseointi voi olla hankalaa

6.2 Saavutetut hyödyt

Laserleikkaus vähentää selkeästi kappaleiden väärin mittojen syntymistä ja mahdollistaa halutun tarkkuuden saavuttamisen. Kappale asettuu juuri haluttuun kohtaan korkeussuunnassa. Mahdollisten kappaleiden valmistuksessa tapahtuvien virheiden määrä selkeästi vähenee. Kokoonpanossa syntyvien virheiden määrä vähenee myös laserleikattujen kappaleiden avulla muihin leikkausmenetelmiin verrattuna (plasmaleikkaus, polttoleikkaus). Laserleikkauksen lämmön aiheuttama taipuminen on huomattavasti vähäisempi esimerkiksi plasmaleikkauksen verrattuna. Vaikka laserleikkaus jättää silmällä erotettavia leikkauskuvioita

leikattuun pintaan, pintaan ei jää polttoleikkauksesta syntyvää kuonaa, jota esiintyy esimerkiksi plasmaleikkauksen yhteydessä. Laserleikatut kappaleet ovat heti valmiita hitsattavaksi ilman leikkauskohdan valmistelua, esimerkiksi hiomista.

6.3 Ohjeistukset

Työn tulosten perusteella laadittiin toimeksiantajayritykselle ohjeistukset laserleikkauksen käytöstä suunnittelussa. Ohjeistuksessa otetaan kantaa käytettävien toleranssien, merkintöjen ja toimitettavien tiedostojen ja piirustusten osalta. Ohjeistus tehtiin käytännönläheisesti, esimerkkikappaleita ja kuvia käyttäen, jotta ohjeistuksen mukaan tehtyjen kappaleiden suunnittelu olisi mahdollisimman helppoa ja yleisimmiltä virheiltä välttäisi. Ohjeistusta tullaan päivittämään jatkossakin, laserleikkauksen yleistyttyä yrityksen suunnittelussa. Ohjeistuksen liitteenä on myös esimerkkikappaleiden piirustuksia, joita voidaan käyttää apuna suunnittelussa.

6.3.1 Lasertoleranssit

Kappaleita mitattaessa ja sovitettaessa toisiinsa todettiin, että toleranssin olisi hyvä olla reilusti yli 1 millimetriä (1% RHS:n ulkomitasta) kohdissa, joissa RHS:n oma ulkomitan toleranssi on merkitsevämpi kuin laserin toleranssi. Tällainen mitta on esimerkiksi kielekekappaleiden E-mitan mukaan määräytyvä reikäkappaleen C-toleranssi.

Kohdissa, joissa ainoastaan laserin toleranssi merkitsee, kuten kielekekappaleiden C-mitta ja reikäkappaleiden D-mitta, minimitoleranssi (0,3 millimetriä) todettiin käytännössä ahtaaksi ja paikoitellen jopa käyttökelvottomaksi. Tämän takia minimitoleranssiksi suunnittelussa tullaan suosittelemaan 1 millimetriä. Toleranssin vaikutus tulee ottaa huomioon joko kielekkeen tai sitä vastaavan reiän mitoituksessa. Kielekkeen tapauksessa mittaa pienennetään ja reiän tapauksessa mittaa kasvatetaan.

6.3.2 Hitsausasennot

Suosittelava hitsausasento hitsauksen tunkeuman ja kateettipoikkeaman välttämiseksi ja hitsin onnistumisen varmistamiseksi on jalkoasento, mutta RHS-palkin

muodon ja pitkien rakenteiden takia jalkoasento ei ole aina mahdollinen. Alapiena on seuraavaksi varmin vaihtoehto mahdollisimman vähäisillä pysähdyksillä, jos valmistajalla on mahdollisuus kääntää kokonpanoa. On pidettävä kuitenkin mahdollisena vaihtoehtona, että valmistajalla ei ole mahdollisuutta kääntää isoja kokonpanoja ideaaliseen hitsausasentoon. Tällöin valmistaja tulee ne hitsaamaan hankalimmissa asennoissa, mikä vaatii päteviä hitsaajia toteuttamaan näitä hitsausoperaatioita, kuten laki- ja pystysaumoja. Tärkeintä hitsaukseen liittyen on kuitenkin onnistunut juuripalko tai alin piena, joka yhdistää kaksi kappaletta toisiinsa. Jos hitsi vaatii vielä erityistä lujuutta, voidaan käyttää TIG-käsittelyä tai mekaanista jälkikäsittelyä hitsiin.

6.3.3 Merkinnät

Laserleikattujen kappaleiden pintoihin on hyvä merkata erilaisia pinnansuoruuksia/tai kulmasuoruuksimerkintöjä koneistusmerkkauksella. Erilaiset suoruuksimerkinnät auttavat valmistamaan kappaleita niin, että ne sopivat toisiinsa mahdollisimman hyvin. Tässä on tuki huomioitava RHS-palkkialueen oma toleranssi. Toleranssisuoruuksien olisi hyvä olla mahdollisimman tarkka, jotta esimerkiksi pitkissä kappaleissa epäsuoruus ei kasvaisi valtavasti. Suoruuksitoleranssi voisi olla esimerkiksi 0,5–1 millimetriä, riippuen esimerkiksi kohdistusreiän koosta.

6.3.4 Tiedostomuodot

Yrityksiltä tilattaessa leikattuja RHS-tuotteita, ne usein toivovat tavallisten piirustusten lisäksi STEP-tiedostoja mallista. Laserleikkauslaitteisto voi käyttää suoraan STEP-tiedostomallia kappaleen tietojen määrittelyyn, ellei tietoja haluta syöttää manuaalisesti piirustusten pohjalta. Piirustukset toimivat tällöin valmistajalla enemmänkin mittojen jälkitarkastuksen kannalta tärkeässä roolissa. Valmistuksen jälkeen konepajoissa piirustuksista mittojen tarkastaminen onnistuu helpommin kuin STEP-tiedostosta mittoja varmistaen ohjelmalla. Lisäksi STEP-tiedosto ei sisällä toleranssitietoja, jotka määrittävät mahdollisten sallittujen virheiden suuruuden. Jos laserleikattava kappale tehdään levystä, tällöin mukaan riittää DXF-tiedosto piirustuksien kanssa.

7 POHDINTA

Tämän työn aloittaminen oli mielestäni mielenkiintoista. Kun alussa saatiin kar-
toitettua, mitä haluttiin tutkia ja mitä varten, sai työ selkeän suunnan ja tavoitteen.
Työ sisälsi itselleni entuudestaan tuttuja asioita, esimerkiksi hitsauksen osalta,
mutta sain valtavasti uutta tietoa muun muassa laserleikkauksesta. Laserleikat-
tujen kappaleiden suunnittelu ja niihin liittyvän tiedon selvittäminen, sekä kuinka
niitä voitaisiin hyödyntää, teki työstä myös haasteellisen. Koska aiempaa tietoa
ei tästä menetelmästä ollut, vaan ainoastaan muista leikkausmenetelmistä, oli
mielenkiintoista käsitellä kappaleita ja havaita niistä asioita, joita ei tiennyt ennes-
tään.

Työssä haluttiin selvittää, olisiko laserleikkauksesta hyötyä yrityksen suunnittelu-
toiminnalle ja missä sitä voisi käyttää. Työn aikana havaittiin monia kohteita,
joissa laserleikkaus voisi nopeuttaa kokoonpanoa huomattavasti, sekä vähentää
virheiden mahdollisuuksia. Omasta mielestäni tämän työn avulla saadaan tär-
keää tietoa, mitä suunnittelussa kannattaa ottaa huomioon, kun laserleikkausta
aletaan käyttää tulevilla tuotteilla. Päättelänä onkin, että laserleikkaus on kan-
nattava lisä yrityksen suunnittelussa, ja sitä kannattaa käyttää oikeissa kohteissa.

Työssä on pyritty lähestymään tutkimusaihetta mahdollisimman käytännönlähei-
sesti ja simuloimalla oikean laitteiston suunnittelussa ja kasaamisessa käytettä-
viä työtapoja. Todennäköisesti oikean laitteiston kohdalla suunnittelussa ja ko-
koonpanossa löydetään vielä kehittämiskohteita, mutta tämän työn pohjalta ris-
kejä pyritään minimoimaan ja antamaan hyvä alku laserleikkauksen käyttöön oh-
jeistuksen ja esimerkkien kautta. Jatkossa toimeksiantaja tulee päivittämään oh-
jeistuksia kokemusten myötä.

Jatkoa ajatellen toimeksiantaja voisi tilata johonkin laitteeseen laserleikattuja le-
vykappaleita ja selvittää niiden tolerointia ja tarkkuutta. Näin saataisiin ohjeistus
kattamaan myös levystä laserleikattuja kappaleita, jotka ovat olleet haastavia val-
mistaa korkeiden toleranssivaatimuksien takia. Lisäksi RHS-laseroinnin hyödyn-
täminen pitkien palkkien yhdistämisessä saattaisi olla kannattava kokeilu. Juuri-
tuen asettaminen railotetun RHS:n sisälle hitsaamista helpottamaan todennäköi-
sesti auttaisi myös laitteiden kokoonpanossa ja yhdistämisessä. Jatkossa on

myös hyvä huomioida hitsiasentojen lisäksi hitsien kokoja, tarvitaanko kappaleeseen railoa hitsille vai ei, ja millä hitsausmenetelmällä hitsit tullaan tekemään.

Mielestäni oma oppiminen ja kehittyminen koneinsinööriopiskelijana kasvoi tämän työn myötä ja antoi uutta tietoa, jota pystyn hyödyntämään tulevaisuudessa. Opin etsimään tietoa ja mahdollisuuksia, joiden avulla voidaan tehdä vieläkin parempia tuotteita. Pääsin myös toteuttamaan mielenkiintoani hitsaamiseen ja hitsattujen kappaleiden rakenteisiin, samalla oppien materiaalivirtauksen monimuotoisuutta.

LÄHTEET

- AGA 2014. Käytännön ohjeita MIG/MAG hitsaukseen. Viitattu 10.11.2024
https://www.linde-gas.fi/fi/images/AGA%20MIG%20MAG%20Welding%20Brochure%202014%20FI_tcm634-122347.pdf.
- Björk T., Hautala P., Huhtala K., Kivioja S., Kleimola M., Lavi M., Martikka H., Miettinen J., Ranta A., Rinkinen J. & Salonen P. 2014. Koneenosien suunnittelu 6., uudistettu painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- ESAB 2024a. Hitsausasennot ja niiden tunnuksset. Viitattu 17.10.2024
<https://assets.esab.com/assetbank-esab/assetfile/12579.pdf>.
- ESAB 2024b. Hitsausasentojen neljä päätyyppiä. Viitattu 17.10.2024
https://esab.com/fi/eur_fi/esab-university/blogs/4-main-types-of-welding-positions/.
- Fibersaw 2024. 3D laser tube cutting. Viitattu 17.10.2024
<https://fibersaw.com/3d-laser-tube-cutting-machine>.
- Hartman 2024. Putkipalkki 120x80x5 S355J2H. Viitattu 13.11.2024
<https://www.hartman.fi/fi/putkipalkki-120x80x5-s355j2h-px48>.
- Heinonen M., Keinänen T. & Kärkkäinen P. 2016. Konetekniikan perusteet. 12., uudistettu painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- Irsel G. & Guzey B. 2021. Comparison of laser beam, oxygen and plasma arc cutting methods in terms of their advantages and disadvantages in cutting structural steels. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2130. No. 1. IOP Publishing. Viitattu 25.5.2024 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2130/1/012022/meta>.
- KSteel 2024. Putkipalkki 120X80X5 MM S355 L=6M. Viitattu 13.11.2024
<https://www.ksteel.fi/tuote/putkip-120x80x5-mm-s355j2h-l6m/>.
- Lepola P. & Ylikangas R. 2023. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. 1.–4. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- Maaranen K. & Heinonen M. 2014. Tekniset piirustukset: Konetekniikka. 1-2. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- ManufacturingGuide 2024a. Tube laser cutting 2D. Viitattu: 17.10.2024
<https://www.manufacturingguide.com/en/tube-laser-cutting-2d>.
- ManufacturingGuide 2024b. Tube laser cutting 3D. Viitattu: 17.10.2024
<https://www.manufacturingguide.com/en/tube-laser-cutting-3d>.
- Naksri, C., Chuchom, S. & Chaiprapat, S., 2021. Design of Fixture for Welding. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1163, No. 1, p. 012007). IOP Publishing. Viitattu: 17.10.2024
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1163/1/012007/meta>.

Pandit, H., 2022. Jigs and fixtures in manufacturing. International Journal of Engineering Research and Applications, 12(10), pp.50-55. Viitattu: 17.10.2024 https://www.researchgate.net/profile/Harshwardhan-Pandit/publication/364336968_Jigs_and_Fixtures_in_Manufacturing/links/634d236aff870c55ce2ba6df/Jigs-and-Fixtures-in-Manufacturing.pdf.

Pere A. Koneenpiirustus 1&2 2016. 12. painos. Espoo: Kirpe Oy.

Piscini, A. 2020. Passing-through Tubular Column Joints for Steel and Composite Constructions made by Laser Cutting Technology. Väitöskirja, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Viitattu 26.7.2024 <https://publications.rwth-aachen.de/record/835390>.

PTC 2024. 3D Design. Viitattu: 10.8.2024 <https://www.ptc.com/en/technologies/cad/3d-design>

Riveiro A., Quintero F., Lusquiños F., Comesaña R., del Val J. & Pou J. 2011. The Role of the Assist Gas Nature in Laser Cutting of Aluminum Alloys. Physics Procedia Vol 12, Part A. Sivut 548-554. Viitattu 26.7.2024 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001489>.

SFS-EN 10219-2:2019. Kylmämuovattut hitsatut teräksiset rakenneputket. Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkileikkaussuureet. 3. painos. Suomen Standardoimisliitto SFS.

Starcart 2024. Putkipalkki teräs suorakaide 120x80x5,0 mm S355J2H pituus 12 m. Viitattu 13.11.2024 <https://starcart.com/en-FI/product/Putkipalkki-ter-s-suorakaide-120x80x5-0-mm-S355J2H-pituus-12-m/f08f3694-3075-466e-9fb5-c3410ed58c0d/>.

Teräsmyynti 2024. RHS | Rakenneputki, suorakaide S355. Viitattu 13.11.2024 <https://www.rautaanetista.fi/products/rakenneputki-suorakaide-s355?variant=30389745483851>.

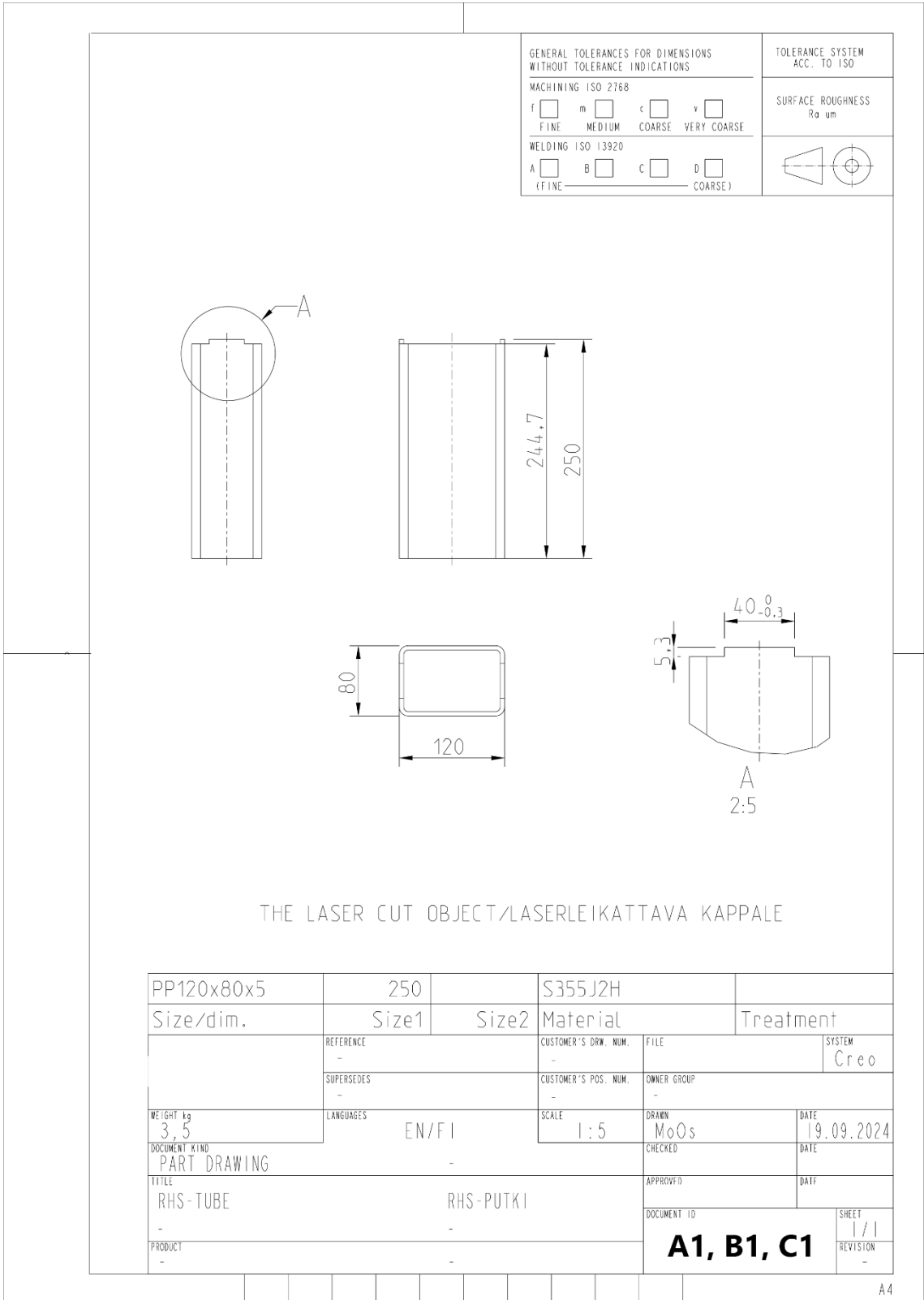
Vahterus 2024. Tuote joka sovellukseen. Viitattu: 17.10.2024 <https://vahterus.com/fi/applications/>.

Yeswelder 2024. Stick welding rod sizes explained. Viitattu: 17.10.2024 <https://yeswelder.com/blogs/yeswelder/stick-welding-rod-sizes-explained>.

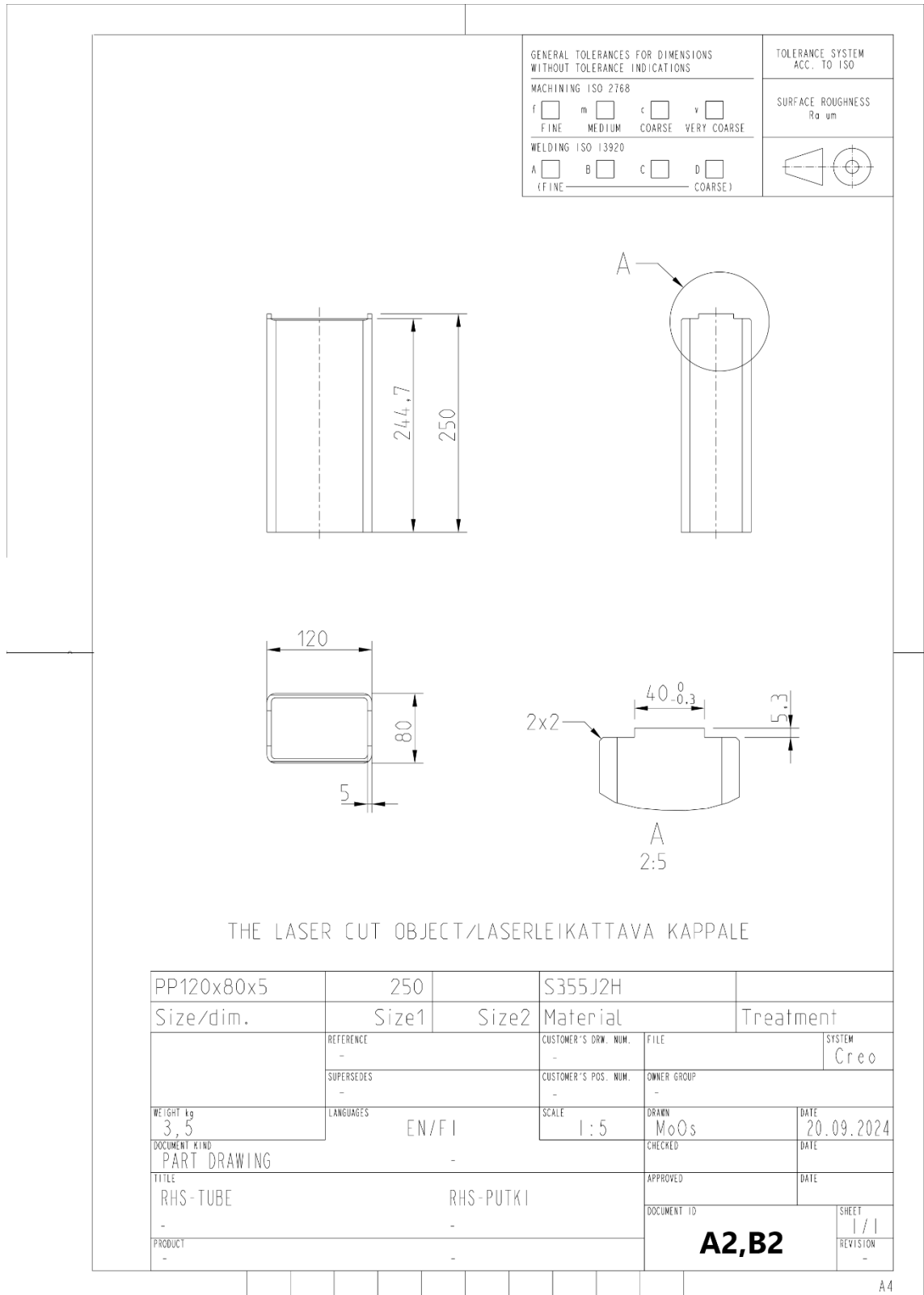
LIITTEET

- Liite 1. Kappaleiden A1, B1 ja C1 piirustukset
- Liite 2. Kappaleiden A2, ja B2 piirustukset
- Liite 3. Kappaleiden A3 ja B3 piirustukset
- Liite 4. Kappaleiden A5, B5 ja C3 piirustukset
- Liite 5. Kappaleiden A6, B6 ja C4 piirustukset
- Liite 6. Kappaleiden B4, C2 ja A4 piirustukset

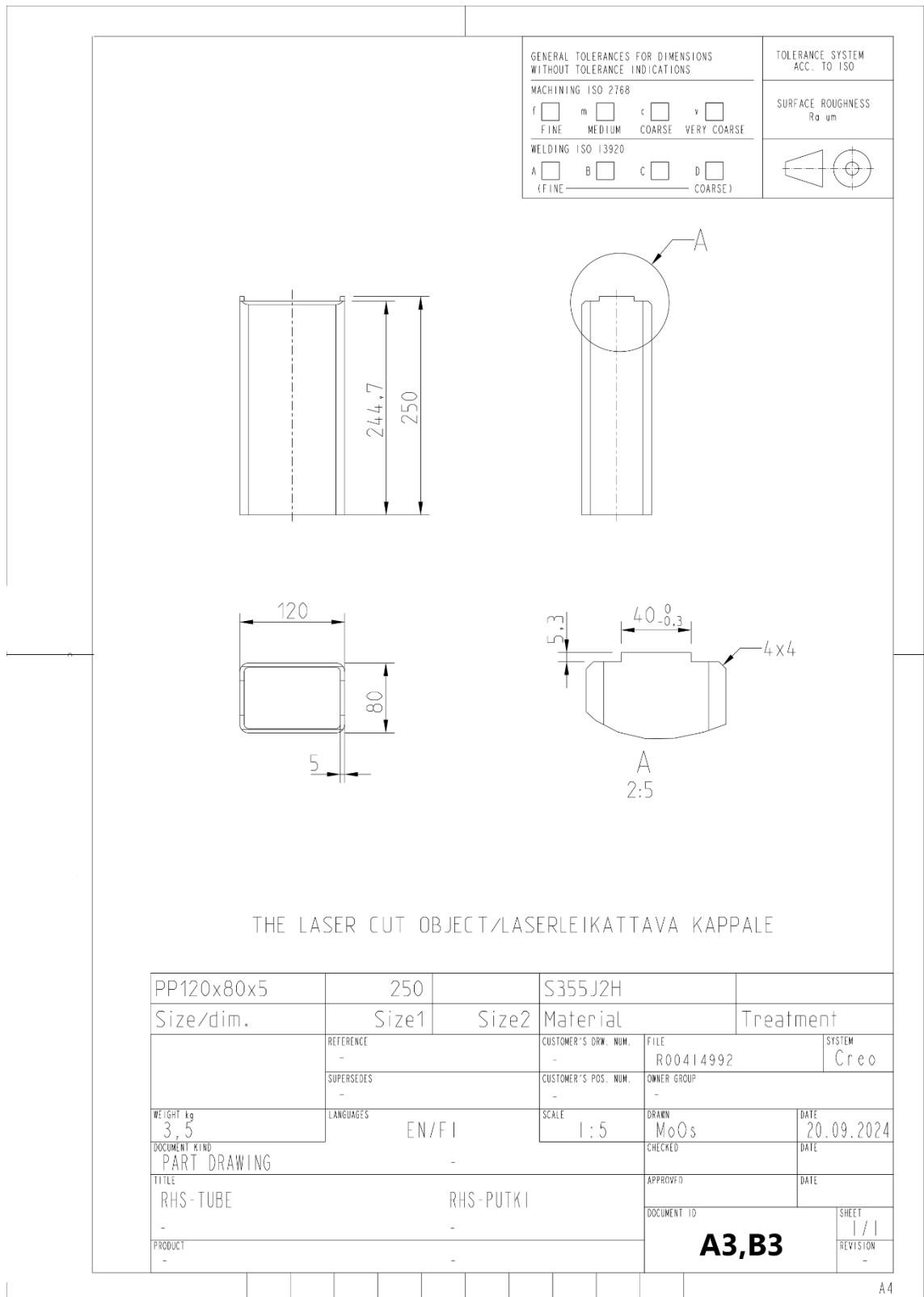
Liite 1. Kappaleiden A1, B1 ja C1 piirustukset



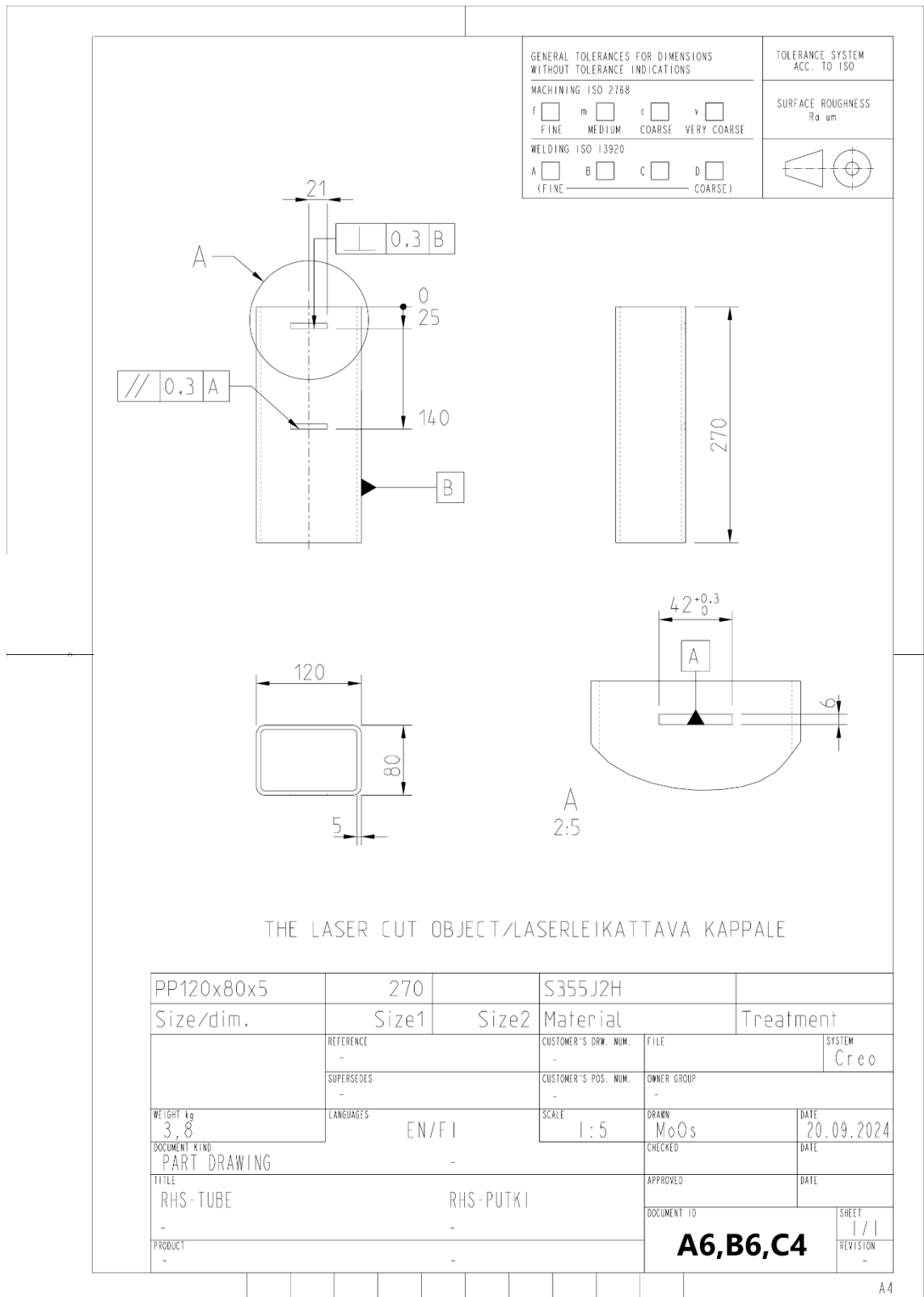
Liite 2. Kappaleiden A2 ja B2 piirustukset



Liite 3. Kappaleiden A3 ja B3 piirustukset



Liite 5. Kappaleiden A6, B6 ja C4 piirustukset



Liite 6. Kappaleiden B4, C2 ja A4 piirustukset

