

Mikael Hirn

CNC-plasmaleikkurin suunnittelu ja valmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

9.3.2015

Tekijä Otsikko	Mikael Hirn CNC-plasmaleikkurin suunnittelu ja valmistus
Sivumäärä Aika	47 sivua + 3 liitettä 9.3.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaaja	Projekti-insinööri, Joel Kontturi
<p>Tämä insinööriyö tehtiin yhteistyössä Metropolia Ammattikorkeakoulun hitsauslaboratorion kanssa. Koulun hitsauslaboratorio on opetuskäytössä päivittäin, ja siellä opetetaan muun muassa hitsaukseen ja ohutlevytöihin liittyviä asioita. Lisäksi koulun sisäiset projektiryhmät, kuten Formula Student ja Kaupunkiauto, käyttävät tilaa usein hyödykseen.</p> <p>Kattavasta laitevalikoimasta huolimatta hitsauslaboratoriosta puuttui mahdollisuus leikata levyosia CNC-ohjatusti, mikä olisi erittäin hyödyllistä koululla opettavien kurssien kannalta. Tämän insinööriyön pääasiallisena tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa harrastajaystävällinen CNC-plasmaleikkuri, jonka voisi mahdollisesti tuotteistaa projektin päätyttyä.</p> <p>Insinööriyössä kerrotaan rungon suunnitteluun ja valmistukseen sekä leikkurin ohjauslogiikan kokoonpanoon liittyvistä asioista. Lisäksi paneudutaan projektin eri osa-alueiden haasteisiin ja siihen, mitä leikkurin tuotantoversion osalta kannattaisi tehdä toisin.</p> <p>Projektin päätavoite saavutettiin ja plasmaleikkurista valmistettiin ensimmäinen toimiva prototyyppi, joka toivottavasti tulee olemaan aktiivisessa käytössä.</p>	
Avainsanat	plasmaleikkuri, CNC, levynleikkaus, tietokoneohjattu, terminen leikkaus

Author Title	Mikael Hirn Designing and manufacturing a CNC plasma cutter
Number of Pages Date	47 pages + 3 appendices 9 March 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Technology and Design
Specialisation option	Mechanical Engineering
Instructor	Joel Kontturi, Project Engineer
<p>This Bachelor's thesis was made in co-operation with the welding laboratory of Metropolia University of Applied Sciences. The school's welding laboratory is in daily use and the space is mainly used to teach subjects like welding and sheet metal fabrication. The space is often used by the Formula Student and the City Car project groups.</p> <p>Despite the large variety of different types of machines the welding laboratory was lacking the possibility to CNC cut sheet metal parts. The possibility to CNC cut sheet metal parts would be very useful for many of the courses organized in the school. The main goal of this thesis was to design and manufacture a hobbyist friendly CNC plasma cutter which could possibly be productized after the project.</p> <p>In this thesis I discuss how the frame of the cutter was designed and manufactured and which electronic components were selected to control the system. I also talk about the challenges which were faced during the project and the improvements which should be made to the final production version of the plasma cutter.</p> <p>The main goal of the project was reached and the first working prototype of the plasma cutter was manufactured. The cutter is up and running and hopefully it will be in active use in the future.</p>	
Keywords	Plasma cutter, CNC, computer controlled, thermal cutting

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Työn lähtökohdat	2
2.1	CNC-plasmaleikkurien tarjonta	2
2.2	Tuotteen harrastajaystävällisyyteen vaikuttavia tekijöitä	2
3	Plasmaleikkaus	5
3.1	Plasmaleikkauksen periaate	5
3.1.1	Plasmaleikkauksen eri menetelmät	6
3.1.2	Veden alla suoritettava plasmaleikkaus	7
3.2	Oikean leikkuunopeuden valinta	8
3.3	Plasmaleikkaus verrattuna muihin leikkausmenetelmiin	9
4	CNC-plasmaleikkurin rungon suunnittelu ja valmistus	10
4.1	CNC-plasmaleikkurin rakenne ja toimintaperiaate	10
4.2	Rungon suunnittelu	11
4.3	Plasmaleikkurivirtalähteen valinta	15
4.4	Johteiden valinta ja rakenne	17
4.5	Rungon valmistus	18
4.6	Ohutlevyosien valmistus	26
4.7	Z-suuntaisen liikeakselin mekaniikka	27
4.8	Hihnapyörien ja hihnojen kiinnitysmekanismit	28
5	CNC-plasmaleikkurin ohjausjärjestelmä	30
5.1	Ohjausjärjestelmän komponentit	30
5.2	Breakout-kortti	30
5.3	Askelmoottorit ja niiden ohjaimet	31
5.4	PC-pohjaiset CNC-ohjelmat	32
5.5	SheetCAM	33
5.6	Hätäseispiiri	33
5.7	Referenssiasemat ja niiden kytkimet	34
5.8	Plasmapolttimen korkeudensäätö, THC	36
6	Käyttöönotto ja ensikokemukset	38

6.1	Leikkurin käyttöönotto	38
6.2	Ensimmäisen osan leikkaus	39
7	Parannusehdotukset	40
7.1	Vesialtaan materiaali	40
7.2	Levyosien käyttö ja hitsattujen rakenteiden minimointi	40
7.3	Y-akselin kelkan värähtely	41
7.4	Termisesti leikattujen osien muodonmuutos	43
8	Yhteenveto	44
	Lähteet	46
	Liitteet	
	Liite 1. HS86-5880 askelmoottorin ominaisuudet	
	Liite 2. HS60-2150 askelmoottorin ominaisuudet	
	Liite 3. Projektin toteutuneet kulut	

Lyhenteet

2D	Two Dimensional, kaksiulotteinen
3D	Three Dimensional, kolmiulotteinen
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAM	Computer Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
CNC	Computer Numerical Control, tietokoneohjattu numeerinen ohjaus
DXF	Drawing Interchange Format, mittatarkka 2D-kuvaformaatti
GPL	General Public License, avoimen lähdekoodin lisenssi
I/O	Input / Output, ohjelmoitava logiikka
THC	Torch Height Control, polttimen korkeuden säädin
TIG	Tungsten Inert Gas Arc Welding, kaasukaarihitsausprosessi

1 Johdanto

Tämä insinööri työ esittelee harrastajaystävällisen CNC-plasmaleikkurin rungon ja ohjausjärjestelmän suunnittelu- ja valmistusprosessit sekä pohtii leikkurin tuotteistamisen kannalta olennaisia asioita. Työ tehtiin yhdessä Metropolia Ammattikorkeakoulun hitsauslaboratorion kanssa.

Metropolian hitsauslaboratoriossa opetetaan hitsaukseen ja ohutmetalliosien valmistukseen liittyviä asioita. Toistaiseksi laboratoriossa ei ole ollut konetta, jolla olisi ollut mahdollista leikata levyosia tietokoneohjatusti. Ohutlevyosien leikkuutyöt on kurssien yhteydessä teetetty alihankkijoilla, jolloin opiskelijoilta on jäänyt tärkeitä työvaiheita oppimatta. Projektin aikana valmistunut plasmaleikkurin prototyyppi jää Metropolian hitsauslaboratorion käyttöön, mikä tarkoittaa sitä, että opiskelijat pääsevät jatkossa suorittamaan aikaisemmin alihankkijoilla teetetyt työvaiheet itse. Tämän myötä heille muodostuu parempi kokonais käsitys tuotteen valmistukseen liittyvistä työvaiheista ja lisäksi valmistettävien tuotteiden läpimenoaika pienenee merkittävästi.

CNC-plasmaleikkaus (engl. Computer Numerical Control) on terminen leikkausmenetelmä, jossa tietokoneella luotujen 2D-kuvien pohjalta leikataan ohutlevyosia. Harrastajille suunnattuja, edullisemmän hintaluokan ja sopivan kokoisia laitteita ei Euroopan markkinoilla ole tarjolla. Suurin osa markkinoilla olevista laitteista on tuotantokapasiteetin ja hankintahinnan osalta suunniteltu teollista tuotantoa varten. Harrastajalähtöisten robotiikkasovellusten yleistyminen 2000-luvulla on mahdollistanut erilaisten tietokoneohjattujen laitteiden rakentamisen kotiloissa. Alan harrastajat ovat erittäin hinta- ja laatu tietoisia sekä halukkaita tekemään laitteensa itse, mikä asettaa plasmaleikkurin tuotteistukselle omat haasteensa.

Haluaisin erityisesti kiittää hitsauslaboratorion projekti-insinööriä Joel Kontturiä hänen antamastaan tuesta tälle insinööri työlle. Hän on pyyteettömästi auttanut valmistusteknisissä asioissa ja antanut minulle tärkeitä neuvoja projektin aikana. On mahdollista, että ilman Joelin apua ja ammattitaitoa tämä projekti ei olisi koskaan edes alkanut.

2 Työn lähtökohdat

2.1 CNC-plasmaleikkurien tarjonta

CNC-pohjaisten koneiden tarjonta ja niiden käyttäjien määrä on kasvanut merkittävästi 2000-luvulla. Teollisuudessa käytettävien laitteiden lisäksi on markkinoille tullut suuri määrä komponentteja, jotka ovat mahdollistaneet sen, että harrastajat ovat voineet suunnitella ja rakentaa erilaisia CNC-ohjattuja laitteita. Suurin osa markkinoilla olevista kaupallisista CNC-plasmaleikkureista on hintansa, kokonsa ja tehokkuutensa osalta tarkoitettu teolliseen tuotantoon.

Amerikan markkinoilla yritykset nimeltä Plasma CAM ja Torchmate valmistavat edullisemmän hintaluokan ja harrastajaystävälliseen käyttöön tarkoitettuja CNC-plasmaleikkureita [Kuva 1]. Nämä leikkurit vievät lattiapinta-alaa pienimmillään noin neliön verran, joten ne sopivat helposti vaikka autotalliin. Molemmissa malleissa on pitkät jalat, mikä tarkoittaa sitä, että työskentelykorkeus on optimaalinen, kun metallilevyt ovat vielä niin kevyitä, että ne ovat käsin nostettavissa leikkurin päälle. Tämän projektin alkaessa ei kyseisiä leikkureita ollut saatavilla Euroopan markkinoilla.



Kuva 1. 1) Plasma CAM, 2) Torchmate - Amerikkalaisvalmisteiset CNC-plasmaleikkurit [1; 2].

2.2 Tuotteen harrastajaystävällisyyteen vaikuttavia tekijöitä

Mitkä ovat niitä asioita, jotka tekevät tietystä laitteesta harrastajaystävällisen? Tämän projektin kannalta kaksi merkittävästi vaikuttavaa tekijää ovat plasmaleikkurin viemä lattiapinta-ala ja sen hankintahinta. Koska harrastajilla ei oletettavasti ole käytössä

suuria tiloja, on harrastajaystävällisen tuotteen mahduttava noin yhden auton autotallin kokoiseen tilaan eli noin 3 x 5 m tilaan. Korkeuden puolesta noin 2.0 m on hyvä raja maksimikorkeudelle.

Harrastajat ovat valmiita maksamaan satoja euroja toimivasta ratkaisusta, mutta jos laitteen hinta on tuhansia euroja, rajaa se jo huomattavan suuren joukon potentiaalisia asiakkaita pois. Hinnan ollessa korkeampi, ei laitetta osteta kokeilumielessä. CNC-koneiden harrastajat ovat vahvasti tee-se-itse-henkisiä ihmisiä, jotka yleensä suunnittelevat ja rakentavat oman koneen, mikäli valmiin tuotteen hinta-laatu-suhde ei miellytä. Tarvittavien osien saatavuus on parantunut ja tietotaito leviää helposti ja nopeasti Internetin välityksellä. Näistä syistä johtuen koneiden rakentaminen ja suunnittelu sekä tiedon jakaminen on helpompaa kuin aikaisemmin. Tämä varmistaa myös sen, että kaupallisten tuotteiden hinnat eivät pääse karkaamaan liian korkeiksi.

Voidaan olettaa, että jonkin tuotteen hyvä saatavuus johtaa kohtuullisen kokoiseen käyttäjäkuntaan, mikä taas puolestaan johtaa käyttäjäkokemusten jakamiseen ja laitteiden käyttöön liittyvien ongelmien yhteisöllisiin ratkaisuihin. Kookkailla harrastajayhteisöillä on valtavat tuotekehitysresurssit käytettävissään. Internetin keskustelupalstoista on syntynyt toimivia tuotekehitysalustoja, joilla tuhannet käyttäjät jakavat ideoitaan ja tekevät yhdessä tuotekehitystyötä. Käyttäjyhteisöissä on mukana ammattilaisia ja hyvin ammattitaitoisia harrastajia. Yhteisön mielipiteisiin on syytä suhtautua vakavasti, sillä nämä mielipiteet saattavat olla erittäin merkittäviä kaupallisen tuotteen menestymisen kannalta.

Tee-se-itse-henkisille harrastajille on hyödyllistä, jos plasmaleikkurin rakennetta voi muokata pienellä vaivalla omiin tarpeisiin sopivaksi. Moni harrastaja omistaa plasmaleikkurin jo entuudestaan ennen CNC-plasmaleikkurin ostopäätöksen tekemistä. Tästä syystä on myös tärkeää, että jo olemassa olevaa poltinta voidaan mahdollisesti soveltaa hankittavan CNC-plasmaleikkurin yhteydessä. Tämä tarkoittaa lähinnä sitä, että lineaaripöydän polttimen pidin on sellainen, että siihen voi tarvittaessa konepolttimen sijaan asentaa myös käsikäyttöisen polttimen, mikä on hyvin yleistä harrastajien keskuudessa.

Plasmaleikkurin tuotteistuksen kannalta on myös olennaista huomioida mahdollisuus myydä tuotetta rakennussarjana. Tällöin plasmaleikkurin valmistuskulut olisivat edullisemmat ja leikkuria valmistava yritys ei tarvitsisi omia tuotantotiloja vaan rungon

rakentamiseen liittyvät komponentit voitaisiin tilata sellaisenaan suoraan alihankkijalta. Mahdollisilta varastointikuluilta vältyttäisiin, mikäli rakennussarjan komponentit toimitettaisiin suoraan alihankkijalta asiakkaalle. Mikäli tuotetta myytäisiin rakennussarjana, olisi tuotteen myyntihinta myös alhaisempi, mikä tietysti olisi houkutteleva ajatus asiakkaan kannalta. Rakennussarja tulisi suunnitella niin, että tuotteen kokoonpanossa olisi mahdollisimman pieni väärinkokoamisen riski. Näin vältyttäisiin tapauksilta, joissa valmis tuote toimii huonosti tai ei ollenkaan asiakkaan huolimattoman kokoonpanotyön ansiosta.

Teollisessa tuotannossa leikkausprosessit ovat optimoituja tehokkaaseen sarjatuotantotyöhön, jolloin valmistettavia tuotteita tehdään mahdollisesti useita tuhansia kappaleita työvuoron aikana. Harrastajien keskuudessa on kyse osien valmistamisesta lähinnä omaan käyttöön. Tällöin leikkausprosessin ei tarvitse olla viimeiseen asti optimoitu, vaan riittää, että osa saadaan ylipäättään valmistettua. Osan valmistukseen kuluneella ajalla ei ole vastaavaa merkitystä kuin teollisuudessa. Samasta syystä harrastajille suunnatuissa ratkaisussa voidaan käyttää myös huomattavasti pienempitehoisia virtalähteitä. Plasmaleikkurin virtalähde on yksi järjestelmän arvokkaimmista komponenteista. Ottaen huomioon harrastajien käyttämät materiaalipaksuudet, voidaan järjestelmään valita pienempitehoinen ja edullisempi plasmaleikkurin virtalähde. Myöskään lineaarijohteet eivät altistu jatkuvalle rasitukselle, jolloin johteiksi voidaan valita edullisemmat yksiköt.

Plasmaleikkausjärjestelmästä voi tehdä edullisemman seuraavin keinoin:

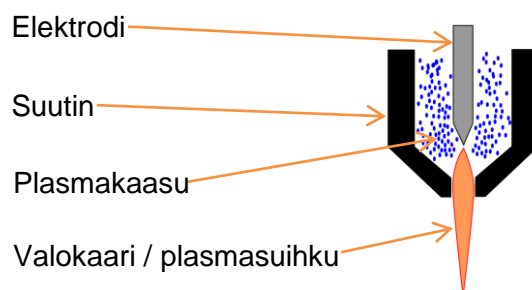
- Käyttämällä servomootoreiden sijaan askelmootoreita, jolloin myös moottorien ohjauslogiikkaan liittyvät komponentit ovat automaattisesti edullisempia.
- Jättämällä absoluuttisen paikkatiedon takaisinkytkennän pois.
- Käyttämällä CNC-ohjauspaneelin sijaan PC:tä ja CNC-ohjelmistoa.
- Käyttämällä Open Source (GPL) -ohjelmistoja.
- Toteuttamalla lineaariliikkeet edullisilla johdevaihtoehdoilla, kuten V-kiskoilla tai pyöreillä kuulajohteilla.
- Valmistamalla rungon riittävällä tarkkuudella.
- Jättämällä vesialtaan pois. Altaan jättämistä pois ei kuitenkaan suositella, sillä se lisää merkittävästi plasmaleikkurin käyttömukavuutta.

3 Plasmaleikkaus

3.1 Plasmaleikkauksen periaate

Alkuaineiden kemiallisesti pienintä osaa kutsutaan atomiksi. Atomin ydin koostuu positiivisesti varautuneista protoneista ja neutraaleista hiukkasista, neutroneista. Ydintä kiertävät negatiivisesti varautuneet elektronit. Tapahtumaa, jossa atomi menettää ytimeistään elektroneja, kutsutaan ionisoitumiseksi. Ionisoitumista tapahtuu, kun lämpötila on tarpeeksi korkea, 1700 – 7725 °C. Lämpötilan vaikutuksesta kiihtyneet hiukkaset alkavat törmäillä toisiinsa irrottaen atomien elektroneja ja näin syntyy ioneja. [3; 4.]

Aineen olomuotoa, jossa atomit ovat ionisoituneet, kutsutaan plasmaksi. Plasmaleikkauksessa plasmakaasu muodostuu leikkauspolttimen sisällä olevan elektrodin ja leikattavan metallikappaleen välille muodostuneen valokaaren ympärillä, kun siihen johdetaan leikkauksessa käytettävää kaasua. Kaasusta muodostuu korkean lämmön seurauksena plasmaa, jota käytetään hyväksi leikkausprosessissa [Kuva 2]. Sulatusmenetelmäksi lukeutuvassa plasmaleikkauksessa plasman sulattama metalli puhalletaan pois leikkusrailosta plasman liike-energian avulla. Plasmaleikkaustekniikka on alun perin kehitetty apuvälineeksi sellaisten metallien leikkaamiseen, joita ei ole pystytty perinteisin polttoleikkausmenetelmin leikkaamaan. Plasmaleikkaus soveltuu erityisen hyvin alumiinin, kuparin ja ruostumattoman teräksen leikkaamiseen, mutta sillä voidaan hyvin leikata myös muita metallilaituja. [5, s.148 – 149.]

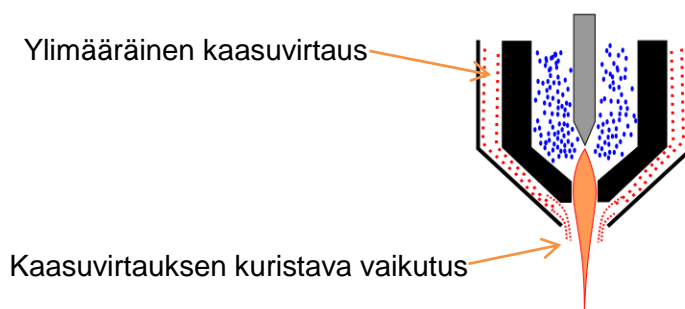


Kuva 2. Plasmapolttimen rakenne.

3.1.1 Plasmaleikkauksen eri menetelmät

Tyypillisessä plasmapolttimessa plasmasuihku kuristetaan polttimen kärjessä olevalla suuttimella. Suuttimen reiän koko vaikuttaa suoraan plasmasuihkun energiatiheuteen ja siihen, minkälainen leikkausnopeus voidaan saavuttaa. Paras energiatiheys saavutetaan mahdollisimman pienellä reiällä. Käytettäessä pelkkää suutinta plasmasuihkun kuristamiseen ei kyseisellä menetelmällä päästä parhaaseen mahdolliseen energiatiheuteen.

Dual-flow-menetelmässä plasmapolttimen suuttimen läpi johdetaan kaksi toisistaan erillistä kaasukanavaa [Kuva 3]. Ensimmäisessä kanavassa virtaa plasmakaasu ja toisessa kanavassa ylimääräinen kaasuvirtaus, jonka tehtävänä on kuristaa plasmasuihkua vielä enemmän varsinaisen suutinreiän jälkeen. Lisäksi ylimääräinen kaasuvirtaus jäähdyttää suutinta ja suojaa aihiossa olevaa leikkauskohtaa ilmassa olevilta epäpuhtauksilta. Ylimääräisen kaasuvirtauksen ansiosta plasmasuihkun kuristus on tehokkaampi verrattuna pelkällä suuttimella toteutettuun plasmapolttimeen. Tehokkaampi plasmasuihkun kuristus mahdollistaa suuremman leikkuunopeuden käytön, ja lisäksi leikattavan tuotteen pystyseinät ovat suorat ja teräväreunaiset. Ylimääräisen kaasun tyyppi on valittava leikkausaihion metallilaadun mukaan. Dual-flow-menetelmä on yleisin tuotantoteollisuudessa käytetty plasmaleikkausmenetelmä. [5, s.150.]



Kuva 3. Dual-flow-plasmapolttimen rakenne.

Dual-flow-menetelmää vastaavia menetelmiä ovat vesi- ja happistabiloitu plasmaleikkausmenetelmä. Näissä menetelmissä ylimääräinen kaasuvirtaus on korvattu vedellä tai hapella. Näiden plasmaleikkausmenetelmien edut ovat vastaavat kuin Dual-flow-menetelmän.

3.1.2 Veden alla suoritettava plasmaleikkaus

Plasmaleikkurin rungon yhteyteen voidaan asentaa vesiallas, joka on sijoitettu rungon yhteyteen leikkausaihion alapuolelle [Kuva 4]. Vesiallas voi olla rakenteeltaan sellainen, että veden pinta voidaan halutessa nostaa niin ylös, että aihio jää kokonaan veden pinnan alapuolelle. Vesialtaan käyttö tekee plasmaleikkurin käytöstä mielekkäämpää, koska vesi vaimentaa leikkauksesta syntyvää melua ja sitoo itseensä haitallisia palokaasuja, jotka muuten leviäisivät huoneilmaan. Lisäksi vesi toimii aihiota jäähdyttävänä elementtinä, joka edesauttaa estämään lämmön aiheuttamia muodonmuutoksia.



Kuva 4. Vesialtaalla varustettu plasmaleikkuri [6].

Altaassa olevan veden seassa käytetään korroosiota hidastavia kemikaaleja, kuten glykolia. Tällä pyritään suojaamaan rungon rakenteita ja erityisesti vesialtaan sisäpuolella olevia lamelleja ruostumiselta. Altaan sisällä olevat lamellit kuluvat jokaisen leikkauksen yhteydessä, minkä takia niitä joudutaan aika ajoin uusimaan. Tästä syystä on kustannustehokkaampaa valmistaa lamellit mieluummin teräksestä ja käyttää vedessä suoja-ainetta, kuin tehdä lamellit ruostumattomasta teräksestä. Altaassa käytettävä vesi on vaihdettava säännöllisin väliajoin. Veden vaihtoväli määräytyy plasmaleikkurin käyttöasteen mukaan.

3.2 Oikean leikkuunopeuden valinta

Plasmapolttimen liikkeen nopeus, suuttimen koko, virran määrä ja etäisyys leikattavaan kappaleeseen valitaan aihion paksuuden ja metallin laadun mukaan [Taulukko 1]. Käytännössä mitä paksumpaa leikattava materiaali on, sitä hitaammin plasmapoltinta on liikutettava leikkausprosessin aikana.

Taulukko 1. Leikkausnopeudet eri metallilaaduille [7].

Teräs

Virta (A)	Jännite (V)	Materiaalin paksuus (mm)	Max. nopeus (mm/min)	Optimaalinen nopeus (mm/min)
25	147	0.5	16205	10541
	148	0.8	12700	8255
	149	1.3	7925	5156
	152	1.5	4470	2896
40	144	1.9	16256	5613
	146	3.4	3835	2489
	147	4.7	2464	1600
	149	6.4	1880	1219

Ruostumaton teräs

Virta (A)	Jännite (V)	Materiaalin paksuus (mm)	Max. nopeus (mm/min)	Optimaalinen nopeus (mm/min)
25	139	0.5	16027	10414
	139	0.8	12598	6179
40	142	1.3	15037	8509
	144	1.5	9500	6172
	144	1.9	5613	3656
	147	3.4	2718	1778
	149	4.7	1702	1118
	149	6.4	1194	787

Alumiini

Virta (A)	Jännite (V)	Materiaalin paksuus (mm)	Max. nopeus (mm/min)	Optimaalinen nopeus (mm/min)
25	150	0.8	15494	10084
	152	1.5	6807	4420
40	142	2.4	7442	4626
	144	3.2	5162	3378
	144	6.4	1930	1245

Leikkuunopeuden lisäksi merkittävä asetus onnistuneen leikkauksen kannalta on puhkaisuviive (engl. pierce delay). Puhkaisuviive valitaan aihion paksuuden ja materiaalin mukaan. Viivettä käytetään, kun leikkausprosessi aloitetaan suoraan aihion yläpuolelta (voidaan aloittaa myös aihion ulkopuolelta). Viiveen on oltava niin pitkä, että plasmasuihku tunkeutuu määritetyssä ajassa aihion läpi. Mitä paksumpi aihio on, sitä pidempi on puhkaisuviive.

3.3 Plasmaleikkaus verrattuna muihin leikkausmenetelmiin

Plasmaleikkaus kehitettiin aikanaan laser- ja polttoleikkauksen rinnalle uudeksi termiseksi leikkausmenetelmäksi. Sen oli tarkoitus olla edullisempi, mutta kuitenkin tarkka leikkausmenetelmä. Ajan myötä plasmaleikkausmenetelmistä on kehittynyt useita eri versioita käyttäjien tarpeiden mukaan. Automatisoitu plasmaleikkausjärjestelmä on rakenteeltaan ja komponenttien määrältään melko yksinkertainen. Polttoleikkausjärjestelmän komponentit ovat hyvin samantyyppiset, mutta kaikki muut leikkausmenetelmät ovat komponenttiansa osalta monimutkaisempia. Plasmaleikkaukselle vaihtoehtoisia leikkausmenetelmiä ovat polttoleikkaus, CO₂-laser, vesileikkaus ja levytyökeskus. Menetelmiä ei varsinaisesti voida laittaa paremmuusjärjestykseen, sillä kullakin menetelmällä on sekä hyvät että huonot puolensa. Leikkaustyöhön sopiva menetelmä on valittava aina tarpeen mukaan.

Valittaessa leikkuumenetelmää voidaan pohtia seuraavia asioita:

- Leikkuumenetelmän soveltuvuus eri materiaaleille
- Leikkuunopeus
- Saavutettava leikkaustoleranssi
- Leikkausjäljen puhtaus ja jäysteettömyys
- Lämpövaikutusvyöhykkeen suuruus
- Leikkaukustannukset
- Investointikustannukset
- Leikkausmenetelmän vaikutus seuraaviin työvaiheisiin

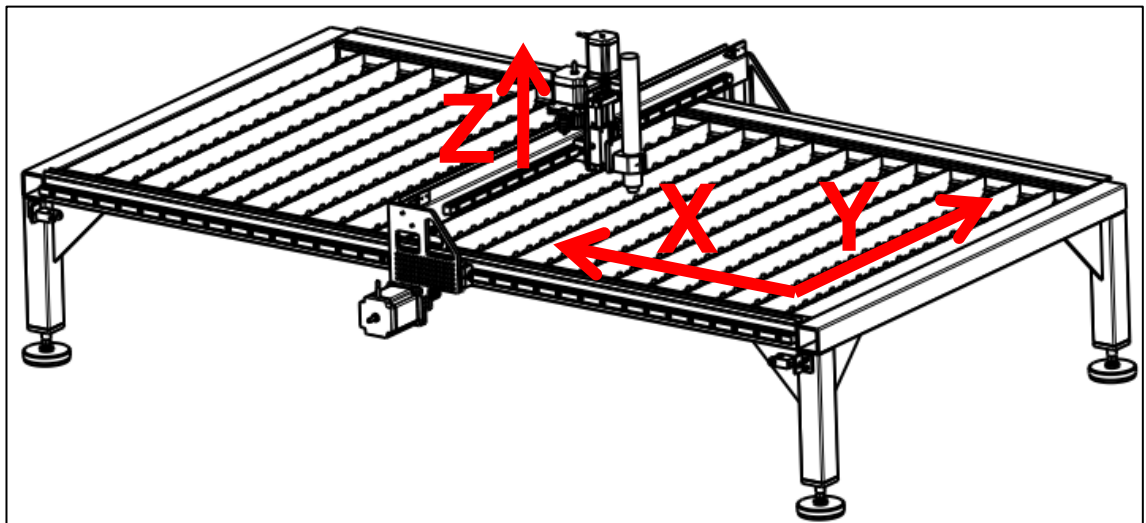
[5, s. 201.]

Plasmaleikkauksen tarkkuus on 1.0 – 25.0 mm:n materiaalivahvuuksilla vastaava kuin polttoleikkauksen, eli 0.5 – 1.5 mm. Mikäli valmistettava osa vaatii tarkempaa työstötarkkuutta, on vaihtoehtoina käyttää joko laseria tai koneistaa osa jyrsimällä.

4 CNC-plasmaleikkurin rungon suunnittelu ja valmistus

4.1 CNC-plasmaleikkurin rakenne ja toimintaperiaate

Suurin osa kaupallisilla markkinoilla olevista CNC-plasmaleikkureista perustuu lineaaripöytiin, joissa poltin liikkuu kolmeen eri suuntaan [Kuva 5]. Kolmiakselisella leikkurilla voidaan leikata suorisivuisia levyosia. Viistoreunaisien levyosien leikkaamiseen vaaditaan yhteensä viisi erillistä liikeakselia. Viisiakselisessa koneessa kaksi ylimääräistä akselia on lisätty poltinpitimen yhteyteen, jolloin poltinta voidaan pyörittää ja kallistaa viisteiden aikaansaamiseksi. Tässä projektissa rakennettu lineaaripöytä on kolmiakselinen.



Kuva 5. Kolmiakselisen plasmaleikkuri ja sen liikeakselit.

Lineaaripöydän lisäksi kaksi muuta olennaista osaa järjestelmäkokonaisuuden kannalta ovat plasmaleikkurivirtalähde ja plasmapolttin. Virtalähde sisältää muuntajan, kaasun virtaukseen liittyvät komponentit, ohjauslogiikan ja hallintapaneelin, jonka kautta virtalähteen toimintaa ohjataan. Tietokoneohjattua plasmaleikkuria rakennettaessa on olennaista, että virtalähde on varustettu CNC-käyttöön tarkoitetulla väylällä, jonka kautta virtalähdettä ohjataan. CNC-väylän kautta ohjataan poltin päälle ja pois päältä sekä saadaan tieto valokaaren jännitteestä, jonka avulla plasmapolttimen ja aihion välistä etäisyyttä säädetään. Itse plasmapolttin liitetään kiinni virtalähteeseen

virtakaapelin ja kaasuputken välityksellä. Lisäksi aihion maadoittava kaapeli kytketään kiinni samaan virtalähteeseen. Plasmaleikkauksessa käytettävä kaasu kulkee myös virtalähteen läpi. Virtalähteessä voi olla kaasulle erillinen paineensäädin, mutta yleensä käytössä on yksinkertainen venttiili, joka avaa kaasulinjan ennen valokaaren syttymistä ja sulkee sen valokaaren sammussa.

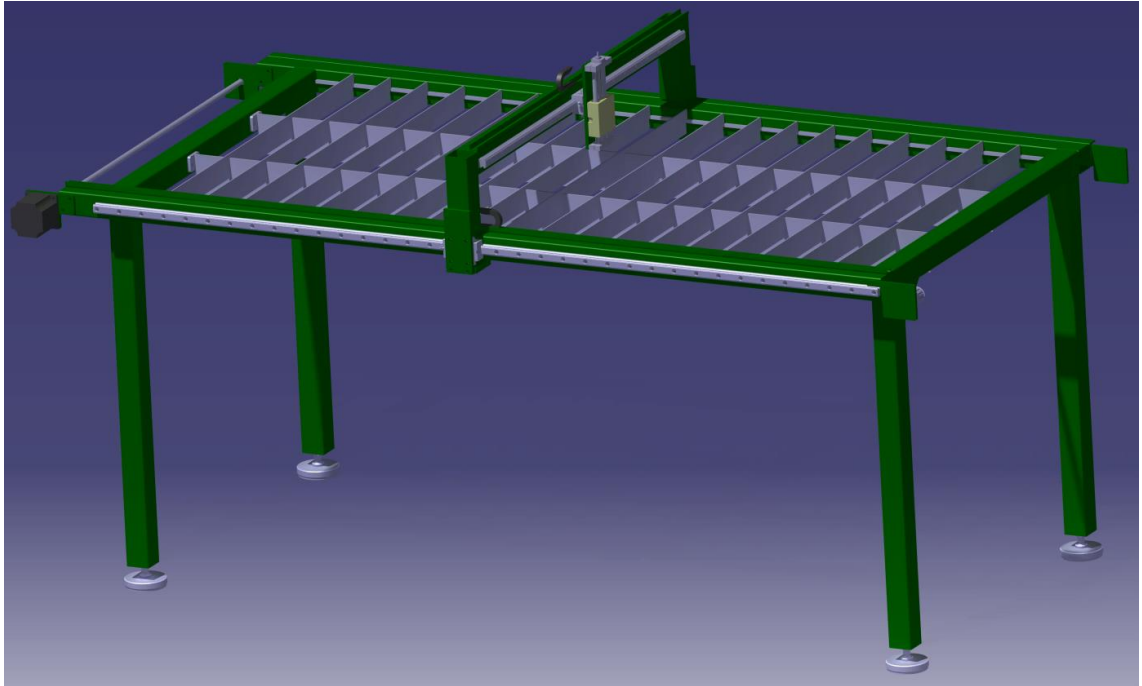
Vaativimmissa teollisuuden sovelluksissa käytetään plasmapolttimen liikutteluun teollisuusrobotteja, joiden liikealueet ovat käytännössä rajattomat. Teollisuusrobotteja käytetään erityisesti auto- ja laivateollisuudessa sekä läpivirtaavilla tuotantolinjoilla.

4.2 Rungon suunnittelu

Rungon suunnittelu aloitettiin sillä ajatuksella, että rakennettava plasmaleikkuri olisi kolmiakselinen Gantry-mallinen portaali, jonka runko toimisi leikkausaihion kantavana elementtinä. Rungon koko määräytyi terästehtaan standardikokoisen levykoon mukaan. Suurimmat koululle toimitettavat metallilevyt ovat kokoluokkaa 1.0 x 2.0 m. Vaatimuksena oli, että standardikokoiset metallilevyt saadaan nostettua sellaisenaan plasmaleikkurin päälle. Runkomateriaaliksi valittiin neliönmuotoinen rakenneputki. Teräsprofiili sopii hyvin runkomateriaaliksi sen hyvän koneistettavuuden ja hitsattavuuden ansiosta.

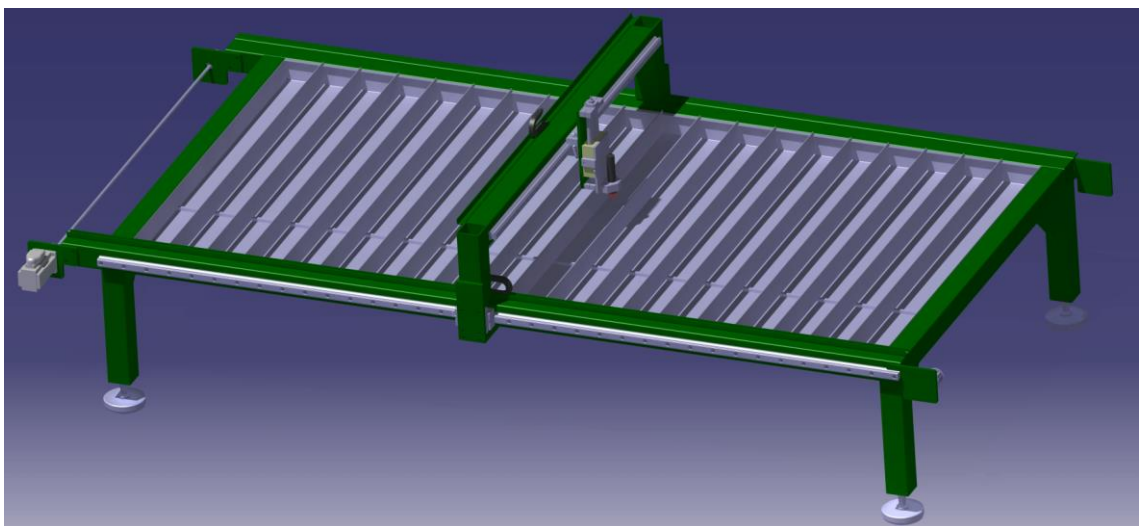
Rungon eri kehitysversiot

Ensimmäiset versiot rungon suunnitelmasta eivät sisältäneet lainkaan vesiallasta [Kuva 6]. X-akselin askelmoottori oli sijoitettu kiinteästi rungon päähän, vasemmalle puolelle runkoa, josta voima oli tarkoitus välittää akselia pitkin oikeanpuoleiselle johteelle. Rungon jalat olivat pitkät ja työkorkeus suunniteltu niin, että se oli sopiva seisovalle henkilölle. Ajatusmalli lineaarijohteen ja avonaisen U-profiilijohteen käytöstä syntyi jo ensimmäisessä suunnitteluversiossa. Tukilamelleja varten oli suunniteltu erilliset tuet, jotka olivat pulttiliitoksilla kiinni päärungossa.



Kuva 6. Ensimmäinen versio rungon 3D-mallista.

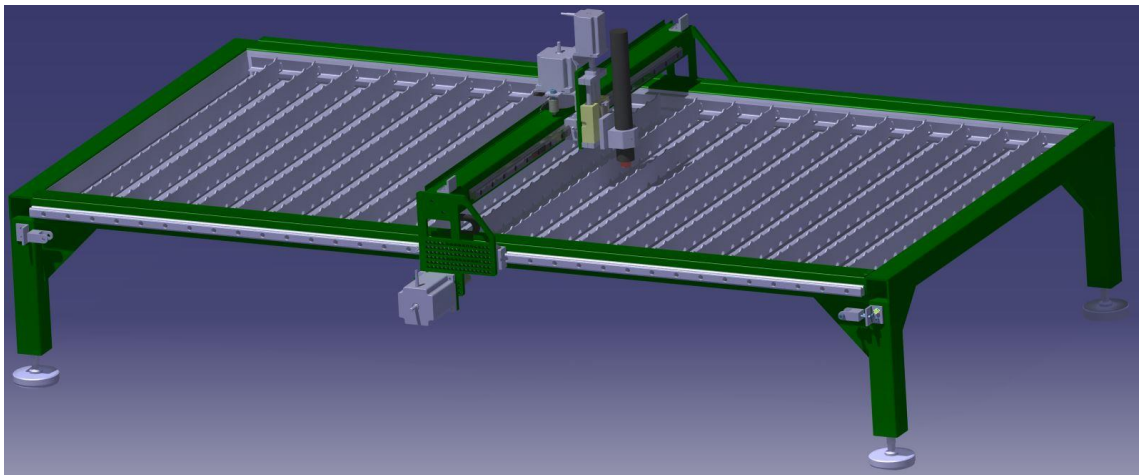
Rungon jalkoja päätettiin madaltaa reilusti, jotta suurempien metalliaihioiden nostaminen leikkurin päälle olisi helpompaa. Levyjen nostamiseen käytetään hitsauslaboratorion kattoon kiinnitettyä palkkinosturia. Leikkurin korkeus määräytyi nosturin nostokorkeuden mukaan. Rungon madaltaminen tukevoitti sen rakennetta. Madaltamisen lisäksi lisättiin vesiallas osaksi leikkurin runkoa [Kuva 7].



Kuva 7. Madallettu runko varustettuna vesialtaalla.

Kolmanteen runkoversioon tehtiin vielä muutamia ratkaisevia muutoksia toiminnallisuuden ja rungon rakenteen parantamiseksi. Voimansiirtoa yksinkertaistettiin

siirtämällä askelmoottori osaksi kelkan päätyä. Samalla rungon päädyistä poistettiin akselit, joiden tarkoitus oli välittää voimat rungon oikealle puolelle. Voimansiirtotavan muutoksesta johtuen umpinaisesta hammashihnasta tehtiin avonainen ja se kiinnitettiin päädyistään kiinni päärunгон jalkoihin. Y-akselin kelkan päädyistä tehtiin suuremmat, koska askelmoottorin puoleiseen päätyyn kohdistuu kelkan massan aiheuttama vääntö. Y-akselin kelkkaa madallettiin, jotta painopiste leikkuualueeseen nähden saatiin mahdollisimman alas. Plasmapolttimen letku on paksua ja melko painavaa. Sitä varten suunniteltiin erillinen tuki, joka on kiinni leikkurin pystyjalassa [Kuva 8].



Kuva 8. Rungon viimeisin 3D-malli ennen valmistuksen aloittamista.

Rungon taipuma

Plasmaleikkurin runko on valmistettu neliönmuotoisesta teräsprofiilista, jonka koko on 60.0 x 60.0 x 5.0 mm. Leikkurin X-akselin eli pisimmän sivun pituus on 2050.0 millimetriä. Suurin ja painavin mahdollinen leikkurin päälle laskettava metallilevy on 1.0 x 2.0 x 16.0 mm:n kokoinen teräslevy.

Lasketaan teräslevyn aiheuttama voima:

Teräslevyn tilavuus

$$V = 1.0m \times 2.0m \times 0.016m = 0.032 m^3 \quad (1)$$

Teräksen tiheys

$$\rho = 7850 kg/m^3$$

Teräslevyn massa

$$m = V \times \rho = 251.2 \text{ kg}$$

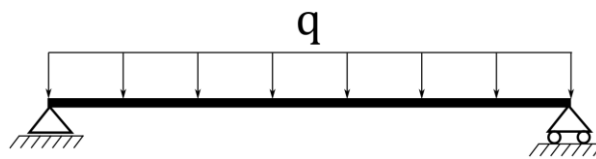
Teräslevyn aiheuttama voima

$$F = m \times 9.81 = 2564.3 \approx 2500 \text{ N} \quad (2)$$

Laskettu voima (2) jaetaan kahden saman suuntaisen (X-akseli) profiilin kesken

$$F_{prof} = \frac{F}{2} = 1250 \text{ N} \quad (3)$$

Yksittäiseen profiiliin kohdistuva voima (3) jaetaan sen koko pituudelle



$$q = \frac{F_{prof}}{2.05} = 610 \text{ N/m} \quad (4)$$

Lasketaan profiilin taipuma kuormalla q (4):

Teräsprofiilin kimmokerroin

$$E = 210 \text{ GPa}$$

Profiilin pituus

$$l = 2050.0 \text{ mm}$$

Profiilin sisä- ja ulkokorkeus (5.0 mm:n seinämäpaksuus)

$$H = 60.0 \text{ mm} \quad h = 50.0 \text{ mm}$$

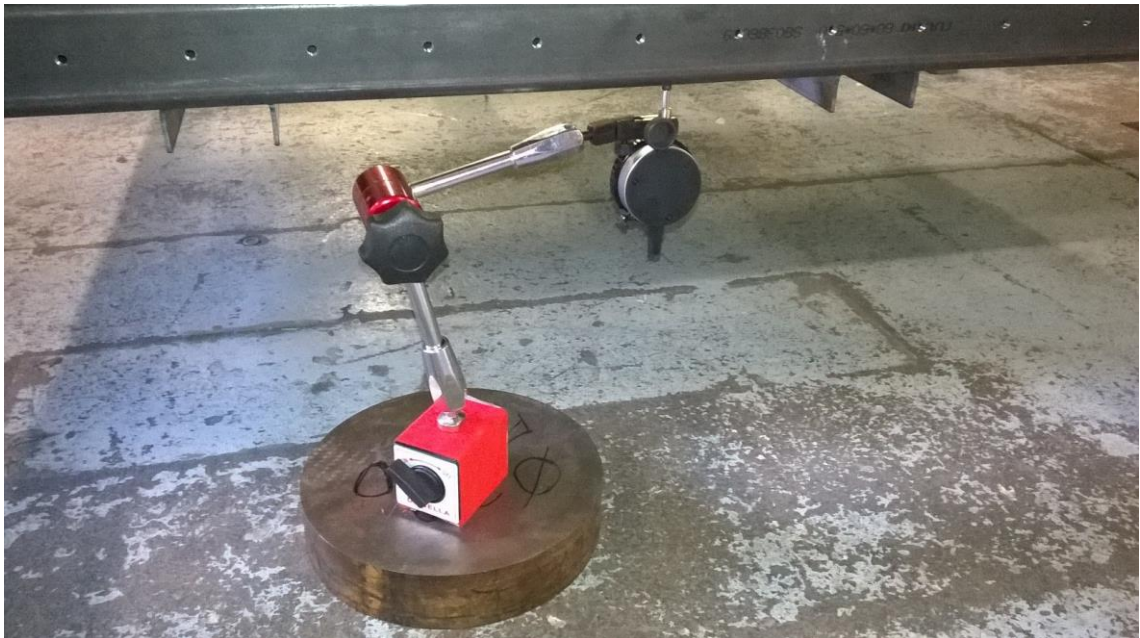
Profiilin jäyhyys

$$I = \frac{H^4 - h^4}{12} = 5.59 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

Yksittäisen profiilin taipuma

$$f_m = \frac{q \times l^4}{48 \times E \times I} \approx \mathbf{1.19 \text{ mm}} \quad (5)$$

Yksittäisen profiilin laskennallinen taipuma 610 N/m kuormalla (4) on 1.19 mm (5). Laskukaava ei huomioi kulmatukien vaikutusta taipumaan, joten todellisuudessa profiilin taipuma on pienempi. Tarvittaessa pystyjalkojen välille voidaan vielä asentaa poikittaistuet. Käyttökokemuksien kerryttämisen jälkeen voidaan tarkemmin osoittaa, miten rungon nykyinen rakenne toimii. Todellista taipumaa tullaan seuraamaan mittakellon avulla [Kuva 9]



Kuva 9. Rungon alle asennettu mittakello, jolla mitataan rungon taipumaa.

4.3 Plasmaleikkurivirtalähteen valinta

Euroopan markkinoilla olevista lukuisista plasmaleikkureista valittiin vertailuun neljä hyväksi havaittua valmistajaa. Vaatimuksena toimittajalle oli suomalainen jälleenmyyjä. Suomalaisen jälleenmyyjän ajateltiin olevan jonkinlainen takuu sille, että laitteella on toimiva huoltojärjestelmä ja hyvä kulutusosien saatavuus. Myös mahdollisten takuuasioiden käsittely tulisi olemaan suoraviivaisempaa suomalaisen tahon kanssa. Vertailuun päätyi Everlastin, Hypertermin ja ESABin valmistamat laitteet [Taulukko 2].

Vertailu suoritettiin valmistajien ilmoittamien tietojen pohjalta ja haastattelemalla laitteiden jälleenmyyjä.

Taulukko 2. Plasmaleikkurivirtalähteiden ominaisuuksien vertailutaulukko.

	Everlast PowerPlasma100	Hypertherm PMX 105	Hypertherm PMX 125	ESAB 1600
Hinta (sis poltin)	1765	4338	5938	4863
MaxTeho (A)	100	105	125	90
Ilma (l/min / bar)	350 / 5	217 / 5	260 / 5.9	236 / 6.2
Suositusleikkausteho (mm)	28	32	38	38
Irrotusleikkausteho (mm)	38	50	57	45
Max Reiänpisto (mm)	-	22	25	-
Poltinkaapelin pituus (m)	6	7,6	7,6	-
CNC-liitin	KYLLÄ	KYLLÄ	KYLLÄ	KYLLÄ
Liitäntäjännite (V)	400	400	400	400

Virtalähteen valinta osoittautui haastavaksi tehtäväksi. Valmistajien ilmoittamien tietojen mukaan erot laitteiden välillä olivat melko mitättömät. Lisäksi eri valmistajien ilmoittamat tiedot eivät olleet vertailukelpoisen oloisia keskenään. Esimerkiksi Everlastin virtalähteelle ilmoitetaan kohtuuttoman suuren oloinen paineilman kulutuslukema verrattuna muihin vertailussa oleviin saman kokoluokan laitteisiin.

Hintansa puolesta vertailun laitteet poikkeavat toisistaan melkoisesti. Vertailun edullisin tuote, Everlast, on hinta-laatu-suhteeltaan mielenkiintoinen tuote. Edullisen hintansa ja kohtuullisen hyvien ominaisuuksiensa ansiosta Everlast on vertailun tuotteista se, jonka hyvin todennäköisesti moni harrastaja valitsisi. Muut vertailuun osallistuneista laitteista ovat harrastajan näkökulmasta hinnaltaan liian kalliita. Projektin kannalta Everlast olisi ollut ehdottomasti mielenkiintoisin valinta, mutta laitteesta oli melko vähän tietoa saatavilla eikä käyttökokemuksistakaan löytynyt tarpeeksi kirjoitettua tietoa.

Ilmoitetun tehon osalta laitteet eivät juurikaan poikenneet toisistaan. Joukon pienitehoisimman, ESABin, oletettiin olevan turhan tehoton asetettuihin vaatimuksiin nähden. Jälleenmyyjän mukaan laitteen ominaisuudet olivat huonommat kuin mitä valmistaja ilmoittaa. Lisäksi sen hinta oli verrattaen korkea.

Tähän projektiin tilattiin Hyperterm Powermax 105 –virtalähde [Kuva 10]. Syyt Hypertermin valintaan olivat selkeät. Haluttiin valita toimintavarma laite, josta oli luettavissa käyttökokemuksia ja jonka toimittaja olisi luotettava. Lisäksi Hypertermssä on CNC-liitin, jonka kautta virtalähdettä ohjataan leikkuutyön aikana. Virtalähteen lisäksi samaan tilaukseen sisällytettiin sarja suuttimia ja polttimeen liittyviä kulutusosia. Tietynkokoiset suuttimet sopivat tietyille leikkuutehoille. Tämän takia valittiin suutinsarja, joka sisälsi erikokoisia suuttimia. Virtalähde on kätevä, sillä sitä voidaan käyttää sekä kone- että käsipolttimeen kanssa. Koneellista leikkausta varten tilattiin lyhyemmät poltin- ja maadoituskaapelit ja käsinleikkausta varten pidemmät, 15.0 m pitkät, poltin- ja maadoituskaapelit. Pitkän käsipoltinkaapelin ansiosta leikkuutyö voidaan halutessa suorittaa kätevästi myös ulkona. Näin haitalliset palokaasut eivät leviä turhaan sisätiloihin. Merkittävin tekijä, miksi päädyttiin tilaamaan Hyperterm-virtalähde oli kuitenkin Internetin lukuisat projektikertomukset, joissa Hyperterm-merkkisiä laitteita oli käytetty onnistuneesti.



Kuva 10. Hyperterm Powermax 105 –virtalähde.

4.4 Johteiden valinta ja rakenne

X- ja Y-akselin lineaarijohteiksi valittiin Rollcon SBI25 –kuulajohteet [Kuva 11]. Johteet toimitettiin piirustuksen mukaan mittaan leikattuina ja johdekelkat valmiiksi asennettuina. X-akselin kuulajohde asennettiin ainoastaan rungon vasemmalle puolelle. Kuulajohteen kisko kiinnitettiin runkoprofiiliin pulteilla (M6), joita oli kiskossa

50 mm:n välein. Rungon oikeanpuoleinen kuulajohde korvattiin avoimella U-profiililla, jonka sisällä kelkka liikkuu tavallisten konelaakereiden varassa. Oikeanpuoleinen kuulajohde korvattiin U-profiililla, koska se helpotti rungon valmistusta. Mikäli kuulajohteita olisi käytetty rungon molemmin puolin, olisi johteiden pitänyt olla 0.1 – 0.2 mm tarkkuudella samansuuntaiset kelkan sujuvan liikkeen takaamiseksi. Avonainen U-profiili sen sijaan sallii pienet poikkeamat samansuuntaisuudessa. U-profiilista tehty johde oli myös hankintahinnaltaan edullisempi verrattuna kuulajohteeseen.



Kuva 11. Rollocon SBI-FL –tyypin kuulajohde ja kelkka [8].

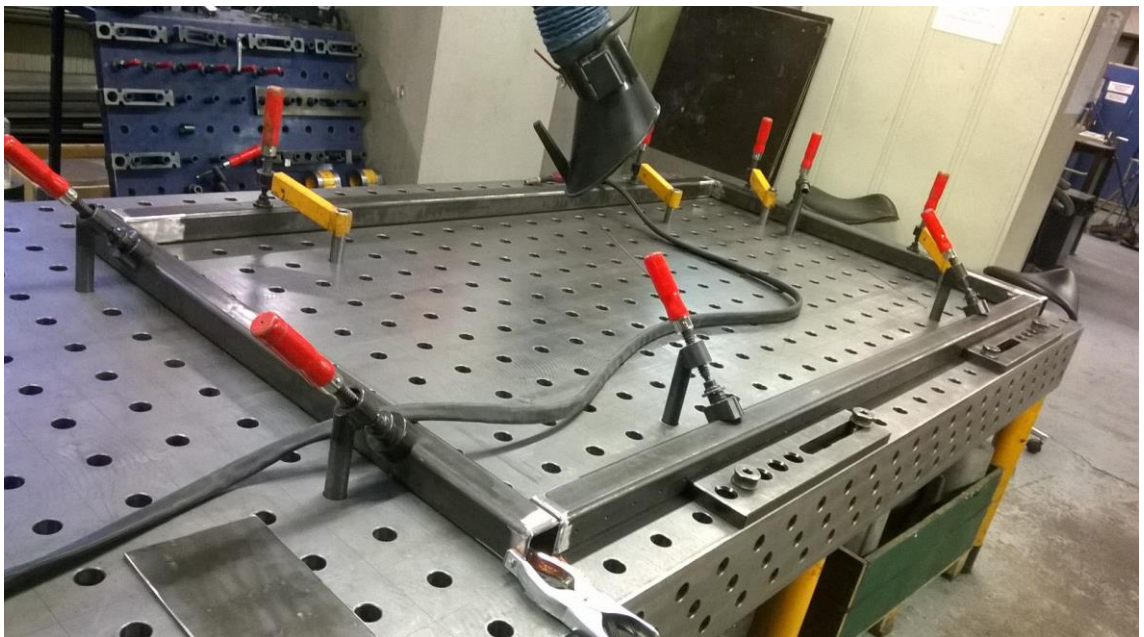
Kuulajohteiden kelkat kulkevat nimensä mukaisesti kuulien varassa. Kuulat kiertävät ympäri kelkan sisällä olevaa kanavaa pitkin. Tämän tyyppisten johteiden etuna on niiden herkkä liikkuvuus, erittäin tarkka liikkeiden toistettavuus ja hyvä kantavuus. Kuulien voitelua varten on jokaiseen kelkkaan asennettu rasvanippa.

4.5 Rungon valmistus

Plasmaleikkurin rungon valmistukseen käytettiin Ruukin toimittamaa neliönmuotoista Double Grade (EN 10219) teräsprofiilia, kooltaan 60 x 60 x 5 mm. Profiilin valintaan vaikutti se, että X- ja Y-akselien johteet kiinnittyvät pulteilla suoraan profiiliin kylkeen. 5

mm:n seinämäpaksuuden katsottiin olevan riittävä M6-kokoista kierrettä varten. Kierteitä varten tehtävät alkureiät katsottiin parhaaksi koneistaa poraamalla laserleikkauksen sijaan, koska laserilla leikattaessa reikien reunat karkaistuvat, mikä luultavasti olisi vaikeuttanut kierteyttämistä. Kierteiden koneistukset teetettiin alihankkijalla.

Rungon kokoaminen aloitettiin sen pääprofiileista. Hitsausseaman tunkeuman takaamiseksi profiilien päät viistettiin ja samalla päät putsattiin lamellilaikalla. Profiilit aseteltiin paikoilleen hitsauspöydälle ja kiinnitettiin tukevasti käyttäen apuna pöytään kiinnittyviä puristimia ja ohjurilevyjä [Kuva 12].



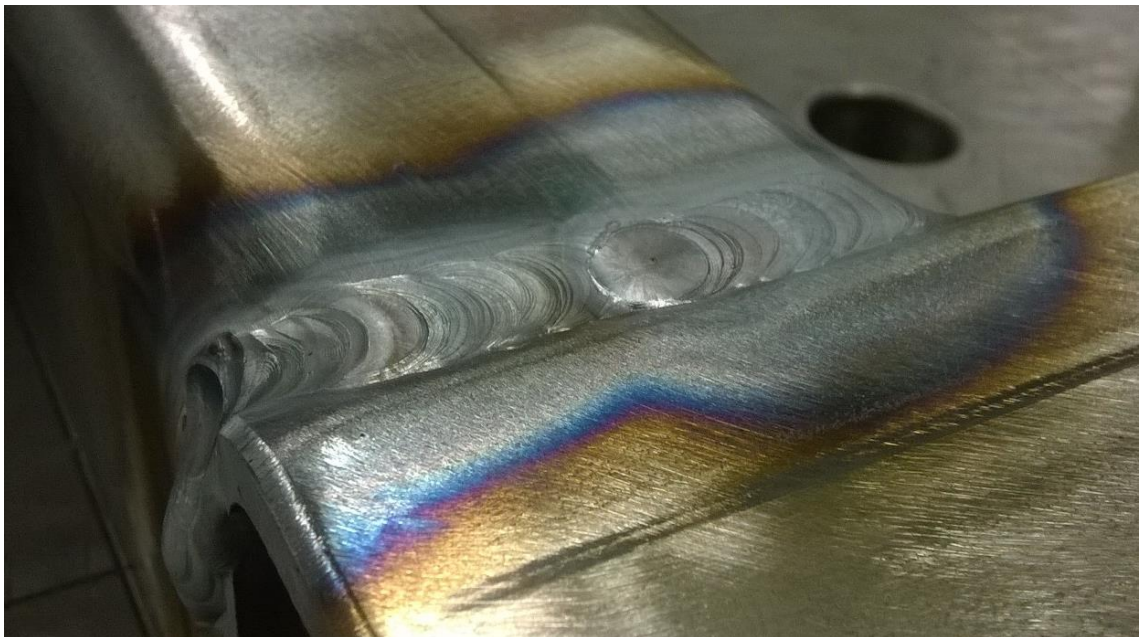
Kuva 12. Lineaaripöydän pääprofiilit aseteltuna paikoilleen hitsauspöydän päällä.

Koska hitsausseaman haluttiin olevan laadukas, käytettiin profiilien hitsaukseen TIG-hitsaustekniikkaa [Kuva 13]. TIG-hitsauksen etuna on erinomainen tunkeuman ja hitsisulan hallinta, mikä johtuu siitä, että energia saadaan kohdistettua juuri oikealle alueelle. TIG-tekniikan tarkkuus perustuu siihen, että valokaari ja lisäaine tuodaan hitsattavaan liitoskohtaan toisistaan erilleen. TIG-hitsauksella saavutetaan roiskeeton, laadukas ja ammattimainen lopputulos. [9, s.159.]



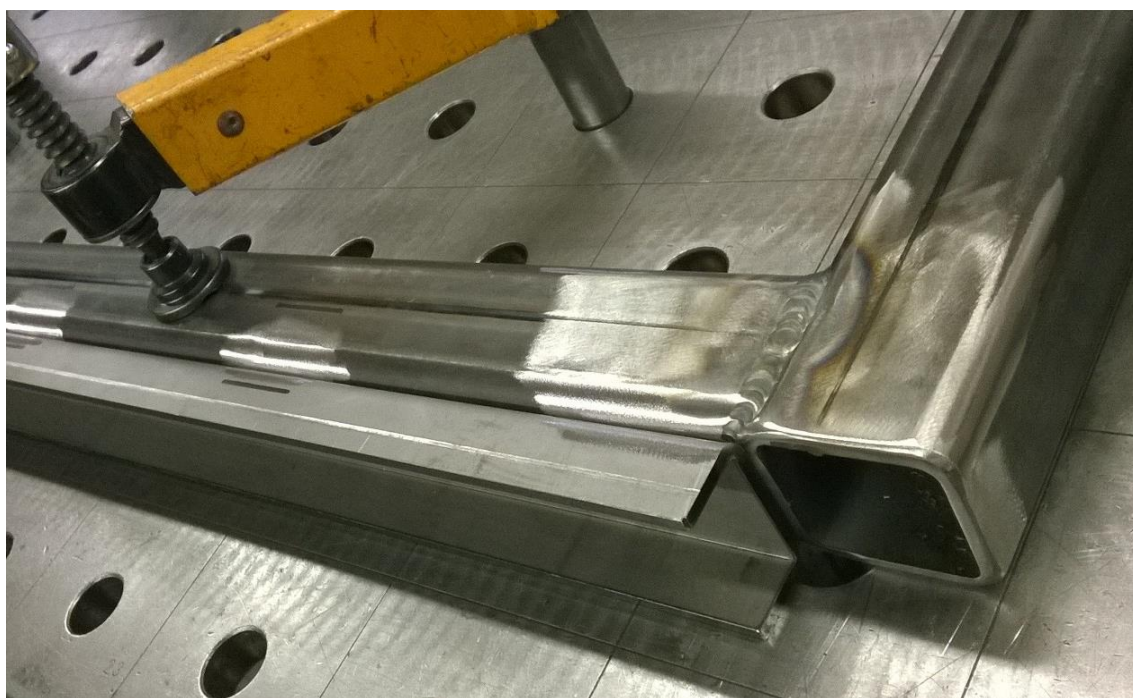
Kuva 13. Rungon pääprofiilit hitsattiin TIG-hitsausmenetelmällä.

Koska lineaaripöydän jalat hitsattiin kiinni pääprofiilien muodostaman kehikon nurkkiin, pääprofiilien hitsaussaumojen haluttiin jäävän profiilin pinnan tasolle [Kuva 14]. Tällä pyrittiin välttämään ylimääräistä hiontatyötä. Tämänkaltaisen lopputuloksen kannalta oli lähes välttämätöntä käyttää TIG-hitsausta, eikä esimerkiksi yleisesti käytettyä MIG-hitsaustekniikkaa.



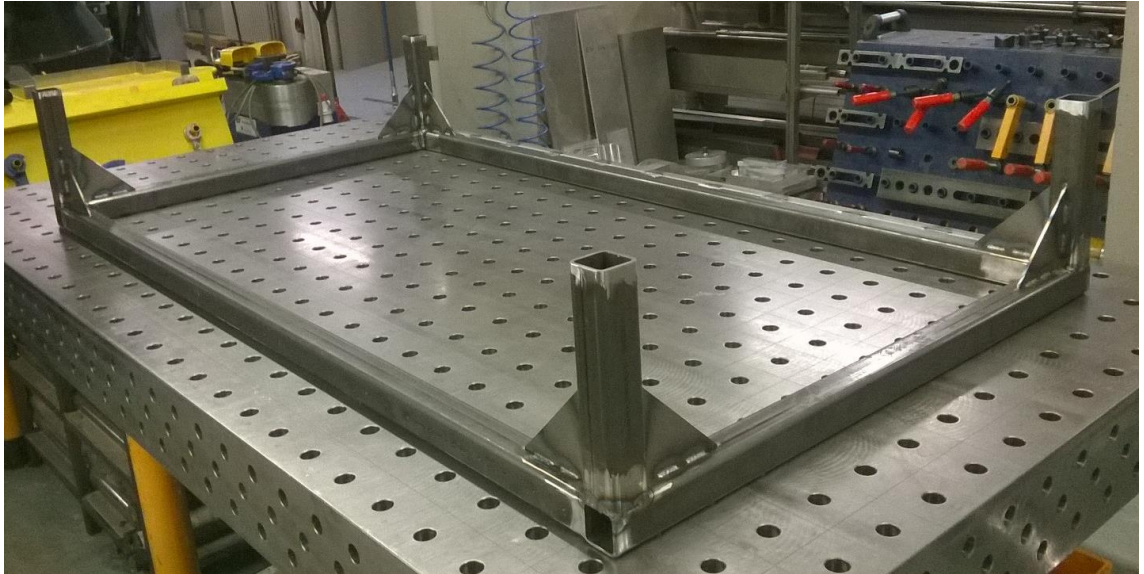
Kuva 14. Päärungon hitsaussauma, jonka vieressä näkyy lämmön vaikutukset.

Lineaaripöydän oikealla puolella käytettiin U-profiilia kuulajohteen sijaan. Avoimen U-profiilin käyttö sallii pienet poikkeamat lineaaripöydän X-akselin profiilien samansuuntaisuudessa. U-profiili oli tarkoitettu valmistaa neliönmuotoisesta profiilista leikkaamalla se keskeltä kahtia. Profiili ei ollutkaan enää suora, kun se oli puolitettu pituussuunnassa. Profiilin valmistusmenetelmästä johtuen rakenteessa olleet jännitykset aiheuttivat leikatun profiilin kieroutumisen. Sen sijaan, että kieroutunutta U-profiilia olisi yritetty suoristaa, päätettiin teettää kantattu U-profiili [Kuva 15], jolloin välttyttäisiin ylimääräisiltä jännityksiltä rungon rakenteessa.



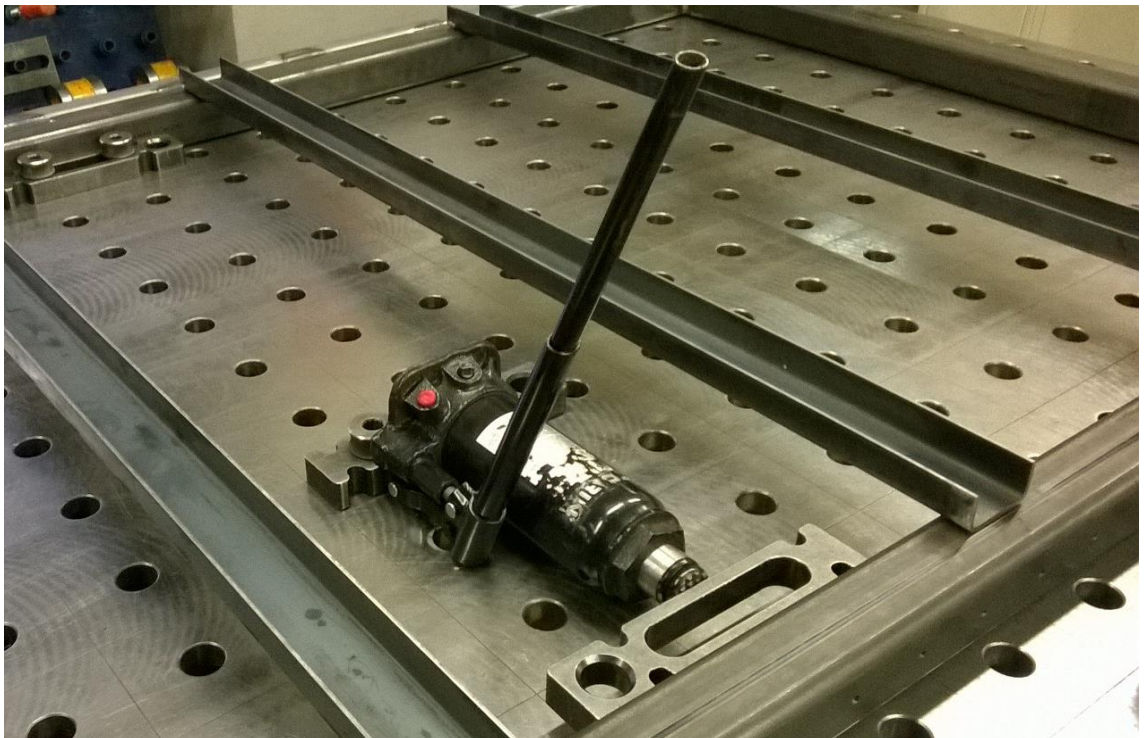
Kuva 15. Lineaaripöydän johteena toimivan U-profiilin asennustoimenpide.

Pääprofiilien nurkkiin hitsattiin rungon jalat. Jalkojen tueksi lisättiin 15.0 x 15.0 cm:n kokoiset, kolmionmuotoiset tukipalat [Kuva 16]. Runkorakenteessa pyrittiin välttämään hitsauksen aiheuttamia muodonmuutoksia, joten hitsaussaumoista tehtiin mahdollisimman lyhyitä. Teräsrakenteen sisäisiltä jännityksiltä ei voida kokonaan välttyä, mutta ne voidaan pyrkiä minimoimaan. Terästehtaalla suoritetun valssauksen jälkeen teräsrakenteisiin jää aina sisäisiä jännitteitä, ja lisäksi hitsauksesta johtuva lämpö aiheuttaa paikallisia jännityksiä. Ne aiheuttavat väistämättä muodonmuutoksia runkorakenteeseen.



Kuva 16. Rungon jalat ja kolmiotuet hitsattuina paikoilleen.

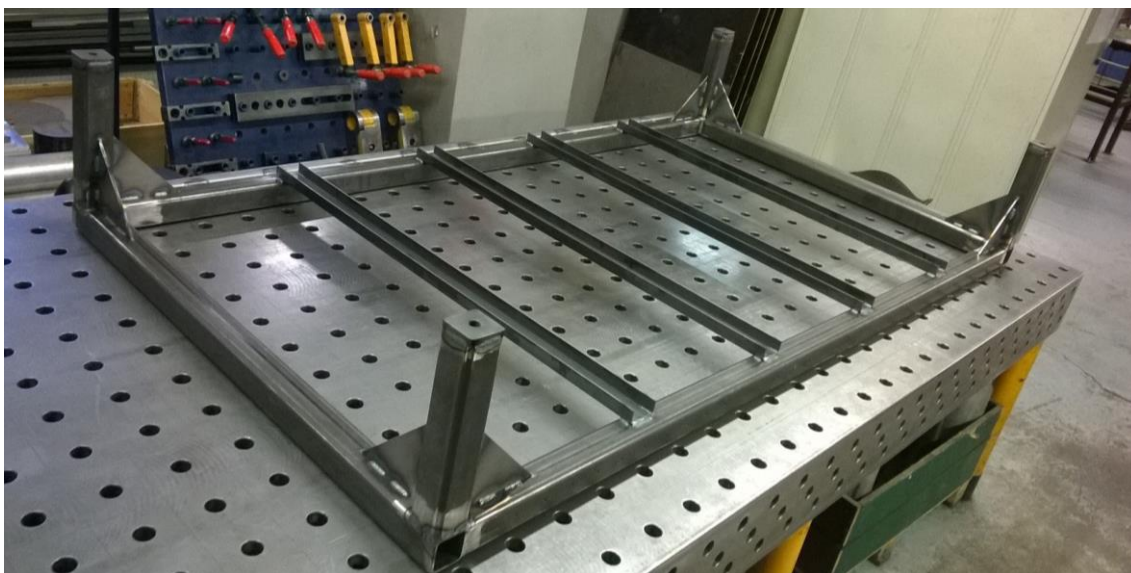
Vesiallasta varten runkoon suunniteltiin U-profiilin muotoiset tuet. Ennen tukien hitsaamista suoruus varmistettiin käyttäen apuna pulloputkua [Kuva 17], jolla profiilit saatiin suoristettua niin, että X-akselin profiilien välinen etäisyys saatiin vakioitua koko profiilin matkalta.



Kuva 17. Rungon suoristus ennen allastukien hitsausta.

Kun vesialtaan tukiprofiilit oli hitsattu kiinni, huomattiin, että runko ei ollut enää suora X-akselin suunnassa. Runkoon oli tullut noin 1.0 – 2.0 mm:n poikkeama. Lämmön aiheuttamalta muodonmuutokselta olisi voitu välttyä, mikäli runko olisi ollut paremmin tuettu vasten hitsauspöytää. Lisäksi tukiprofiilien hitsausseamat olisivat voineet olla lyhyemmät, jolloin muodonmuutosta olisi tuskin tapahtunut. Muodonmuutos korjattiin lämmittämällä profiilia kaasuliekillä tasaisesti profiilin päältä jokaisen allastuen kohdalta, jolloin runko oikeni.

Konejalkojen kiinnitystä varten hitsattiin kierrelaivat rungon jalkojen päihin [Kuva 18]. Konejalkoina käytettiin hyvin tukevia kumivaimenteisia vanhan sorvin jalkoja. Jalkoihin koneistettiin 13 mm:n kiintoavaimelle lovet, jotta rungon korkeutta olisi jatkossa helpompi säätää.



Kuva 18. Valmis päärunko ja jalkojen pätyihin hitsatut kierrelaivat.

Päärungon yli kulkeva Y-akselin suuntainen kelkka toteutettiin samasta neliöprofiilista kuin päärunko. Palkki kiinnitettiin kelkan pätyihin pulteilla molemmista päädystä. Poikittaisprofiilin molempiin pätyihin hitsattiin kiinnitystä varten kierrelevyt [Kuva 19]. Kierrelevyt hitsattiin paikoilleen ilman lisäainetta, jolloin hitsausseama jäi kätevästi profiilin päätytason alapuolelle. Näin profiili voitiin suoraan kiinnittää paikoilleen ilman ylimääräistä hiontaprosessia.



Kuva 19. Y-akselin profiilin pätyyn hitsattu kierrelevy.

Vesialtaan pohjaan asennettiin tuloliitin altaan täyttöä varten ja viemäripoisto altaan tyhjentämistä varten [Kuva 20]. Vedenpinnan korkeutta voidaan näin muuttaa kätevästi ja allas saadaan aina täytettyä ja tyhjennettyä tarvittaessa. Vesi- ja viemäri-liitännät voidaan asentaa kiinteästi leikkuriin kiinni.



Kuva 20. Vesialtaan pohjaan asennettiin vesihana ja viemäri-lähtö.

Rungon sisänurkkien saumoja madallettiin vesialtaan asennusta varten, jotta allas saatiin asennettua paikoilleen [Kuva 21]. Allas pysyy aloillaan oman, lamellien ja veden painon ansiosta. Altaan päälle asennettiin lamellit, joiden varaan leikkausaihiot lasketaan.



Kuva 21. Vesiallas ja lamellit ensimmäistä kertaa asennettuna paikoilleen.

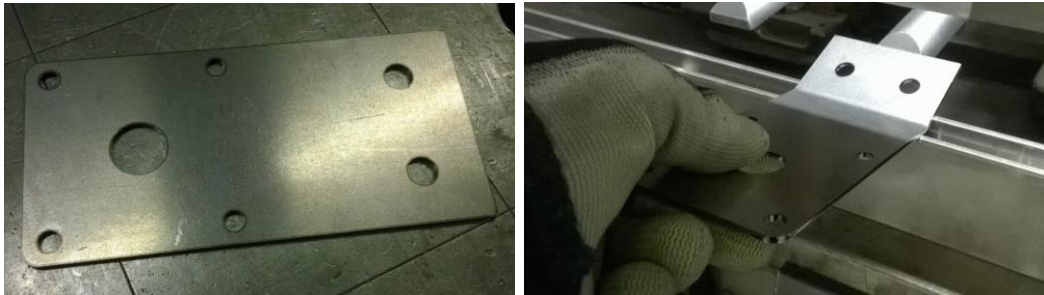
Leikkurin rungon yli kulkeva Y-akselin kelkka kiinnitettiin vasemmasta laidasta kiinni X-akselin suuntaiseen lineaarijohteeseen [Kuva 22]. Kelkkaan kiinnitettiin Y-akselin lineaarijohde, johon kiinnitettiin Z-suuntaisen liikeakselin komponentit.



Kuva 22. Y-akselin kelkan rakenne.

4.6 Ohutlevyosien valmistus

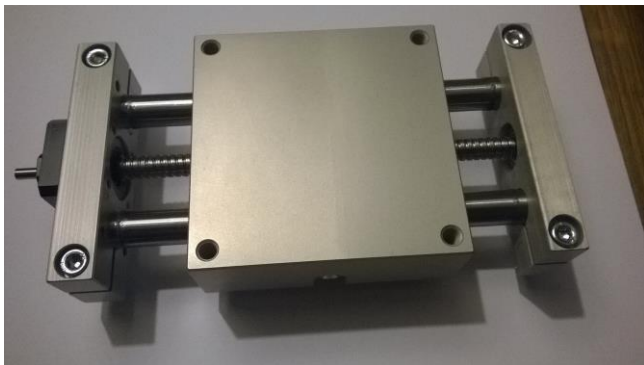
Ohutlevyosina valmistetut askelmoottorien kannakkeet tilattiin särmäämättöminä alihankkijalta. Osat leikattiin 3.0 ja 4.0 mm:n paksuisista teräslevyistä. Särmästyö suoritettiin Metropolian hitsauslaboratoriossa olevalla särmäyskoneella [Kuva 23]. Osa rei'istä oli niin lähellä särmäyskohtia, että ne muuttivat muotoaan särmäyksen aikana. Tämän takia lähellä särmäyskohtia olevat reiät mitoitettiin hieman ylimittäisiksi, jotta kiinnityspultit mahtuisivat niiden läpi myös särmästyön jälkeen.



Kuva 23. 1) Laserleikattu ohutlevyosa. 2) Ohutlevyosan kanttaustyö.

4.7 Z-suuntaisen liikeakselin mekaniikka

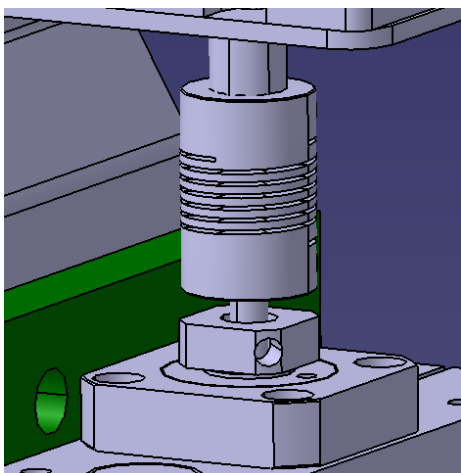
Plasmaleikkurin Z-akselin (pystysuuntainen) liike toteutettiin Rollcon lineaariyksiköllä [Kuva 24], johon valittiin 50 mm:n liikematka. Lineaariyksikkö koostuu kahdesta kuulajohteesta, sen päädyistä ja kuularuuvista, jonka akselin halkaisija on 4.0 mm.



Kuva 24. Rollcon valmistama, kuulajohteilla varustettu lineaariyksikkö.

Lineaariyksikön kelkan päälle asennettiin toinen kelkka, joka liikkuu jousikuormitteisesti omilla V-kiskoillaan. Tätä mekanismia hyödynnetään leikkuuaihion yläpinnan etsinnässä. Mekanismin tarkoitus on sallia polttimen lyhyt pystysuuntainen liike, kun se ajetaan vasten aihion pintaa. Tarvittava liikkeen pituus toisiokelkalle on noin 5.0 mm.

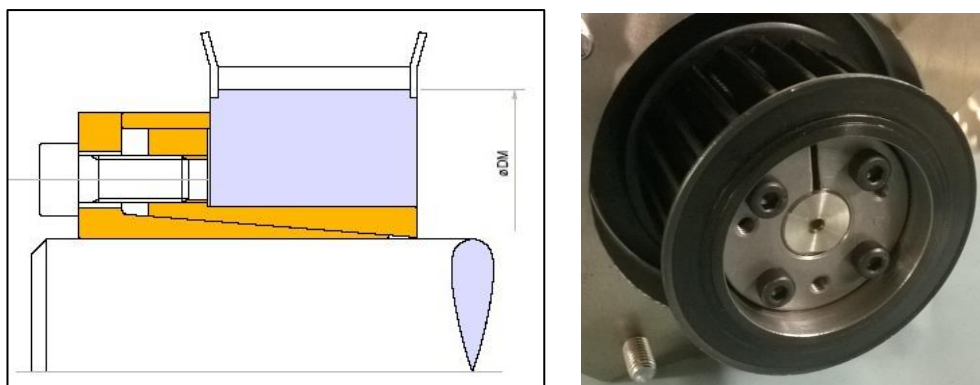
Z-akselin liikettä ohjaava askelmoottori asennettiin suoraan lineaariyksikön yläpuolelle. Askelmoottorin akselin halkaisija on 8.0 mm eli kaksi kertaa suurempi kuin kuularuuvin akseli. Näiden kahden akselin väliin asennettiin alumiininen spiraalikytkin [Kuva 25]. Spiraalikytkin sallii pienen virheen akselien yhdensuuntaisuudessa.



Kuva 25. Askelmoottorin ja kuularuuvin yhdistävä spiraalikytkin.

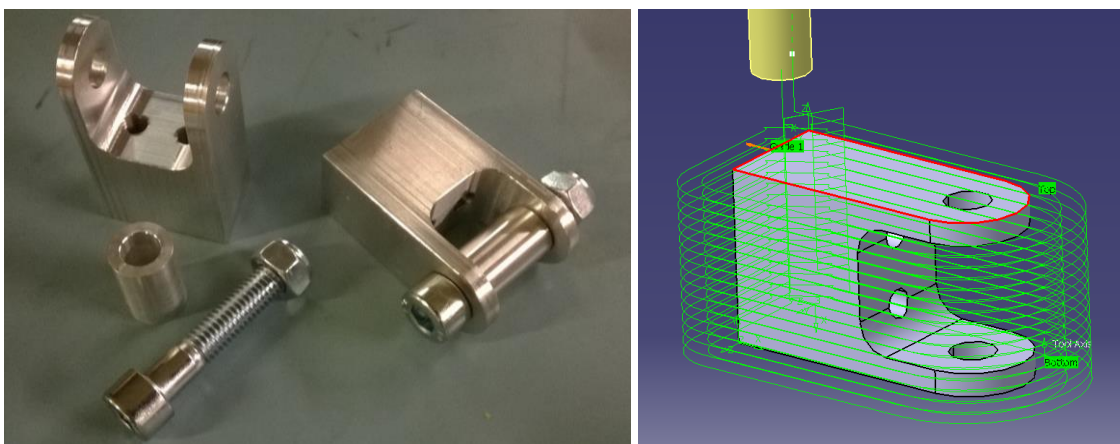
4.8 Hihnapyörien ja hihnojen kiinnitysmekanismit

Hihnapyörät kiinnitettiin kiristysholkeilla [Kuva 26] suoraan moottoreiden akseleille. Kiristysholkki on tukeva ja luotettava tapa kiinnittää hihnapyörät. Holkkien asennusvaiheessa huolehdittiin siitä, että moottorin akseli olisi mahdollisimman syvällä kiinnitysholkin sisällä, jotta saavutettaisiin mahdollisimman suuri momentin siirtokyky.



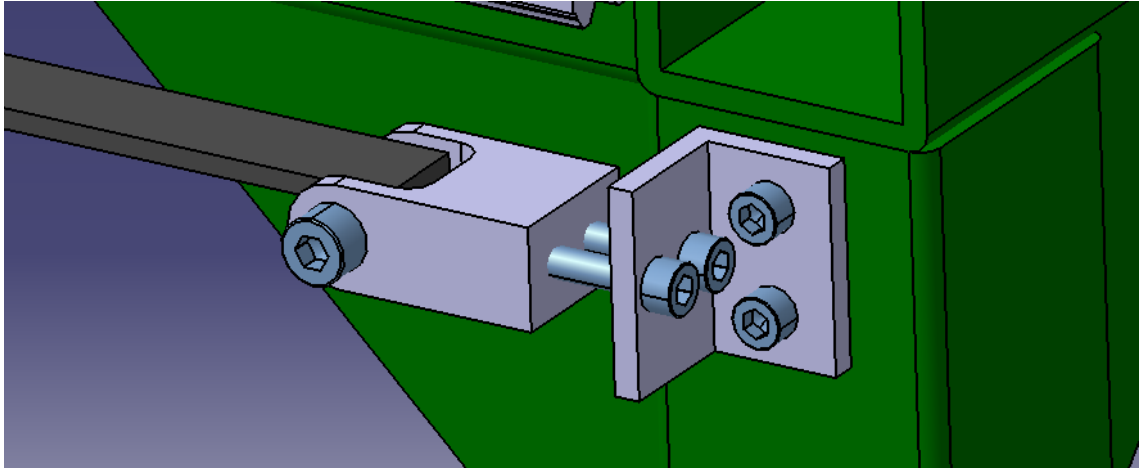
Kuva 26. 1) Tollok-merkkisen kiinnitysholkin poikkileikkaus [10]. 2) Asennettu hihnapyörä.

Hammashihnojen päätykiinnikkeet koneistettiin alumiinista [Kuva 27]. Koneistustyö suoritettiin Metropolian konelaboratoriossa Quaser CNC-työstökeskuksella. Koneistusradat mallinnettiin Catia 3D –mallinnusohjelmalla [Kuva 27].



Kuva 27. 1) Alumiinista koneistetut hihnojen päätykiinnikkeet. 2) Työkalun työstörata.

Päätykiinnikkeiden avulla saadaan säädettyä hammashihnojen kireyttä [Kuva 28]. Hammashihnan on oltava riittävän kireällä, jotta hihna ei pääsisi hyppimään hammaspyörän päällä. Hammashihnojen kireys säädettiin kokeilemalla moottorin liikkeitä. Kireysvaatimukseen vaikuttavat järjestelmän maksimikihtyvyys, hihnapyörien koko ja hammashihnan ja –rattaan välisen kosketuskulman suuruus.



Kuva 28. X-akselin hammashihnan kiristysmekanismin 3D-malli.

Hammashihnojen kiinnitystä varten valmistettiin kiinnikkeet 30.0x30.0 millimetrin teräsprofiilista [Kuva 29]. Kiinnikkeet asennettiin X-akselia varten vasemmanpuoleisten pystyjalkojen yläpäähän ja Y-akselin hihnaa varten poikittaisprofiilin yläpintaan.



Kuva 29. Teräksestä valmistetut hihnakiinnikkeet.

5 CNC-plasmaleikkurin ohjausjärjestelmä

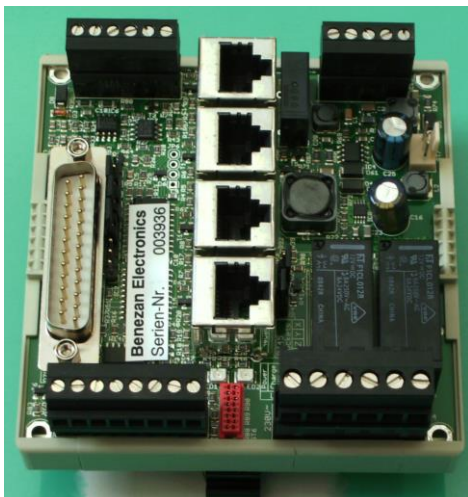
5.1 Ohjausjärjestelmän komponentit

Plasmaleikkurin ohjauselektroniikkaan liittyvät komponentit ostettiin rakennussarjana saksalaiselta toimittajalta nimeltä Benezan-Electronics. Sarjaan sisältyi seuraavat komponentit: breakout-kortti, kolme askelmoottoria, kolme askelmoottoriohjainta, kaksi virtalähdettä, häiriönpoistaja sekä signaali- ja moottorikaapelit. Lisäksi sarjan mukana tuli käyttö- ja kytkentäohjeet sekä komponenttien kytkentäkaavio. Sähkökomponentit asennettiin erilliseen sähkökaappiin.

5.2 Breakout-kortti

Leikkuria ohjaavaan tietokoneeseen on kytketty I/O-kortti, jonka tehtävänä on muun muassa ohjata askelmoottorivahvistimia, vastaanottaa signaalit rajakytkimiltä, toimia osana hätäseispiiriä ja lähettää ohjauksignaaleita mahdollisille toimilaitteille. Tätä korttia kutsutaan breakout-kortiksi, suomen kielessä käytetään usein nimeä ohjainkortti. Ohjainkortti voidaan kytkeä tietokoneeseen käyttäen USB-, rinnakkais- tai sarjaporttia.

Tässä projektissa käytetty Benezan-Electronicsin valmistama ohjainkortti [Kuva 30] liitetään tietokoneeseen rinnakkaisväylää hyödyntäen. Signaalijohdot kiinnitetään ruuviterminaaleihin ja askelmoottoreiden vahvistimille signaalit johdetaan kätevästi RJ-45-liittimillä varustetuilla Ethernet-verkkokaapeleilla. Ohjainkortilla voi ohjata yhteensä neljää askelmoottoria samanaikaisesti. Ohjainkortti on yhteensopiva PC:llä ajettavien CNC-ohjelmien, kuten MACH3, WinPCNC, LinuxCNC (ennen EMC²) tai USB-CNC kanssa. Piirilevyllä olevien kytkimien avulla ohjainkortti voidaan asettaa tiettyyn tilaan. Kytkimillä voidaan vaikuttaa muun muassa taajuusinverterin, releulostulojen, Z-akselin jarrun ja rajakytkimien toimintaan. [11.]



Kuva 30. Benezan-Electronics:n valmistama breakout-kortti [12].

Käyttöjännitteeksi ohjainkortille kelpaa jokin jännite 15 ja 80 V:n väliltä. Rakennussarjan mukana toimitettu ulkoinen virtalähde tuottaa 48 V:n jännitteen.

5.3 Askelmoottorit ja niiden ohjaimet

Plasmaleikkauspöydän akselien liikuttamiseen käytetään joko askel- tai servomoottoreita. Nämä kaksi moottorityyppiä eroavat toisistaan niiden ohjauslogiikan osalta. Askelmoottori ei itsessään sisällä asematietoa tuottavaa anturointia, joten sitä ainoastaan ohjataan liikkumaan, ja oletetaan sen liikkuvan oikein. Mikäli askelmoottori on esimerkiksi jumissa tai liikkuu virheellisesti, ei sen ohjain pysty kompensoimaan tilannetta, koska takaisinkytkentää ei ole. Mikäli askelmoottorin asemaa halutaan tulkita, on järjestelmään asennettava erillinen komponentti aseman tunnistamista varten ja tätä kautta suoritettava mahdollinen takaisinkytkentä. Servomoottori itsessään sisältää asema-anturoinnin, ja tämän ansiosta moottori voidaan, askelten sijaan, komentaa liikkumaan tietyn etäisyyden verran. Servomoottorin ohjain huolehtii takaisinkytkennän avulla siitä, että moottori liikkuu oikein. Modernit askel- ja servomoottorit eivät kokonsa puolesta juurikaan eroa toisistaan.

Servo- ja askelmoottorit eroavat toisistaan myös hintansa puolesta. Askelmoottorit ovat karkeasti arvioiden noin puolet edullisempi vaihtoehto verrattuna servomoottorien hankintahintaan. Tästä syystä päädyttiin käyttämään projektissa askelmoottoreita. Käytettäessä askelmoottoreita, on niiden koko käyttötarkoitukseen nähden monesti

ylimitoitettu. Näin varmistetaan, että takaisinkytkennän puuttuessa moottorissa riittää voimaa liikkua luistamatta haluttuun paikkaan.

Benezan-Electronicsin sarja sisälsi kaksi samankokoista askelmoottoria X- ja Y-akseleille sekä yhden pienemmän askelmoottorin Z-akselin liikettä varten. Isommat X- ja Y-akseleille valitut moottorit ovat malliltaan HS86-5880-03 [Liite 1] ja Z-akselille valittu moottori on malliltaan HS60-2150-03 [Liite 2].

5.4 PC-pohjaiset CNC-ohjelmat

Teollisessa tuotannossa käytettävien CNC-koneiden ohjauspaneelin sijaan valittiin järjestelmää ohjaamaan tavallinen pöytätietokone. Tietokoneella ajettava CNC-ohjelma ohjaa plasmaleikkurijärjestelmän toimintaa. Ohjelman tehtävänä on tulkitta CAM-ohjelmalla luotua tai vaihtoehtoisesti käsin kirjoitettua G-koodia (tunnetaan myös nimellä ISO-koodi) ja muuttaa se sopiviksi ohjaussignaaleiksi askelmoottorien ohjausta varten. Yleisimmät harrastajien käytössä olevat ohjelmistot ovat tällä hetkellä Windows-pohjainen MACH3 ja Linux-pohjainen LinuxCNC.

Kuten Linux-käyttöjärjestelmä, myös LinuxCNC-ohjelma on avoimen lähdekoodin ohjelma (engl. open source) ja se noudattaa GPL-lisenssiä. GPL-lisenssin alaisuudessa olevia ohjelmia saa käyttää ja tutkia vapaasti ilman erikseen veloitettavaa maksua. Ohjelmaa ja sen lähdekoodia saa vapaasti jakaa eteenpäin ja lisäksi lähdekoodi on vapaasti muokattavissa, kunhan tehdyt muutokset dokumentoi selvästi. [13.]

Käytettäessä vapaan lähdekoodin ohjelmia, suurimpia etuja ovat ohjelmien saatavuus ja yhteisöllinen käyttäjätuki. Järjestelmää ohjaavaan tietokoneeseen päätettiin asentaa LinuxCNC. LinuxCNC:n käyttäjäkunta on laaja ja ohjelmisto on hyvin tuettu. Ohjelmistoa koskevat opetusmateriaalit ja käyttöohjeet ovat erittäin kattavat ja niitä päivitetään aktiivisesti. Opiskelijat työskentelevät usein hyvin itsenäisesti projektiensa parissa, joten tämän tyyppisen käyttäjäympäristön kannalta on hyvin kätevää, että käyttöohjeet ja tieto ovat saatavilla kattavasti suoraan ohjelmiston www-sivuilta (www.linuxcnc.org).

LinuxCNC-ohjelmiston voi joko asentaa Linuxin pakettien hallinnan kautta tai lataamalla ISO-formaatissa olevan asennusmedian ohjelmiston [www-sivuilta](#). Asennusmedia sisältää Ubuntu Linux -käyttöjärjestelmän. Käytettäessä asennusmediaa on etuna se, että LinuxCNC:n työryhmä on jo valmiiksi optimoinut Linux-käyttöliittymän asetukset sopiviksi LinuxCNC:n käyttöä varten. Käytännössä optimointi on tarkoittanut turhien taustapalvelujen sammuttamista, jotta ne eivät veisi järjestelmän resursseja. CNC-plasmaleikkurin ohjaamisen kannalta on hyvin tärkeää, että ohjaavan tietokoneen latenssiajat ovat optimoitu minimiin. Näin varmistetaan saumaton ohjaus sekä sulavat ja virheettömät liikeradat leikkausprosessien aikana.

5.5 SheetCAM

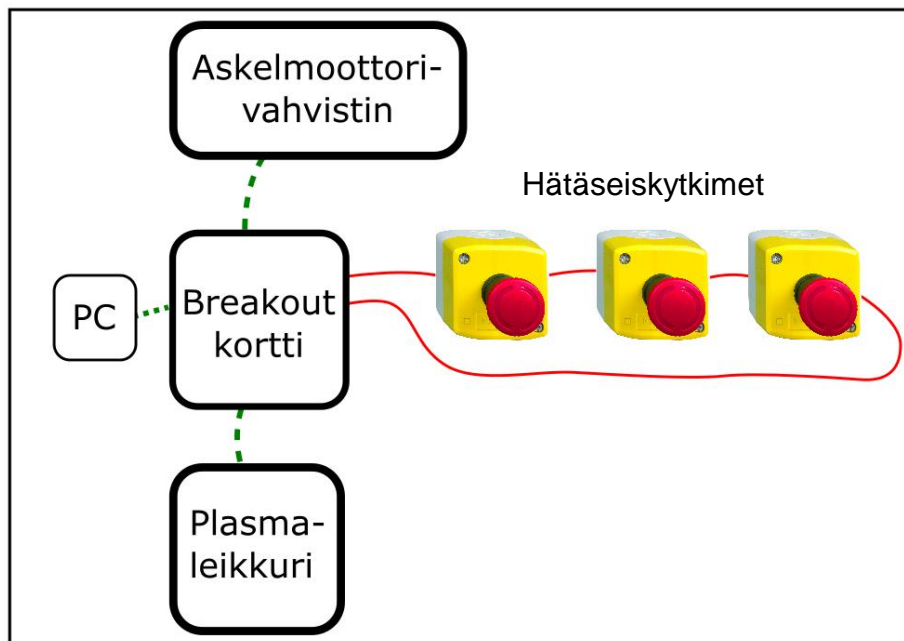
Työstöratojen ohjelmointia varten ohjausjärjestelmän tietokoneelle asennettiin SheetCAM-ohjelma. Ohjelman Linux-versio on ilmaiseksi ladattavissa ohjelmiston Internet-sivuilta (www.sheetcam.com). Windows-käyttöjärjestelmillekin on tarjolla oma ilmaisversionsa, jonka tuottaman G-koodin rivimäärä on rajoitettu. Rivirajoituksesta pääsee eroon ostamalla edullisen, 110 £ (noin 150 €) arvoisen lisenssin. [14.]

Leikattavien osien piirustukset ladataan ohjelmaan DXF-formaatissa. Kun ohjelman perusasetukset on saatu kohdilleen, on ohjelman käyttö suoraviivaista. Mikäli leikattavasta osasta halutaan tehdä useampi kopio, onnistuu se SheetCAM:n nesting-toiminnolla. Tämä toiminto asettelee leikattavat kappaleet aihion kokoiselle alueelle limittäin ja kustannustehokkaasti säästäen materiaalia. Nesting-toimintoa voidaan käyttää, vaikka leikattavat osat eivät olisi keskenään samanlaisia.

5.6 Hätäseispiiri

Hätäseispiirin tehtävänä on pysäyttää plasmaleikkurin liike ja leikkaustoiminto luotettavasti ja nopeasti, kun hätäseispainiketta painetaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ohjainkortti katkaisee askelmootoreille menevän ohjaussignaalin ja sammuttaa plasmapolttimen. Ohjainkortin ruuviterminaalissa on oma paikkansa hätäseispiirin painikkeille. Hätäseispiiri tulisi aina toteuttaa niin, että mikäli painikkeeseen tulee jokin vika, ei järjestelmän käyttöä tällöin sallita. Näin voidaan olla

varmoja siitä, että hätäseispiiri on aina toimiva. Mikäli järjestelmässä käytetään useampaa kuin yhtä hätäseiskytkintä, kytketään ne yleensä sarjaan [Kuva 31].



Kuva 31. Useamman kytkimen hätäseispiiri.

Yksi hätäseiskytkimistä sijoitettiin sähkökaapin etupaneeliin ja toinen kytkimistä asennettiin kiinni pöytään, tietokoneen näppäimistön viereen.

5.7 Referenssiasemat ja niiden kytkimet

X- ja Y-akselien johteiden yhteyteen asennetaan kytkimet, jotka toimivat kunkin akselin referenssiasemana. Aina kun ohjauslogiikka käynnistetään, on sekä X- että Y-akselien kelkat ajettava kertaalleen referenssiasemaan, jotta järjestelmää ohjaava tietokone saa tiedon kelkkojen sijainneista. Tässä työssä rakennetussa järjestelmässä ei ole absoluuttisen paikkatiedon takaisinkytkentää. Referenssiasemaan ajon jälkeen tietokoneohjelma tietää, mikä on kyseisen kelkan sijainti ja tästä eteenpäin se olettaa, että kelkka on liikkunut ohjattujen askelten verran. Mikäli askelmoottorien asennot muuttuvat jonkin ulkopuolisen tekijän seurauksena, ei plasmapolttimen sijainti vastaa enää tietokoneen muistissa olevaa sijaintia. Tällöin akselit on ajettava uudelleen referenssiasemiin, jotta niiden sijainnit selviävät tietokoneohjelmalle. Vialliset tai väärin asennetut mekaaniset osat saattavat aiheuttaa paikkatiedon katoamisen. Näin ei pitäisi

käydä. Mikäli paikkatieto kuitenkin katoaa usein, on katoamisen aiheuttava syy selvitettävä ennen koneen käytön jatkamista.

Referenssiasemat tunnistavien kytkimien lisäksi jokaisen akselin yhteyteen asennetaan kytkimet, jotka toimivat liikkeiden päätyrajoina. Päätyrajojen kytkimet voidaan kytkeä niin, että ne ovat samassa piirissä hätäseisyyden kytkimien kanssa. Mikäli järjestelmä toimii oikein, ei liikeakselien kelkkojen pitäisi koskaan liikkua päätyrajakytkimille asti.

Referenssiasemien ja päätyrajojen kytkiminä käytetään pääasiassa joko mikrokytkimiä, jotka perustuvat mekaaniseen kosketukseen, tai vaihtoehtoisesti induktiivisia antureita, jotka eivät vaadi mekaanista kosketusta [Kuva 32]. Induktiiviset anturit kytkeytyvät, kun niiden eteen tuodaan jokin metallinen tai hyvin sähköä johtava esine.

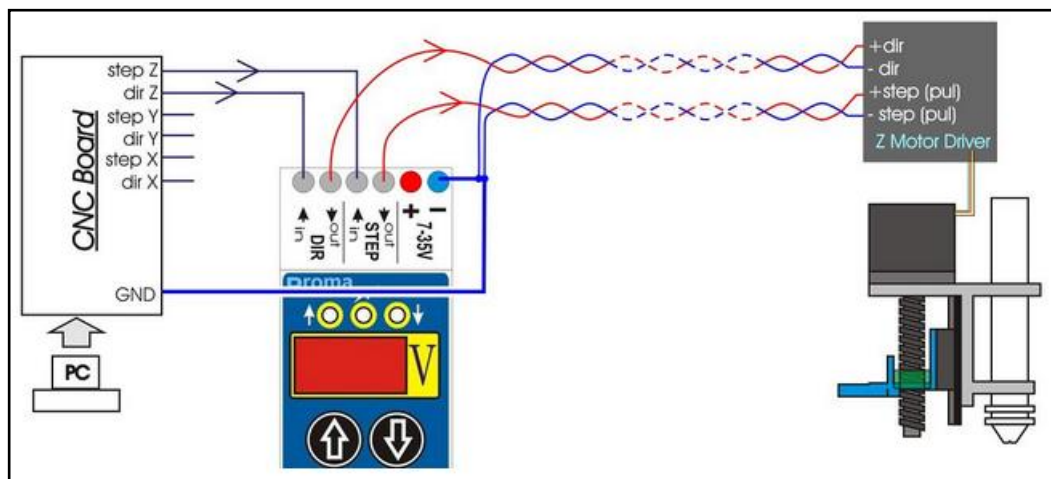


Kuva 32. Referenssiasemissa käytetyt kytkimet: 1) Mikrokytkin [15] 2) Induktiivinen anturi [16].

5.8 Plasmapolttimen korkeudensäätö, THC

Tasalaatuisen leikkausjäljen kannalta, leikkaussuunnan lisäksi, on polttimen ja metallilevyn välisellä etäisyydellä merkittävä vaikutus. Leikattavat metallilevyt ovat tehtaalta tullessaan hieman käyriä ja usein ne käyristyvät leikkauksen yhteydessä lämmön vaikutuksesta. Myös koneen rungon rakenne saattaa aiheuttaa poikkeamia polttimen ja metallilevyn väliseen etäisyyteen. Laadukkaan leikkausjäljen takaamiseksi voidaan käyttää säädintä, joka pitää polttimen korkeuden leikattavaan metallilevyyn nähden vakiona. Säätimen toiminta perustuu elektrodin ja leikattavan metallilevyn välille syntyvän valokaaren jännitteen mittaamiseen.

Tässä projektissa päädyttiin käyttämään puolalaisen Proma-Elektronika –nimisen yrityksen valmistamaa Compact THC SD säädintä. Kyseisestä säätimestä tekee erityisen kätevän se, että se manipuloi suoraan askelmoottorille menevää ohjaussignaalia [Kuva 33]. Tavanomaisesti THC-säätimet on kytketty niin, että säätimeltä kulkee askelmoottorin ohjainkortille tieto siitä kumpaan suuntaan poltinta on liikutettava, jonka jälkeen ohjausjärjestelmä on joutunut ensin tulkitsemaan THC-säätimen lähettämän signaalin ja sen perusteella vasta ohjaamaan askelmoottoria.

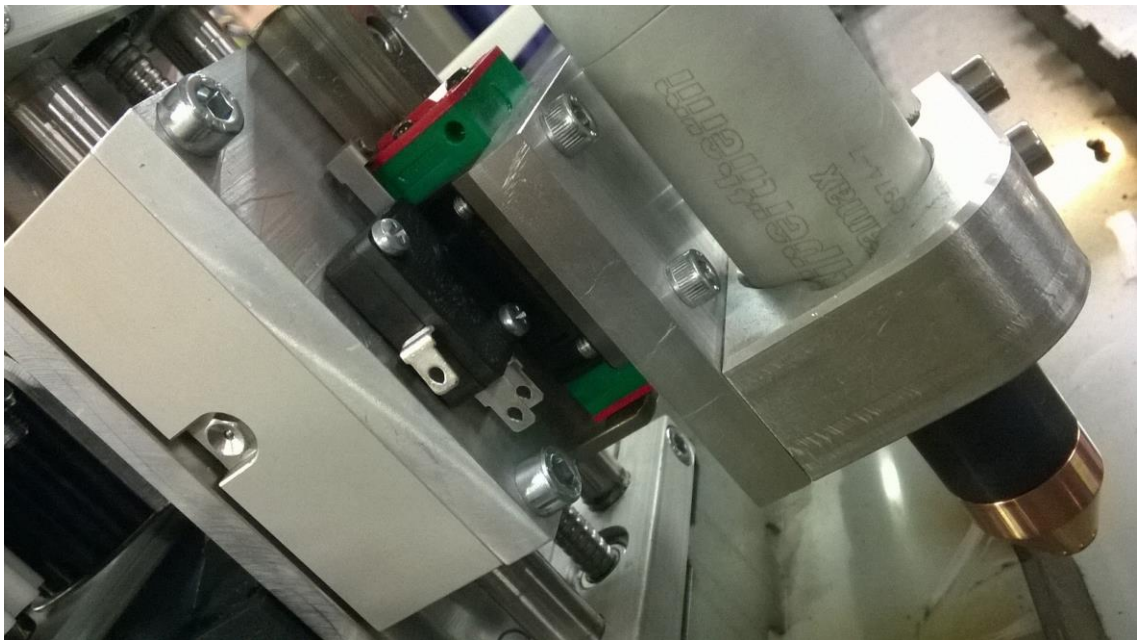


Kuva 33. Plasmapolttimen korkeudensäätimen (THC) kytkentäkaavio [17].

Kelluva poltin

Ennen leikkausprosessin aloittamista on ohjausjärjestelmälle kerrottava aihion pinnan korkeus, jotta ohjausjärjestelmä osaa liikuttaa plasmapolttimen oikeaan peruskorkeuteen. Tämä toimenpide voidaan automatisoida käyttämällä kelluvaa plasmapoltinta (engl. floating torch) [Kuva 34]. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että

plasmapoltin on kiinnitetty Z-akselin suunnassa liikkuvaan jousikuormitettuun kelkkaan, joka liikkuu noin 20 mm:n verran. Aihion pinnan tunnistus suoritetaan G-koodi-komennolla G38.2, jolloin poltin ajetaan hitaasti kiinni aihion pintaan. Kun poltin osuu aihion pintaan, lähtee toisiokelkka liikkumaan Z-akselin suuntaisesti. Kelkan liike tunnistetaan mikrokytkimen avulla, jolloin järjestelmä saa tiedon siitä, että poltin on osunut aihion pintaan. Tämä jälkeen järjestelmä siirtää polttimen määritellyn etäisyyden päähän aihion pinnasta, minkä jälkeen leikkausprosessi voidaan aloittaa. Leikkausprosessin aikana THC-ohjain huolehtii plasmapolttimen ja aihion välisen etäisyyden vakioinnista.



Kuva 34. Z-suuntaisen liikeakselin rakenne.

6 Käyttöönotto ja ensikokemukset

6.1 Leikkurin käyttöönotto

Ennen ensimmäisen osan leikkausta vaati järjestelmä erilaisia valmistelutoimenpiteitä. Ohjelmistojen asennus PC:lle ja parametrien asetus veivät yllättävän paljon aikaa. Sähkömekaanisten komponenttien, kuten rajakytkimien ja virtalähteen CNC-väylän, liittäminen ohjausjärjestelmään oli suoraviivaista hyvien käyttöohjeiden ansiosta. LinuxCNC-ohjelman asetustiedostoihin määriteltiin liikeakseleiden parametrit, joiden perusteella ohjausjärjestelmä osaa laskea, kuinka paljon kutakin moottoria on pyöritettävä, jotta saavutetaan haluttu liikematka. Järjestelmän lopulliseen asennustyöhön kului kokonaisuudessaan 16 tuntia [Kuva 35].



Kuva 35. Käyttövalmis järjestelmäkokonaisuus.

6.2 Ensimmäisen osan leikkaus

Järjestelmän asennuksen jälkeen päästiin kokeilemaan leikkuria tositoimissa ensimmäisen kerran. Ohjausjärjestelmän PC:lle asennettiin QCAD-ohjelma (Linux-versio on GPL-lisenssin alla), jolla esimerkkiosa suunniteltiin. Esimerkkiosan DXF-formaatissa oleva piirustus ladattiin SheeCAM-ohjelmaan, jolla ohjelmoitiin liikeradat kappaleen leikkausta varten. Työstöohjelman luonti SheetCAMilla oli suoraviivaista, sillä plasmaleikkurille löytyi lähes suoraan yhteensopiva postprocessor. Postprocessorin tehtävä on sovittaa työstöohjelma sopivaksi tietyille konetyypille huomioiden ohjausjärjestelmän vaatimat erityiskomennot. Postprocessoriin liittyvät määritelmät räätälöidään aina konekohtaisesti.

Ensimmäisen leikkauksen yhteydessä vesialtaassa ei vielä ollut vettä. Altaan pohja suojattiin muutamalla metallilevyllä, ettei leikkauksen aikana syntyvä sula metalli vaurioittaisi altaan pohjaa. Suojaus osoittautui aiheelliseksi, sillä sulaa metallia oli leikkauksen päätteeksi runsaasti suojalevyjen päällä. Työstöohjelma ajettiin muutama kertaan läpi ja varmistettiin, että polttimen liikkeet olivat oikeanlaiset. Tämän jälkeen plasmavirtalähde kytkettiin päälle ja suoritettiin ensimmäinen leikkaus [Kuva 36]. Tämä oli projektin onnistumisen kannalta merkittävä saavutus. Leikatusta osasta oli havaittavissa epätarkkuus, joka luultavasti johtuu X-suuntaisen akselin värinäistä. Lisäksi osan seinämät olivat ylöspäin kapenevat, mikä viittaisi siihen, että polttimen korkeus aihioon nähden oli hieman liian korkea.



Kuva 36. Ensimmäinen leikattu testikappale.

7 Parannusehdotukset

7.1 Vesialtaan materiaali

Rungon yhteyteen asennettavan vesialtaan materiaaliksi valittiin ruostumaton teräs, koska haluttiin, että allas säilyy pitkään ja että se kantaa sen päälle lasketun kuorman. Ruostumattomasta teräksestä tehty allas on hankintahinnaltaan melko kallis ja lisäksi se on painava. Parantamalla altaan päälle tulevien lamellien tukirakennetta, voidaan altaaseen kohdistuvaa kuormaa jakaa laajemmalle alueelle, jolloin altaan materiaalin voisi vaihtaa alumiiniin, joka olisi ruostumattomaan teräkseen verrattuna edullisempi ja kevyempi vaihtoehto. Ruostumattomasta teräksestä tehty allas toimii tukirakenteena. Jos allas olisi tehty alumiinista, pitäisi altaaseen kohdistuvat voimat minimoida. Altaaseen kohdistuvat voimat tulisi huomioida etenkin, jos leikkurin päälle aiotaan laskea todella painavia metallilevyjä.

7.2 Levyosien käyttö ja hitsattujen rakenteiden minimointi

Rungon valmistusvaiheessa huomattiin, että mittatarkan rungon valmistaminen hitsaamalla oli haastavaa. Profiilien sisäiset jännitykset ja hitsauksesta syntyvät runkoon kohdistuneet lämpökuormat aiheuttivat muodonmuutoksia runkoon, ja niitä jouduttiin jälkeempään korjaamaan. Hitsattujen rakenteiden korvaaminen pulttiliitoksilla edesauttaisi ehkäisemään muodonmuutoksia ja lisäksi rungon kokoonpanotyöstä tulisi yksinkertaisempaa.

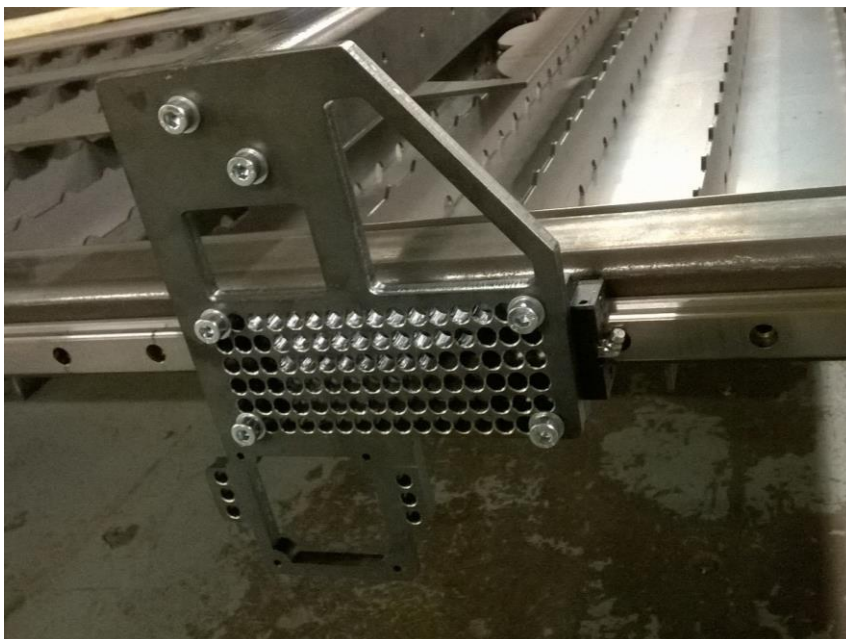
Yksittäisten osien koneistaminen jyrsimällä on merkittävästi kalliimpaa ja hitaampaa kuin suorien ohutlevyosien leikkaaminen. Ajatellen plasmaleikkurin tuotteistamista kannattaisi jyrstittäviä osia korvata ohutlevyosilla. Näin osien hankintakulut olisivat pienemmät, valmistus nopeampaa ja lopullisesta tuotteesta saataisiin mahdollisesti tehtyä myyntihinnaltaan edullisempi tai tuotteelle parempi kate.

Suurimmat voimat kohdistuvat vesialtaan ympärillä olevaan pääneliöön. Tämä rakenne kannattaa säilyttää hitsattuna. Ennen suunnittelutyötä tehdyn tutkimustyön yhteydessä ilmeni useita tapauksia, joissa vastaavan tyyppisiä runkorakenteita oli toteutettu käyttäen pelkästään pulttiliitoksia. Monissa projektikertomuksissa kerrottiin, kuinka

pelkillä pulttiliitoksilla kootut rungot eivät pysyneet mitoissaan aiheuttaen vääristymiä polttimen liikeratoihin.

7.3 Y-akselin kelkan värähtely

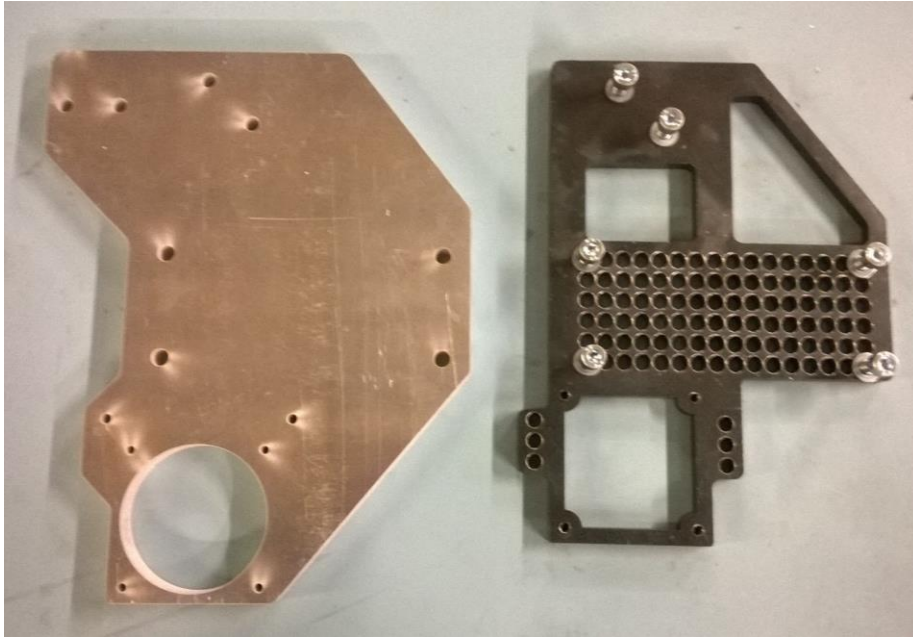
Y-akselin kelkka toteutettiin kokonaan teräksestä. Havaittiin, että kelkka oli painava ja aiheutti ongelmia erilaisten värinöiden ja värähtelyjen muodossa. Yksipuolisen voimansiirron ansiosta kaikki kelkkaa siirtävät voimat kohdistuivat kelkan vasempaan pätyyn [Kuva 37]. Y-akselin suuntaisen teräspalkin massa aiheutti kelkan vasemmanpuoleisen päädyn taipumista, mikä ilmeni palkin edestakaisena värähtelynä. Kelkan kokonaispaino teräksestä valmistettuna, mukaanlukien askelmoottorit ja muu kelkkaan liitetty mekaniikka, on noin 27.0 kg. Korvaamalla Y-akselin suuntaisen palkin ja oikeanpuoleisen kelkan päädyn alumiinista valmistetuilla osilla, olisi kelkan kokonaispaino jo noin 10.0 kg kevyempi.



Kuva 37. Y-akselin kelkan päätylevy.

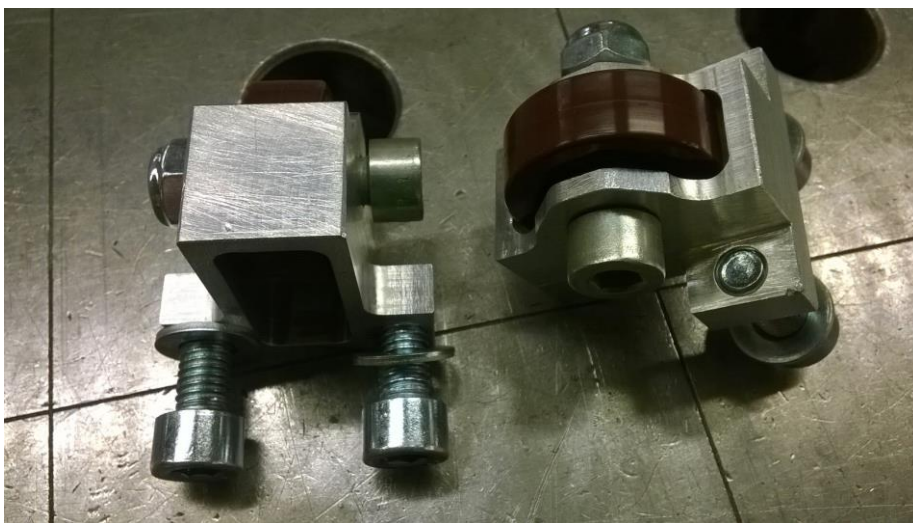
Päädyn taipumista ja Y-akselin kelkan värähtelyä voi kevyemmän rakenteen lisäksi tukevoittaa lisäämällä päädyn ja poikittaispalkin välille tukirakenteet. Värähtelyjen minimoimiseksi kelkan rakenteen tulisi ylhäältäpäin katsottuna olla kolmiomainen. Kolmiomaisuus rajoittaisi X-akselin suuntaista liikettä, koska kelkan päädyistä on tehtävä X-akselin suunnassa pidempi, jotta Y-akselin rakenteesta saadaan riittävän tukeva. Kelkan pääty suunniteltiin ja valmistettiin uudestaan jo projektin aikana. Uusi

pääty valmistettiin 15.0 mm:n paksuisesta alumiinista, josta poistettiin ylimääräiset reiät [Kuva 38]. Tämä paransi päädyn vääntöjäykkyyttä merkittävästi.



Kuva 38. Alumiinista ja teräksestä valmistetut kelkan päädyt.

Kelkan värähtelyn ja vääntymistä yritettiin estää oikean puoleisen päädyn yhteyteen asennettavilla ohjainpyörillä [Kuva 39]. Ohjainpyörät suunniteltiin estämään kelkan taipumista. X-akselin suuntaisten runkoprofiilien keskenäinen heitto samansuuntaisuudessa esti kiinteiden ohjainpyörien käytön. Jotta ohjainpyöriä olisi voinut käyttää olisi niiden pitänyt olla jousikuormitteiset.



Kuva 39. Oikean päätylevyn yhteyteen asennettavat ohjainpyörät.

7.4 Termisesti leikattujen osien muodonmuutos

Laserleikattujen osien, kuten Y-akselin kelkan päätyjen, havaittiin termisen leikkauksen jälkeen olevan kieroja. Kelkan päätyjen osalta tämä ilmeni kuulajohteen takkuilevana liikkeenä. Kuulajohteen takkuileva liike johtui kieron päätylevyn aiheuttamasta, kuulajohteen vaunuun kohdistuneesta väännöstä. Kun kelkan päädyn ja lineaarijohteen välisiä kiinnityspultteja löysättiin alkoi kuulajohde liikkua jouhevammin.

Teräksestä valmistetut laserleikatut osat tulisi teräksen sijaan valmistaa alumiinista. Laserleikkauksen sijaan kannattaisi käyttää vesileikkausta, jolloin välttyttäisiin lämmön aiheuttamilta muodonmuutoksilta.

8 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa CNC-plasmaleikkuri. Oli selkeää, että hitsauslaboratoriolla oli tarve modernille termiselle leikkausmenetelmälle. Laitteen suoraviivaista käytettävyyttä ja luotettavaa toimintaa pidettiin tärkeinä kriteereinä. Työn suunnitteluosuudessa perehdyttiin markkinoilla oleviin kaupallisiin tuotteisiin ja harrastajien valmistamiin koneisiin. Suunnittelujakson päätteeksi plasmaleikkurista oli tehty useampi versio, joista viimeisintä versiota lähdettiin toteuttamaan. Leikkurin rakennetta ja käyttöä mietittiin yhdessä hitsauslaboratorion projekti-insinöörin, Joel Kontturin, kanssa.

Rungon kokoonpanotyön aikana kohtasimme ensimmäiset todelliset haasteet hitsattujen rakenteiden kanssa. Vaikka pyrimme ennakoimaan lämmön aiheuttamia muodonmuutoksia teräsrakenteissa, emme onnistuneet välttymään niiltä täysin. Muodonmuutoksia jouduttiin oikomaan ja samalla heräsi useampi ajatus hitsausliitoksien korvaamisesta pultiliitoksilla. Toinen ongelma-alue oli Y-akselin kelkan voimansiirron toteutus. Voimansiirron puuttuminen kelkan oikealta puolelta asetti kelkan rakenteelle selkeästi suuremmat jäykkyyksivaatimukset, kuin mitä olin olettanut.

Sähkökaapin kokoonpano onnistui hyvin. Benezan-Electronics toimitti hyvän kytkentäkaavion, jonka avulla ohjauslogiikan komponenttien kytkeminen onnistui helposti. Lisäksi sain heiltä arvokkaita vinkkejä projektin edistymisen kannalta.

Hitsauslaboratoriossa lattiapinta-ala on hyvin rajallinen. Siksi suuren tietokonekaapin hankkiminen ohjaustietokonetta varten tuntui tilan haaskaukselta. Ensimmäisten ajojen yhteydessä tietokone oli pulpetin päällä. Laboratoriossa tehtävistä töistä aiheutuu pölyä ja likaa, joka ei ole hyväksi tietokoneelle ja siksi se pitäisi koteloida mahdollisimman pian. Suunnitelmissa on rakentaa kompakti, renkailla varustettu, tietokonekaappi [Kuva 40], joka sisältäisi myös plasmaleikkurin ohjauselektroniikan komponentit.



Kuva 40. Hahmotelma tietokone- ja sähkökaapin yhdistelmästä.

Projektin kokonaiskustannukset olivat hieman odotettua kalliimmat [Liite 3]. Monien komponenttien osalta päädyttiin edullisimman vaihtoehdon sijaan hankkimaan laadukkampia ja pitkäikäisempiä tuotteita, jotka olivat myös hinnaltaan kalliimpia. Järjestelmän kalleimmat komponentit olivat plasmavirtalähde ja vesiallas, joidenka osalta voisi säästää tuhansia euroja valitsemalla edullisemmat vaihtoehdot.

On muistettava, että tähän projektiin lähdettiin täysin puhtaalta pöydältä. Tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa mahdollisesti tuotteistettavan plasmaleikkurin prototyyppi. Prototyypin rakennusprojektin aikana kävi ilmi monia asioita, joissa on mahdollista säästää valmistuskustannuksissa. Lisäksi kävi ilmi asioita, jotka kannattaa tehdä selkeästi toisenlaisella valmistusmenetelmällä. Vaikka plasmaleikkurin ensimmäinen prototyyppi saatiin rakennettua, ei tämä tarkoita, että leikkurin prototyyppi olisi vielä valmis. Leikkurin kehitystyö tulee jatkumaan ja sen eri osa-alueita tullaan parantamaan yksi asia kerrallaan. Suunnittelu- ja rakennustyön ohella ei ollut aikaa miettiä leikkurin tuotteistamista. Tuotteistaminen, markkinointistrategia, käyttöohjeet ja ohjaustietokoneen kaappi ovat asioita, joiden kehitys jatkuu tämän insinööriyön jälkeen.

Lähteet

- 1 Plasma CAM [WWW-sivu]. Saatavissa: <https://www.apexauctions.com/static/resources/Auctioneer_139/Auction_1098/lot_id_114943/LotImage_260935.jpg>. [Viittauspäivä 6.1.2015.]
- 2 Torchmate [WWW-sivu]. Saatavissa: <<http://utvweekly.com/wp-content/uploads/2011/04/torchmate2x4.gif>>. [Viittauspäivä 6.1.2015.]
- 3 Plasma [WWW-sivu]. Päivitetty 9.9.2014. Saatavissa: <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Plasma>>. [Viittauspäivä 6.1.2015.]
- 4 Plasma Physics, Richard Fitzpatrick 2011-03-31. The University of Texas Austin [www-sivu]. Saatavissa: <<http://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/Plasmahtml/node3.html>>. [Viittauspäivä 6.1.2015.]
- 5 Matilainen Jorma, Parviainen Miikka, Havas Taru, Hiitelä Erja, Hultin Sami. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja. 2011. Teknologiateollisuus Ry.
- 6 Projektikertomus [WWW-sivu]. Saatavissa <http://s122.photobucket.com/user/bigtoy302/media/IMG_0096.jpg.html>. [Viittauspäivä 22.2.2015.]
- 7 Dynatorch, plasmaleikkurivalmistaja [WWW-sivu]. Saatavissa: <http://dynatorch.com/Hyp_Cut_Speed.htm>. [Viittauspäivä 9.2.2015.]
- 8 Rollco, lineaarijohteet [WWW-sivu]. Saatavissa <<http://rollco.se/uk/wp-content/uploads/2012/07/Linear-rail1.gif>>. [Viittauspäivä 15.2.2015.]
- 9 Lepola Pertti & Makkonen Matti. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. 2011. WSOY.
- 10 Tollok, kiinnitysholkit [WWW-sivu]. Saatavissa <<http://www.tollok.com/Famiglia.asp?FAM=TLK110>>. [Viittauspäivä 11.2.2015.]
- 11 Benezan-electronics [PDF]. Saatavissa: <<http://www.benezan-electronics.de/manuals/breakout4-en.pdf>> [Viittauspäivä: 24.1.2015.]
- 12 Benezan-Electronics [WWW-sivu]. Saatavissa: <<http://benezan-electronics.de/shop/images/Breakout4.JPG>> [Viittauspäivä: 13.1.2015.]
- 13 Linux.fi [WWW-sivu]. Saatavissa: <http://linux.fi/wiki/GNU_GPL>. [Viittauspäivä 24.1.2015.]

- 14 SheetCAM, CAM ohjelmisto [WWW-sivu]. Saatavissa: <<http://www.sheetcam.com/Register/purchase>>. [Viittauspäivä: 22.2.2015.]
- 15 Micro-Machine-Shop, mikrokytkin [WWW-sivu]. Saatavissa <http://www.micro-machine-shop.com/Taig_CNC_Z_limit_5.jpg>. [Viittauspäivä 18.2.2015.]
- 16 Damen CNC, induktiivinen anturi [WWW-sivu]. Saatavissa <<https://www.damencnc.com/images/products/fullsize/sensormount.JPG>>. [Viittauspäivä 18.2.2015.]
- 17 Proma Elektronika [WWW-sivu]. Saatavissa: <<http://proma-elektronika.com/index.php/en/products/thc-torch-height-control/compact-thc-sd>>. [Viittauspäivä 7.1.2015.]

HS86-5880–askelmootorin ominaisuudet

Benezan Electronics
Hard- und Softwareentwicklung

Produktkatalog
Hybrid-Schrittmotoren

HS86-5880-03

Allgemeine Eigenschaften

- 2-Phasen Hybrid-Schrittmotor, bipolare Wicklung (4-Drahtanschluss)
- Optimiert für Microschrittbetrieb und geringe Vibrationen
- Neodym-Magnete für hohes Drehmoment und lange Lebensdauer
- mit XLR4-Stecker an kurzem Kabel (0,3m) mit Knickschutz
- RoHS konform, frei von Blei und Cadmium
- mit zweitem Wellenende

Technische Daten

Parameter	min	typ	max	Einheit
Schrittwinkel (Vollschritt)		1,8		°
Positioniergenauigkeit (Vollschritt)			5	%
Betriebstemperatur (Rotor, Stator, Lager)	-20		+80	°C
Wicklungstemperatur (kurzzeitig)			+130	°C
Isolationsspannung			500	V (DC)
Gewicht (ohne Kabel)		4,0		kg
Rotorträgheitsmoment		3200		gcm ²
Nennstrom / Phase		8,0		A
Haltemoment (Microschrittbetrieb)	5,22	5,8		Nm
max. Haltemoment (2 Phasen bestromt)		8,2		Nm
Wicklungswiderstand / Phase	0,38	0,42	0,46	Ω
Nennspannung / Phase		3,36		V
Induktivität / Phase	3,0	3,7	4,4	mH
zulässige Lagerbelastung radial			600	N
zulässige Lagerbelastung axial			30	N
Kabelquerschnitt / Ader		0,75		mm ²
Kabel Aussendurchmesser		6,5		mm

Anschlussbelegung

Pin Nr.	Belegung
1	Wicklung 1
2	
3	Wicklung 2
4	

Stecker: Neutrik XLR4 oder kompatibel

HS60-2150–askelmoottorin ominaisuudet

Benezan Electronics
Hard- und Softwareentwicklung

Produktkatalog
Hybrid-Schrittmotoren

HS60-2150-03

Allgemeine Eigenschaften

- 2-Phasen Hybrid-Schrittmotor, bipolare Wicklung (4-Drahtanschluss)
- Optimiert für Microschrittbetrieb und geringe Vibrationen
- Neodym-Magnete für hohes Drehmoment und lange Lebensdauer
- mit XLR4-Stecker an kurzem Kabel (0,3m) mit Knickschutz
- RoHS konform, frei von Blei und Cadmium

Technische Daten

Parameter	min	typ	max	Einheit
Schrittwinkel (Vollschritt)		1,8		°
Positioniergenauigkeit (Vollschritt)			5	%
Betriebstemperatur (Rotor, Stator, Lager)	-20		+80	°C
Wicklungstemperatur (kurzzeitig)			+130	°C
Isolationsspannung			500	V (DC)
Gewicht (ohne Kabel)		1,35		kg
Rotorträgheitsmoment		840		gcm ²
Nennstrom / Phase		5,0		A
Haltemoment (Microschrittbetrieb)	1,7	2,1		Nm
max. Haltemoment (2 Phasen bestromt)		3,0		Nm
Wicklungswiderstand / Phase		0,52		Ω
Nennspannung / Phase		2,6		V
Induktivität / Phase	1,6	2,0	2,4	mH
zulässige Lagerbelastung radial			400	N
zulässige Lagerbelastung axial			25	N
Kabelquerschnitt / Ader		0,5		mm ²
Kabel Aussendurchmesser		5,5		mm

Anschlussbelegung

Pin Nr.	Belegung
1	Wicklung 1
2	
3	Wicklung 2
4	

Stecker: Neutrik XLR4 oder kompatibel

Projektin toteutuneet kulut

Hankinta	Valmistaja	Toimittaja	Määrä	Kokonaishinta (€)
Allas (316) ja lamellit (Fe)	Teräsmiehet	Teräsmiehet	1	1229
Askelmootorit, Breakout, Virtalähteet	Benezan electronics	Benezan electronics	1	1082
Hana ja viemärlähtö		Onninen	1	16
Hätäseiskeytkin		SLO	1	64
Hihnapyörät, hihnat, kiinnitysholkit ja Z-akselin lineaarijohde	Hiwin	Mekanex	1	510
Johteiden kiinnitysreikien koneistus	Osateos		1	360
Kelkan päädyt	Teräsmiehet		1	55
Konelaakerit	SKF	Fixus	20	100
Ohjuri pyörät	Blickle	Blickle	2	43
Plasmavirtalähde ja kulutusosat	Hyperterm	Teknohaus	1	6918
Polttimen korkeuden säädin (THC)	Proma	Ebay	1	247
Sähköjohdot		Onninen	1	125
Teräsprofiilit sis. toimitus	Ruukki		1	420
X- ja Y-akselin lineaarijohteet	Rollco	Rollco	2	247
X-akselin laakerijohde särmäys	Aristeel		1	62
X-akselin lineaariyksikkö	Rollco	Rollco	1	474
Y- ja Z-akselien moottori kiinnikkeet	Teräsmiehet		1	102
				12054