



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Masinaehituse instituut
Tootearenduse õppetool

MES70LT

Taavi Arus

Multifunktsionaalse CNC lõikepingi projekteerimine

Autor taotleb tehnikateaduste magistri akadeemilist kraadi

Tallinn 2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud. Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”2015 a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....”2015 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”2015 a.

..... allkiri

TTÜ masinaehituse instituut
Tootearenduse õppetool

Magistritöö ülesanne

2012/2013 õppeaasta kevadsemester

Üliõpilane: Taavi Arus, 132399MATM
Õppekava: MATM02/09 - Tootearendus ja tootmistehnika
Eriala :Tootearendus
Juhendaja: Toivo Tähemaa

MAGISTRITÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Multifunktsionaalse CNC lõikepingi projekteerimine.

(inglise keeles) Design of a multifunctional CNC cutting bench.

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr.	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Uurimustöö tegemine	14.03.2015
2.	Kontseptsiooni loomine	15.04.2015
3.	Komponentide valik	20.04.2015
4.	Projekteerimine	05.05.2015
5.	Vormistamine	24.05.2015

Lahendatavad insenertehnilised probleemid: CNC lõikepingi disainimine ning projekteerimine, komponentide valik ning insenertehniliste arvutuste teostamine.

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaoetus esitada hiljemalt 12.05.2015 **Töö esitamise tähtaeg:** 25.05.2015

Üliõpilane:...../allkiri/.....kuupäev.....

Juhendaja:...../allkiri/.....kuupäev.....

Sisukord

Magistritöö ülesanne	3
Eessõna	6
1.SISSEJUHATUS	7
1.1 CNC lõikepingid, ajalugu ja liigid	8
1.3 Lõikemeetodid	11
1.3.1 Plasmalõikus	11
1.3.2 Freesimine ja lõiketöötusel esinevad jõud	12
1.3.3 Freesimise ning plasmalõikuse kombineerimine ühes masinas	14
1.4 CNC kasutus kesk- ja väikeettevõttes ning masina sihtgrupp	15
1.5 Turu-uuring.....	17
1.6 Masina nõuded.....	18
2.PINGI PROJEKTEERIMINE	19
2.1 Lõikepingi spetsifikatsioon	19
2.2 CNC lõikepinkide geomeetria ja ehitus.....	21
2.2.1 Statsionaarse portaaliga CNC lõikepink	22
2.2.2 Liikuva portaaliga CNC lõikepink	23
2.2.3 Disaini valik.....	24
2.3 CNC Lõikepingi lihtsustatud kinemaatikaskeem	25
2.4 Lõikepingi konstruktsioonimaterjali valik	26
2.4.1 Materjali jäikus- ja tugevusnäitajad.....	26
2.4.2 Materjali valik kasutades CES selectorit	27
2.5 Jõuülekanne valik	30
2.5.1 Keermelatt	30
2.5.2 Kuulkruvi.....	31
2.5.3 Hammaslatt ja hammasratas ülekanne.....	32
2.5.4 Rihmülekanne	33
2.5.5 Jõuülekanne valik	34
2.5.6 Kuulkruvi valik.....	35
2.6 Mootorid	36
2.6.1 Samm- mootori ehitus ja tööpõhimõte	36
2.6.2 Servomootorite tööpõhimõte	37
2.6.3 Mootori valik	40
2.7 Laagrite valik.....	40

2.8 Plasmalõikuri valik	41
2.9 Spindli valik.....	42
2.10 Kontseptsiooni lahendus. CAD mudel	43
2.10.1 Pingi raam.....	43
2.10.2 Pingi tugijalad.....	43
2.10.3 X-telg ning selle ehitus.	44
2.10.4 Y-telg ning selle ehtius.	44
2.10.5 Z-telg ning selle ehtius.	44
2.10.6 Universaalne tööriistahoidja.	45
2.10.7 Limiitlülid ehk telgede piirdelülid	45
2.10.8 Plasma ja freesimise töölaud	45
2.11 Elektroonikakomponendid ning juhtseadmed	57
2.11.1 Kontroller	57
2.11.2 Stepper mootorid	58
2.11.3 Süsteemi toide	59
2.11.3 Ümberlülitusplaat	60
2.11.4 Jahutus	61
2.11.5 Juhtprogramm	61
2.11.6 Ühendusskeem.....	62
2.12 Lõikepingi maksumus	63
3.ARVUTUSED	65
3.1 Laagrite elueaarvutus.....	65
3.2 Stepper- mootorite kontrollarvutus.....	67
3.3Tugevusarvutused	68
3.3.1 Tugijalgade arvutus	68
3.3.2 Lõikelemendi kandja deformatsioon	70
3.3.3 Raami tugevusarvutus	76
Kokkuvõte	80
Abstract.....	81
Kasutatud kirjandus	82
LISA 1. TEHNILISED JOONISED	83
LISA 2. ARVUTIRENDERDUSED LÕIKEPINGIST	84

Eessõna

Lõputöö algupärane teema idee pärineb juhendaja Toivo Täheamalt. Autor soovib tänada järgmisi inimesi, kes aitasid lõputöö valmimisele kaasa:

Toivo Tähemaa ja Anti Pääro

1.SISSEJUHATUS

Tänapäevased arvjuhtimisega tööpingid on mehhatroonikasüsteemid, kus mehaanilised, elektroonilised ja infotehnoloogilised alamsüsteemid tagavad koostöömisel efektiivse terviku, mis väljendub nõuetekohase toote valmimises. Tänapäeval ei piirdu pingioperaatori oskused ja teadmised materjalide, lõikeriistade, seadmete ja tootmistehnoloogia tundmisega, vaid tundma peab ka arvprogrammjuhtimisega seadmele juhtprogrammi koostamist, sisestamist ja vajadusel ka muutmist [1,10]

Arvprogrammjuhitavad ehk teisisõnu CNC (*computer numerical control*) on arvutiga masin tööriistade kontrollimise viis. Selle meetodi abil saavad ettevõtted väikese ajakuluga lõigata välja keerulisi detaile, mis on eelnevalt valmis programmeeritud. Kuna programm on taaskasutatav, siis võimaldavad need masinad pidevalt toota samu detaile suure täpsusega. Meetod on kasutusel juba varastest 1970-ndatest, kuna tol ajal hakkasid paralleelselt ilmuma ka esimesed mikroprotsessorid. Meetod on tänu oma täpsusele ning kiirusele loonud revolutsiooni erinevates suur- ja väiketööstustes. CNCd võib pidada ka varajaseks *rapidprototypinguks* või selle eelkäiaiks.

Antud lõputöö eesmärk on projekteerida ja kavandada hübriid CNC lõikepink ehk CNC lõikepink mis on multifunktsionaalne võimaldades teostada freesimist ning ka plasmalõikust ühe ainsa pingiga. Hetkel on turul hulgaliselt CNC pinke, millel on vaid kindel funktsioon: mitte-ferritsete materjalide freesimine; plasma-, laser- ja vesilõikus; graveerimine; ferritsete materjalide freesimine.

Kavandatav lõikepink on võimeline teostama mitte-ferritsete materjalide freesimist, graveerimist ning terase plasmalõikust. Lõikepingi sihtgrupiks on kesk- ja väikeettevõtted ning ka üksikisikutest asjaarmastajad.

1.1 CNC lõikepingid, ajalugu ja liigid.

Esimesed automatiseeritud masinad ilmusid 19. sajandil hammas- ja nukkmehhanismide arenguga. Nende mehhanismide arenguga ja kasutuselevõtuga sündisid kontuuri kopeerivad puutöötlusmasinad ning ka esimesed revolver-padrungpingid. Nende seadete areng jõudis oma haripunkti Esimese maailmasõja alguseks. Hammas- ja nukkmehhanismidel põhinevate masinate puuduseks oli nende programmeerimise mittepaindlikkus. Neid polnud võimalik abstraktselt programmeerida, teisisõnu programmi kirjutamiseks tuli ka ümber töötada ja valmistada uus nuk- ja hammassüsteem. [7]

Numbrilise juhtimisega (*NC – numerical control*) masintööriistad loodi kontuur masinlõikuseks. Vajadus selle järgi oli lennukitööstuses, kuna nende tootmismahud ning detailid olid võrreldes tavapärase tööstusega tunduvalt suuremad ja keerulisemad. Esimese generatsiooni NC masinad loodi ettevõtte Parsons ja MIT vahelisel koostööl aastal 1952. Masinad olid modifitseeritud tööriistad, mis olid ühendatud mootorite ja juhstetadmetega. Juhtimine toimus perfolindi kaudu. Tänapäeval on automatiseeritud enamuse pingid. Eesti keeles on kasutusel nii väljendid „numbriline juhtimine“, kui ka „arvjuhtimine“. Laiemat kasutust on leidnud arvjuhtimine. Inglise keeles *Numerical Control* ja lühendiks NC.[7,10,1]

Arvjuhitavad pingid võimaldasid keeruliste kujupindadega detaile luua, kuna universaalpinkidel puudus võime nihutada lõikeinstrumenti korraka kolme või ka enama telje suunas. Detailide mõõtmete kõikumine vähenes oluliselt ning täpsus paranes. [1,10]

Arvjuhtimisega seadmete arenguetapid:

- 1950 – 1960-ndad. Esimesteks seadmeteks olid puur ja freespingid. Programmid töötasid vahetu juhtimisega, mälu puudus, süsteem oli kohmakas ning kasutaja mittesõbralik. Vajas suurt matemaatilist ettevalmistust. Juhtseadmeteks olid pooljuhtelemendid. Põhiline kasutajaskond oli lennukitööstus.
- 1960 – 1970-ndad. Tulid kasutusel prefolindid. Programm oli käsitsi ettevalmistatud. Kodeerimisseadme abil kanti see prefolindile, mida luges pingi juhtseade. Arendati välja eriotstarbega APJ pinke. Puudusteks aeglane programmi ettevalmistamine ning lindi kulumine.
- 1970 – 1980-ndad. Tänu mikroprotsessorite arengule ja levikule, tulid kasutusel esimesed CNC pingid. CNC – *Computerized Numerical Control*. Mikroprotsessorid

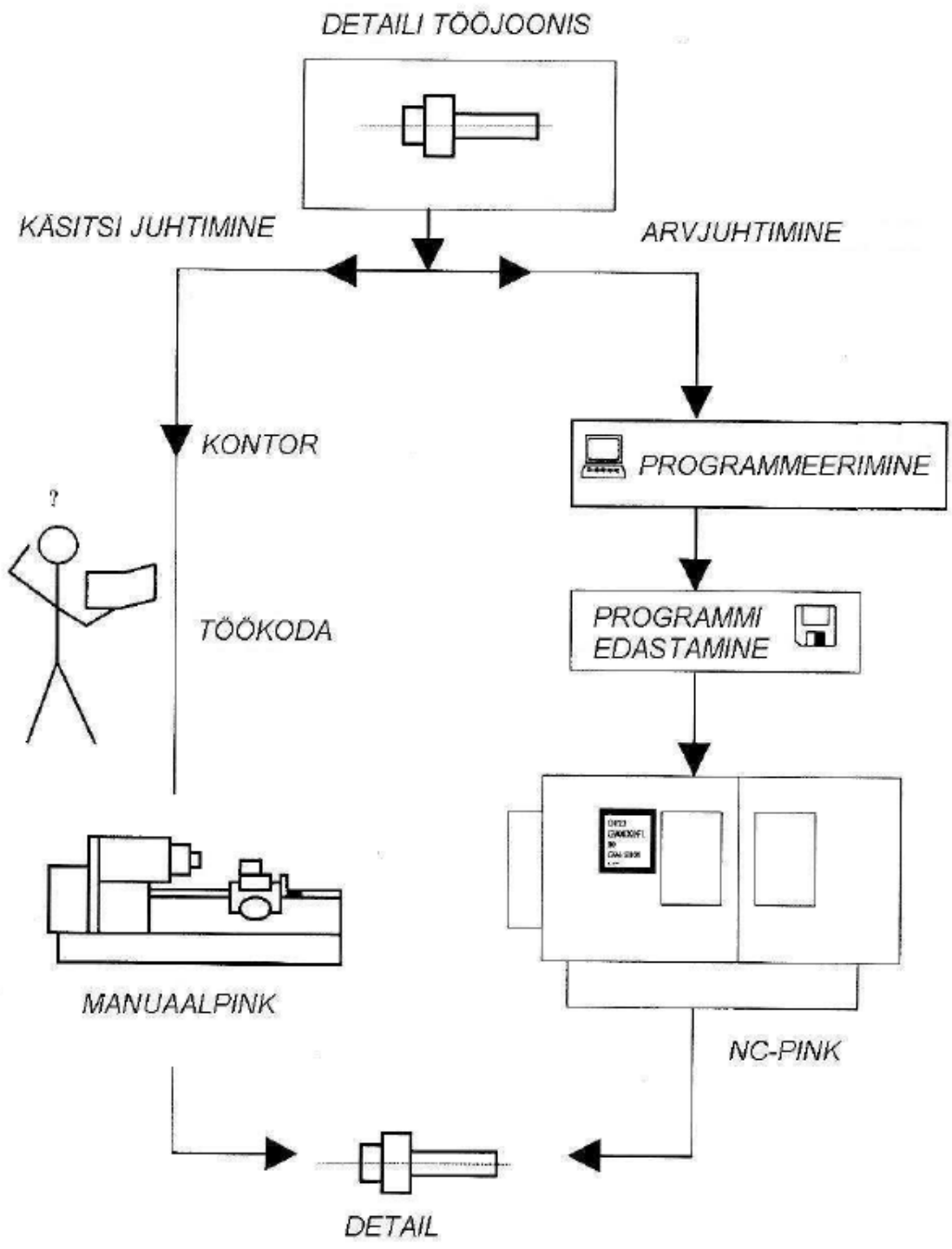
revolutsioneerisid pinkide juhtsüsteemide arengu. Tänu sellele sai arvuti pinkide lahutamatuks osaks. Pinkide automatiseeritustaseme kasv: toorikute, detailide ja lõikeriistade automatiseeritud vahetus. Programme oli võimalik salvestada sisemisele mälule ning neid oli võimalik lihtsalt kopeerida ja muuta.

- 1980 – 1990-ndad. CNC pinkide tippaeg. CNC pingid moodustavad raalintegreeritud tootmise aluse. Pinkide pidev täiustus. Pinke oli nüüdsest võimalik ühendada ka võrku suurema tootmise korral.
- Alates 1990-ndad. CAD/CAM programmeerimise põhjal juhtprogrammi loomine muutub standardiks.

Tänapäeval jätkatakse pinkide pidevat täiendamist nii riist-kui tarkvaraliselt. Kiiremad protsessorid võimaldavad infot kiiremini töödelda, rohkem mälu võimaldab salvestada rohkelt erinevaid juhtprogramme, detailide jooniseid ning ka materjalide ja tööriistade andmebaase. Kaasaegsete pinkidega integreeritakse ka toorikute ja detailide transpordisüsteemid, lõikeriistaload ning nende programmijärgne vahetus võimaldavad paindtootismoodulite arengut ning pikaajalist töötlust autonoomsel režiimil.[10,7]

Viimane trend CNC tööstuses on intelligentsuse lisamine masinatele. Peamiselt tähendab see erinevate andurite lisamist, mis mõõdavad pingi eri parameetreid nagu lõikejõudusi, temperatuuri, vibratsioone, helitugevust. Nende andmete põhjal luuakse matemaatilised mudelid, mis teevad masina töökäigus korrekture ning kohandavad lõikeparameetreid ja tingimusi sõltuvalt vajadusele [1].

Arvjuhtimist kasutatakse nüüdisajal pea igas töötlemispingis. Tavaliseimad pingid mis CNC-d kasutavad on treipingid, freespingid, lihvpingid, puurpingid, töötlemiskeskused, painutuspingid ja muud eriotstarbelised pingid nagu lehetöötlusmasinad, erosioonpingid, koordinaatmõõtemasinad, plasmalõikuspungi, laserlõikuspingid, vesilõikuspingid jne [10].



Sele 1.1. CNC pingi tööpõhimõtte võrreldes manuaalpingiga

1.3 Lõikemeetodid

1.3.1 Plasmalõikus

Toatemperatuuril koosneb gaas tavaliselt molekulidest, välja arvatud inertgaasid, mis koosnevad aatomitest. Kui gaasi temperatuur tõuseb 2000 °C-ni, siis lagunevad molekulid aatomiteks. Kui temperatuuri tõsta kuni 3000 °C-ni, kaotab osa aatomitest elektrone ja muutub positiivselt laetud ioonideks. Sellises olekus gaasi nimetatakse plasmaks. Tavaliselt on tema tunnuseks kõrge sagedusega sädelemine [19].

Plasmakaarlõikus võeti kasutusele 1950ndatel aastatel. See meetod loodi metallide lõikamiseks mida ei saanud gaasiga lõigata nagu alumiinium, roostevaba teras ning vask. Plasmakaarlõikus kasutab negatiivselt laetud elektrit juhtivat gaasi mis kannab edasi energiat läbi lõikuri materjalini. Plasma tekib gaasi kuumutamises, mida teostatakse otsevoolu plasmageneraatori abil.[19]

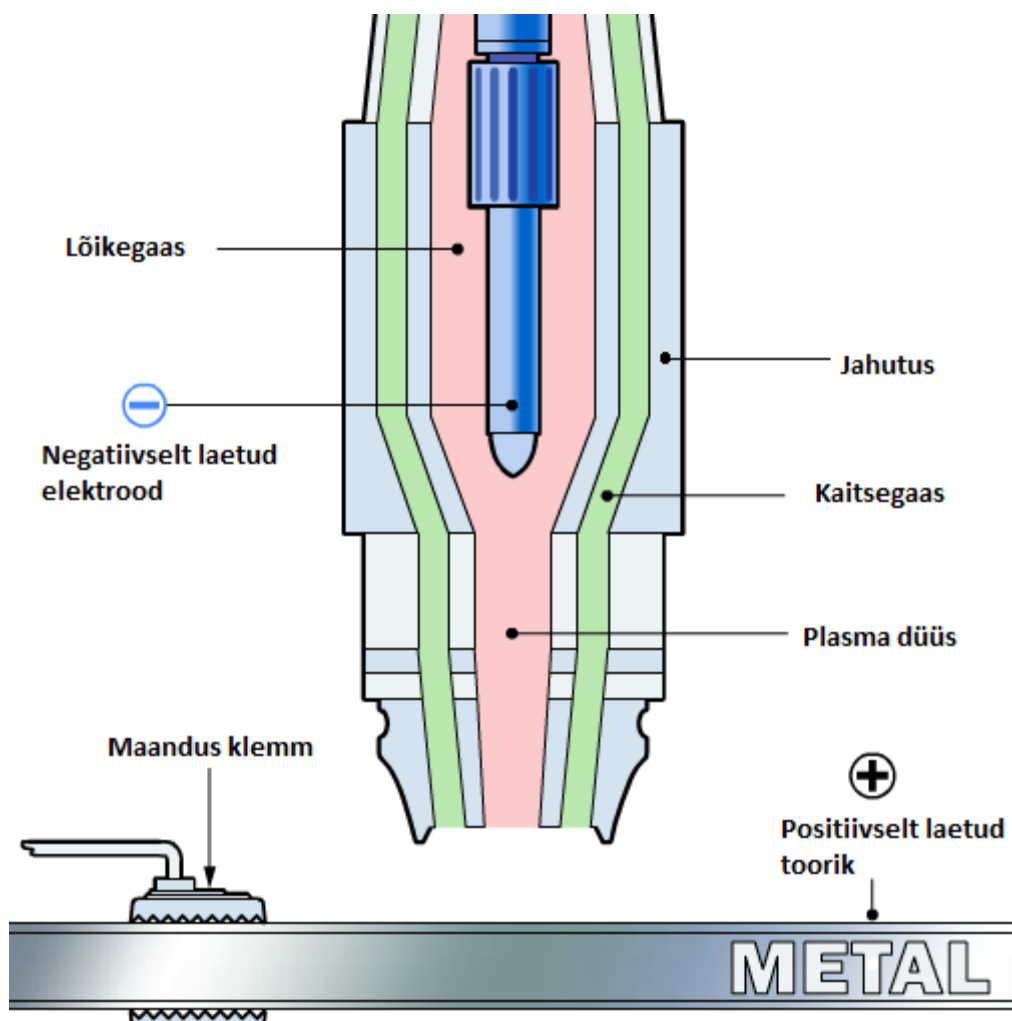
Kasutatakse kolme erinevat plasmalõike süsteemi:

1. Kaksikgaasisüsteem
2. Veejugasüsteem
3. Õhkplasmassüsteem

Antud juhul vaatame lähemalt õhkplasmassüsteemi.

Õhkplasmassüsteem on kujutatud seel 1.2. Sellise süsteemiga saab töödelda ainult elektrit juhtivaid materjale.

Plasmalõikus on tänapäeva tööstuses laialt levinud. Seda kasutatakse laialdaselt pea igas suuremas tööstusharus. Üldjuhul teostatakse tasapinnalist lõikust. Lõigatakse välja lehtmaterjalist erinevaid toorikuid, mis lähevad edasisse töötlusesse nagu painutamine ning keevitamine. Levinud on nii käsiplasmalõikus kui ka masinplasmalõikus. Masinplasmalõikus kujutab endast arvjuhtimisega kontrollitud plasmalõikamist ehk teisisõnu CNC plasmalõikust.



Sele 1.2. Õhk-plasmasüsteem.

1.3.2 Freesimine ja lõiketöötlusel esinevad jõud

Freesimine on laastueralduse baasil põhinev lõikemeetod. Lõikeriist on pöörlev ning seda nimetatakse freesiks. Freesimine võimaldab suurel hulgal erinevaid lõikemeetodeid ning režiime. Võimalik on freesida nii sooni, avasi, taskuid, nurkasi jms. Freesimine on laialt levinud CNC lõikepinkides. Freesimisega töödeldakse kõikvõimalikke materjale puidust metallideni.

Lõiketöötlusel tekivad paratamatult arvestatavad jõud, mis mõjuvad masinale kui tervikule ning masina eri komponentidele. Otseselt mõjub jõud tööriistale ning selle kandja konstruktsioonile ning telgede tugele. Mitte ferriitsete metallide nagu alumiinium sulamite lõikusel võivad tekkida üpris suured jõud. Jõudude magnituud sõltub mitmest erinevast parameetrist nagu [5]:

- Spindli pöörlemiskiirus
- Tööriista ettenihe
- Tööriista diameeter ja pikkus
- Lõike sügavus

Alumiiniumsulami 6061-T6 töötusel (lõikelaius - 2.6mm, lõikesügavus - 6.35 mm, lõikeriista diameeter 6.35mm,ööriista soonte arv 2, soonte nurk 14°) tekkivad jõud on kirjeldatud tabelites . Andmed tulenevad allikast [16]

Töötluste number	Spindli pöörlemiskiirus, p/min	Ettenihe mm/min	Jõud, N
1	1498	122,27	300
2	1495	121,93	300
3	1498	121,95	299,7
4	1497	120,9	298,5
5	1500	122,39	300
6	1498	122,03	298
7	1499	122,29	300
8	1498	122,03	299,7
9	1499	122,1	299,7
10	1500	122,24	299

Tabel 1.1. Alumiiniumsulami lõiketöötusel tekkivad jõud

Muutes lõikeparameetreid, mitte optimaalseteks saame aga hoopis erinevaid tulemusi.

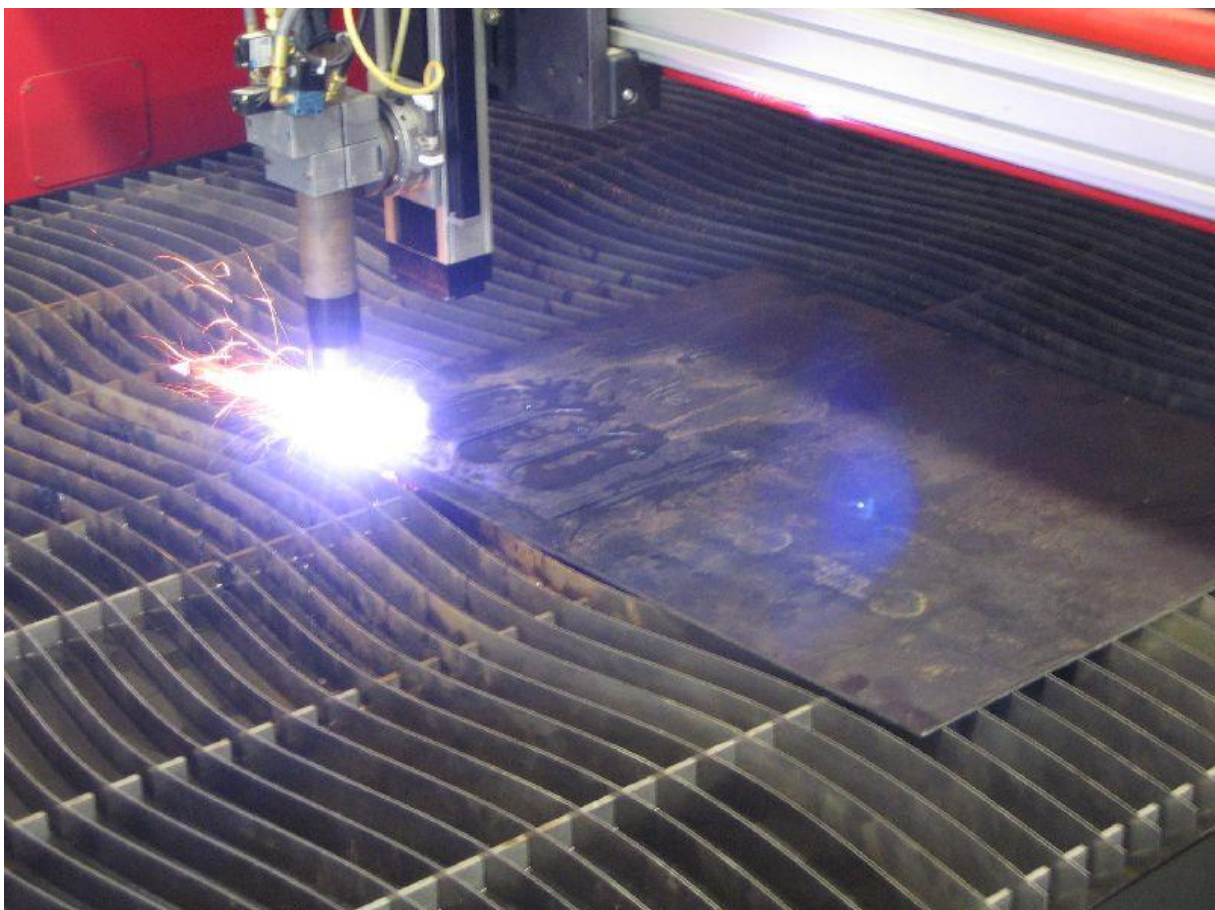
Immersioon	Spindli pöörlemiskiirus, p/min	Ettenihe, mm/min	Jõud, N
1	800	100	481
0,75	800	100	401
0,50	800	100	347
0,25	800	100	195,7

Tabel 1.2 . Alumiiniumi lõiketöötlus kasutades mitteoptimaalseid lõikeparameetreid

1.3.3 Freesimise ning plasmalõikuse kombineerimine ühes masinas

Freesimine ning plasmalõikamine on erinevad lõike meetodid. Freesimist võib teostada nii 2- teljeliselt kui ka 3- teljeliselt. Plasmalõikust teostatakse üldjuhul tasapinnaliselt ehk 2- teljeliselt. Kuna plasmalõikus nõuab suuri liikumiskiirusi ning freesimisel tekivad erinevad jõud, siis tuleb luua masin mis suudab pakkuda piisavalt häid tugevusomadusi ning teljesuunalisi kiirusi, et tagada masina töövõime mõlema lõiketöötlusmeetodiga. Masina konstruktsioon peab olema jäik ning piisavalt tugev, et tagada freesimisest tulenevate jõudude ning momentidega toimetulek.

Plasmalõikuse tarbeks on vaja töölauda, mis toetaks materjali kuid laseks jääkidel ja sädemetel vabalt maha langeda. Tavaliselt kasutatakse plasmalõike tarbeks õhukeseseinalisi teras-riibi laudu.



Sele 1.3. CNC plasmalõikus

1.4 CNC kasutus kesk- ja väikeettevõttes ning masina sihtgrupp

CNC masinad pakuvad kesk- ja väikeettevõtetele mitmeid erinevaid eeliseid. Ettevõtte tegevus muutub efektiivsemaks ning tootmismahud kasvavad kasutades selleks senisest vähem inimressurssi. Kasutades CAD/CAM (*Computer Aided Desig/Computer Aided Manufacturing*) tööriistu toodete loomisel saavutatakse senisest efektiivsem materjalide haldus ning kulude kokkuhoid. Samuti kasvab tänu CNC kasutusele ka toodete täpsus ning kvaliteet. CNC masinad võimaldavad ettevõtetel senisest lihtsamini seeriatootmist teostada.

Projekteeritava masina põhiline sihtgrupp on SME (*small medium enterprises*) ehk väikese ja keskmise suurusega ettevõtted. VKE alla kuuluvad: mikro-ettevõtted (1-10 töötajat); väike-ettevõtted (10-50 töötajat); kesk-ettevõtted (50-250 töötajat)[9]. Ülevaade Euroopa ettevõtetest on tabelis 1.1 ja seel 1.4.

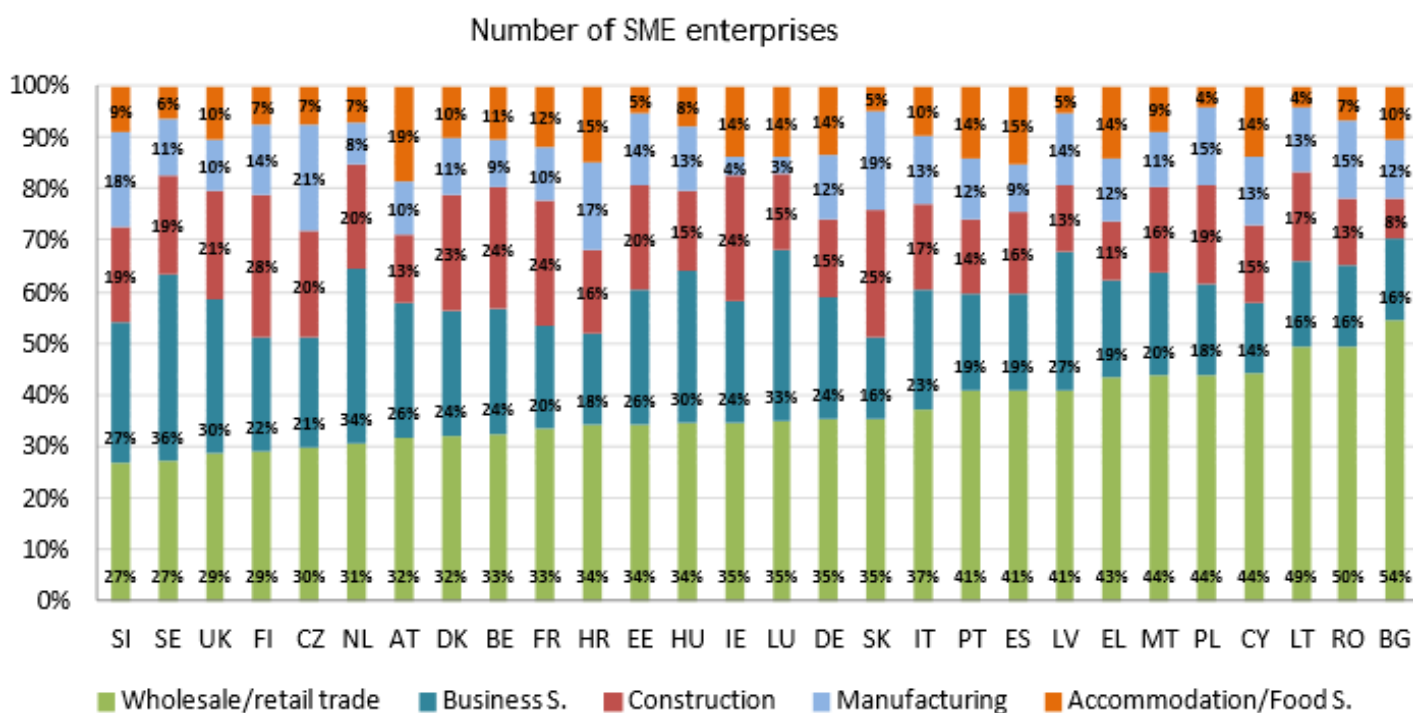
Põhinedes 2014 aasta Euroopa SME raporti andmetel on Euroopas 19 969 338 mikro-, 1 378 374 väike- ja 223 648 keskettevõtet . Kokku tegeleb neist tootmisega keskmiselt 12,25% (Eestis 14%). Tootmisega tegelevate ettevõtete tehnoloogiline tase varieerub. 2006 aasta andmete põhjal on ligikaudne CNC masinate kasutus ettevõtetes: mikro 12.5% , väike 38% ja kesk 62.5%.[9,2] Antud andmete põhjal on võimalik teha mõningaid prognoose ning arvutusi turusuuruse kohta. Kuna CNC kasutuse andmed pärinevad aastast 2006, siis pole antud prognoos päris täpne. Võib väita, et tänavapäeval on CNC kasutus suurem tänu tehnoloogia arengule, odavnemisele ja üldisele CNC populariseerumisele tööstuses. Turu suuruse ligikaudne hinnang on tabelis 1.3.

	Micro	Small	Medium	SMEs	Large	Total
Number of enterprises						
Number	19,969,338	1,378,374	223,648	21,571,360	43,517	21,614,908
%	92.4%	6.4%	1.0%	99.8%	0.2%	100%
Employment						
Number	38,629,012	27,353,660	22,860,792	88,843,464	44,053,576	132,897,040
%	29.1%	20.6%	17.2%	66.9%	33.1%	100%

Tabel 1.3. Euroopa sisene VKE ettevõtete arv (2014)

Value Activity	Information Technology	All SME (1-500)	Micro Firms (1-10)	Small Firms (11-100)	Medium Firms (101-500)
Inbound Logistics	Supply Chain Management	23.70%	25.0%	25.3%	18.80%
	Supplier Management	33.33%	12.5%	38.0%	37.50%
Operations	Materials Management	60.74%	29.2%	62.0%	81.25%
	Production Planning	57.78%	25.0%	55.7%	87.50%
	Computer Numerical Control	39.30%	12.5%	38.0%	62.50%
	Computer Aided Manufacturing	37.78%	20.8%	36.7%	53.13%

Tabel 1.4. CNC, CAD,CAM osakaal ettevõtetes



Sele 1.4. Tootmisega tegelevate ettevõtete kontsentratsioon eri riikides.

Ettevõtte tüüp	Mikro	Väike	Keskmine
Ettevõtete arv	19 969 338	1 378 374	223 648
Tootmisega tegelevad ettevõtted (12,25%)	2 446 244	168851	27397
CNC kasutus tootmisega ettevõtetes	12,5%	38%	62,5%
	305 780	21 106	3425
CNC-d kasutavaid ettevõtteid kokku			330 311

Tabel 1.5. Turumahu ligikaudne hinnang.

1.5 Turu-uuring

Hetkel on turul saadaval hulgaliselt erinevaid CNC lõikepinke mis on mõeldud ainult spetsiifiliselt kas freesimise (laastu eemaldav lõiketöötlus) või plasma/laserlõike tarbeks. Multifunktsionaalseid lõikepinke on turul hetkel ühe tootja poolt.

Tegemist on Saksamaa tootja XYZ lõiketeljelise pingiga Raptor X-SL. Pingi töötusala on 3500 x 2200 mm ning töötuskõrgus 600 mm. Pingi juhitakse 4 kanalilise kontrolleri (neljanda telje lisamise võimalus).

Pingi maksumus: 25 170 €

Pingi kaal: 1160 kg

Pingi konstruktsiooni materjal: teras

Telgede mootorid XYZ: stepper mootorid, 9.4A,

Juhtvara: Mach3



Sele 1.5. Raptor X-SL lõikepink

1.6 Masina nõuded

Masin peab vastama kõikidele EL poolt kehtivatele normatiividele ning seadustele. Masina kontseptsioon ja projekteerimine viiakse läbi jälgides järgmisi Euroopa liidus kehtivaid standardeid:

- EN ISO 12100 – konstrueerimise üldprintsipiibid
- EN 614,894 – ergonoomika
- EN 60204 – masinate elektrisüsteemid
- EN ISO 13849 – masinate juhtsüsteemid
- EN 61496 – üldnõuded ohutusseadististele

Neid nõudeid järgitakse edasises projekteerimise käigus.

2.PINGI PROJEKTEERIMINE

2.1 Lõikepingi spetsifikatsioon

Spetsifikatsioon		Projekt:	Fiks. nõue	Soov.
	Leht 1	Multifunktsionaalne CNC lõikepink		
<p>1. <u>Funktsioon.</u> Mitte-ferritsete materjalide freesimine ning terase plasmalõikus</p>			X	
<p>2. <u>Tehnilise protsessi tingimused.</u></p>				
<p>2.1 Pingi telgede maksimum kiirused:</p>				
<p>a)X,Y telgde kiirused kuni 10500 mm/min</p>			X	
<p>2.2 Vahetatavad lõikeriistad</p>				
<p>a)Plasmalõikur ning spindel on masinal kergesti vahetatavad</p>			X	
<p>2.3 Vahetatavad töölaudad</p>				
<p>a)Pingil on kergesti vahetatavd töölaudad plasmalõike ning freesimise tarbeks.</p>			X	
<p>2.4 Laua mõõtmed ja piirangud</p>				
<p>a) Tööala: 1000x1500x300 mm</p>				X
<p>b) Masina üldgabariidid: 1400x1900x1230 mm</p>			X	
<p>2.5 Pingil töötamise protseduur.</p>				
<p>a)Pingil võimalik opereerida ühel inimesel</p>				X
<p>2.6 Keskkond.</p>				
<p>a)Sisekeskkond</p>			X	
<p>2.8 Lisad</p>				
<p>a)Pink on modulaarse konstruktsiooniga</p>			X	
<p>3. <u>Käsitlemine</u></p>				
<p>3.1 Eluiga vähemalt 10 aastat.</p>				X
<p>3.2 Vastupidav.</p>				X
<p>3.3 Hooldusvaba.</p>				X
<p>3.4 Transporditav</p>			X	

4. <u>Ergonoomika</u>		
4.1 Käe jõud: 250N või jala jõud: 400N.	X	
4.2 Töö asend ja kõrgus (käsiraamatus).	X	
4.3 Ohutusnõuete tagamine.	X	
5. <u>Kuju</u>		
Erialgsed nõuded puuduvad. Masin võiks olla modulaarne.	X	
6. <u>Hoiustamine</u>		
Võimalikult väike ruumitarve.	X	
7. <u>Valmistamisaeg</u>		
Tarneaeg 1 kuud (2 kuud maksimum).		X
8. <u>Valmistamine</u>		
Konstruktsioon võimalikult odav ja lihtne.	X	
9. <u>Kulud</u>		
Valmistamiskulud maksimum 3500 €.	X	

2.2 CNC lõikepingide geomeetria ja ehitus

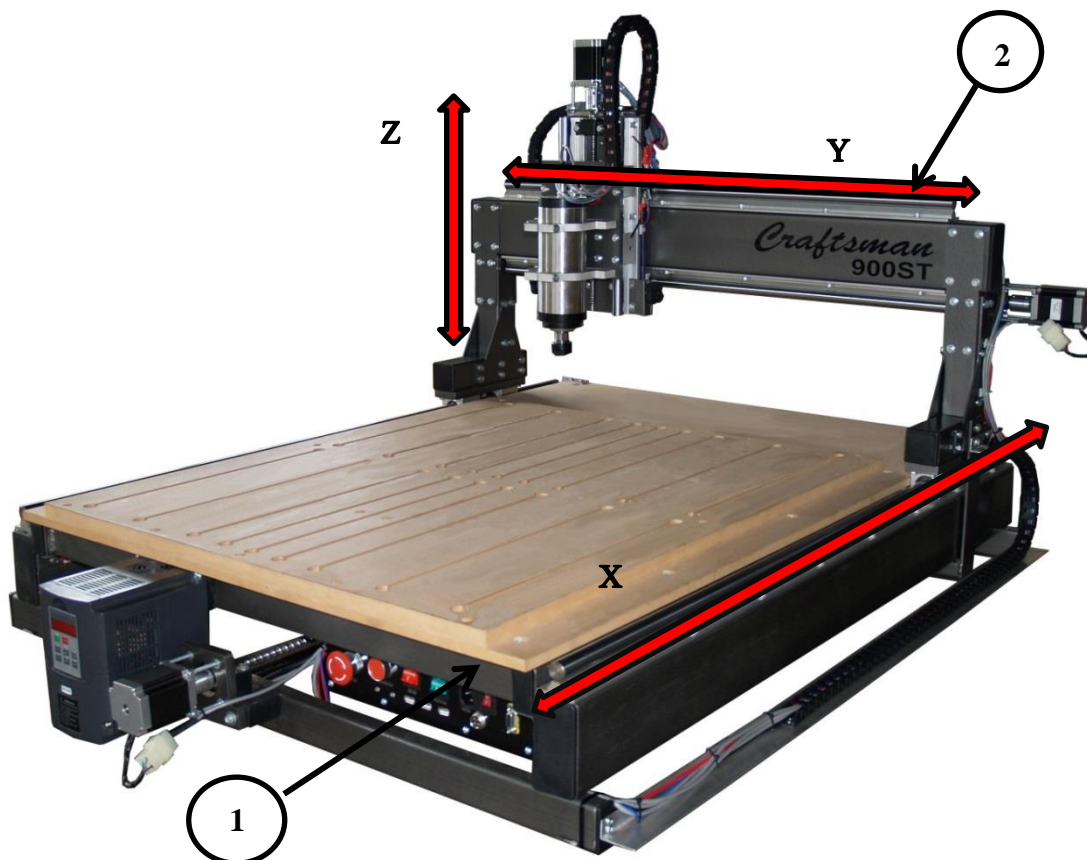
CNC lõikepingid on tänapäeval väga levinud nii tööstuses kui ka eraisikute kasutuses. Lõikepõik võimaldab töödelda materjali 3-teljeliselt (XYZ). Üldlevinud on kaks erinevat CNC lõikepingi tüüpi: statsionaarse portaaliga lõikepõik ja liikuva portaaliga lõikepõik.

CNC lõikepingid koosnevad kahest suuremast põhiosast: põiki raamist ning portaalist.

Põiki raamil on kolm põhi ülesannet:

1. Olla kogu põiki baasiks ning pakkuda kogu konstruktsioonile tuge ja stabiilsust.
2. Toetada X telje lineaarliikumise süsteeme
3. Toetada lõikelauda

Portaal on lõikepingi osa mis hoiab lõikeriista ja Z-telge (ka ZY telge). Portaal asub lõikelaua ja lõikepingi raami kohal. Portaali eesmärk on toetada Z-telge, Y-telge ning selle lineaarliikumise süsteeme ja anda tööriistale piisav stabiilsus ning tugevus. Tähtis on, et portaali konstruktsioon oleks tasakaalus. [4,3]

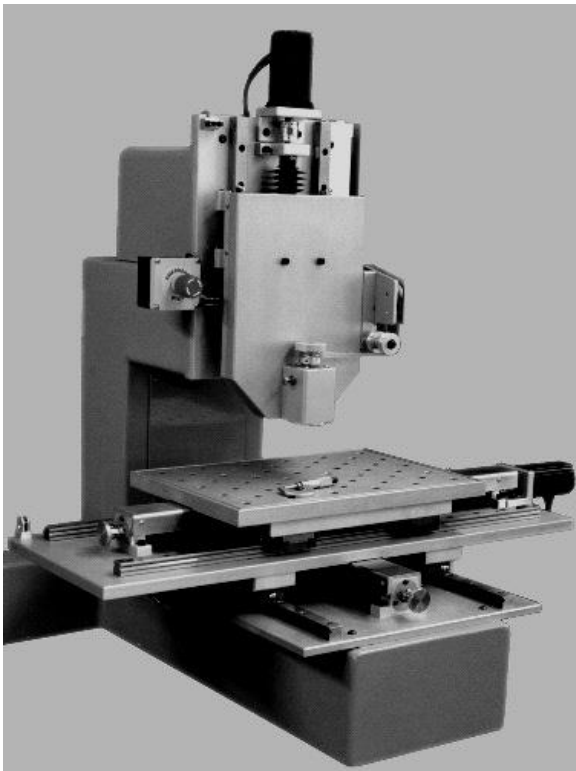


Sele 2.1. CNC lõikepingi teljed XYZ ja kaks suuremat põhiosa: 1 – põiki raam ; 2 – portaal.

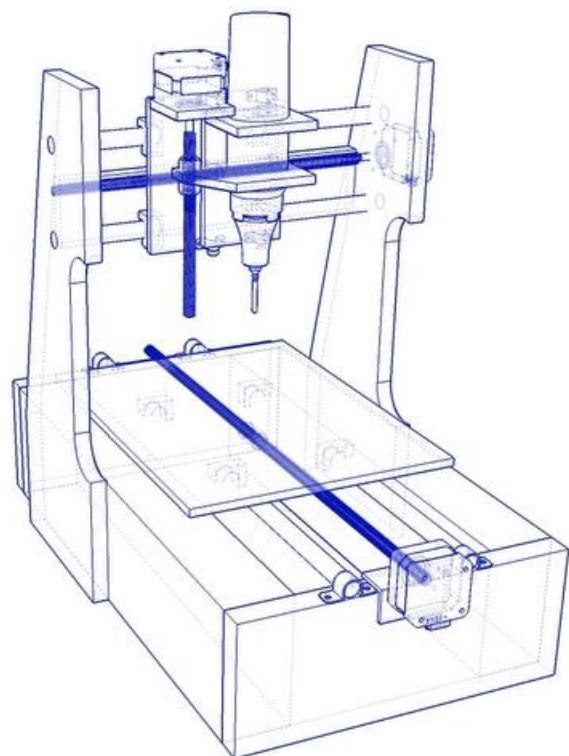
2.2.1 Statsionaarse portaaliga CNC lõikepink

Statsionaarse portaaliga pingi korral on portaal jäigalt ühendatud otse pingiraamiga. See tähendab, et portaal ei liigu ja on kogu aeg paigal. Portaali asemel liigub pingi töölaud. See tähenda, et detail liigub statsionaarse tööriista suhtes. Statsionaarse portaaliga pinke on kahte erinevat tüüpi: XY-telje suunas liikuva baaspinnaga pink ja liikuva X-telje suunalise baaspinnaga pink. Statsionaarse portaaliga CNC lõikepingi töötlemisala on tavaliselt üsna piiratud, kuni 300x300 mm, suuremat ala kasutades on disain ebapraktiline. See tuleneb sellest, et töölauda liigutamine on piiratud füüsiliste mõõtmetega (XY telje liigutamine nõuab rohkem ruumi, kui liikuva portaaliga disaini puhul).[3,4]

Liikuva baaspinna XY-telje korral liigub pingil baaspind ehk töölaud nii $X\pm$ kui ka $Y\pm$ telje suunas. Portaal on fikseeritud. Tööriist saab liikuda ainult $Z\pm$ telje suunaliselt (sele 2.2a). Liikuva X-teljeline pingi korral liigub töölaud vaid X-telje \pm suunal. Portaal on fikseeritud, kuid portaali peal olev Y-telg on liikuv \pm suunas. See võimaldab tööriistal liikuda $YZ\pm$ telgede suunaliselt (sele 2.2b).



Sele 2.2a Liikuv XY-teljeline baaspind pink



Sele 2.2b. Liikuv X-teljeline baaspindpink

Statsionaarse portaaliga CNC lõikepingi eelised ja puudused:

Eelised:

- Jäigem ning tugevam ehitus kui liikuva portaaliga pingi konstruktsioonil
- Lihtsam konstruktsioon ning kergem ehitada
- Vibratsioonide magnituud väiksem
- Võimaldab kasutada võimsamaid spindleid
- Teoreetiliselt saab freesida ka ferriitseid metalle (tugeva konstruktsiooni korral)

Puudused:

- XY teljeline liikumine võtab tunduvalt rohkem ruumi, pikemate lineaar liikumis süsteemide kasutamise vajadus
- Masina gabariidid suuremad kui võrrelda portaal tüüpi masinaga sama töötlemisala ulatuses
- Kallim kui liikuva portaaliga lõikepink
- Töölaua vahetus keerukam

2.2.2 Liikuva portaaliga CNC lõikepink

Erinevalt statsionaarsest lõikepingist on liikuva portaaliga pingi korral portaal ühendatud raamil oleva X-teljega. X-telje moodustavad tavaliselt lineaar liikumissüsteemid nagu: lineaarrööbastel olevad laagrikoostud, keti ja hammasratas süsteemid või hammasrihma ja rihmaratta süsteemid. Lineaarliikumissüsteemid lubavad portaalil liikuda X-telje sihis. Portaal toetab ka YZ telge, ning mõlemad on liikuvad. See võimaldab tööriista liigutada XYZ-teljelistel suundadel. Töölaua on fikseeritud pingi raami külge ning tööriist liigub fikseeritud detaili suhtes. Liikuva portaaliga CNC lõikepink on kujutatud seel 2.3 .[4] Liikuva portaaliga CNC lõikepingi eelised ja puudused:

Eelised:

- Suurem töötlemisala
- Odavam võrreldes statsionaarse portaaliga pingiga
- Paindlikum süsteem võrreldes statsionaarsega
- Võimaldab lihtsat töölauda vahetust

- Suurem saavutatav tootmisesfektiivsus

Puudused:

- Vähem jäikust kui statsionaarses süsteemis
- Liikuv portaal tekitab lisajõudusi süsteemile
- Suure portaali liigutamine võib olla keerukam

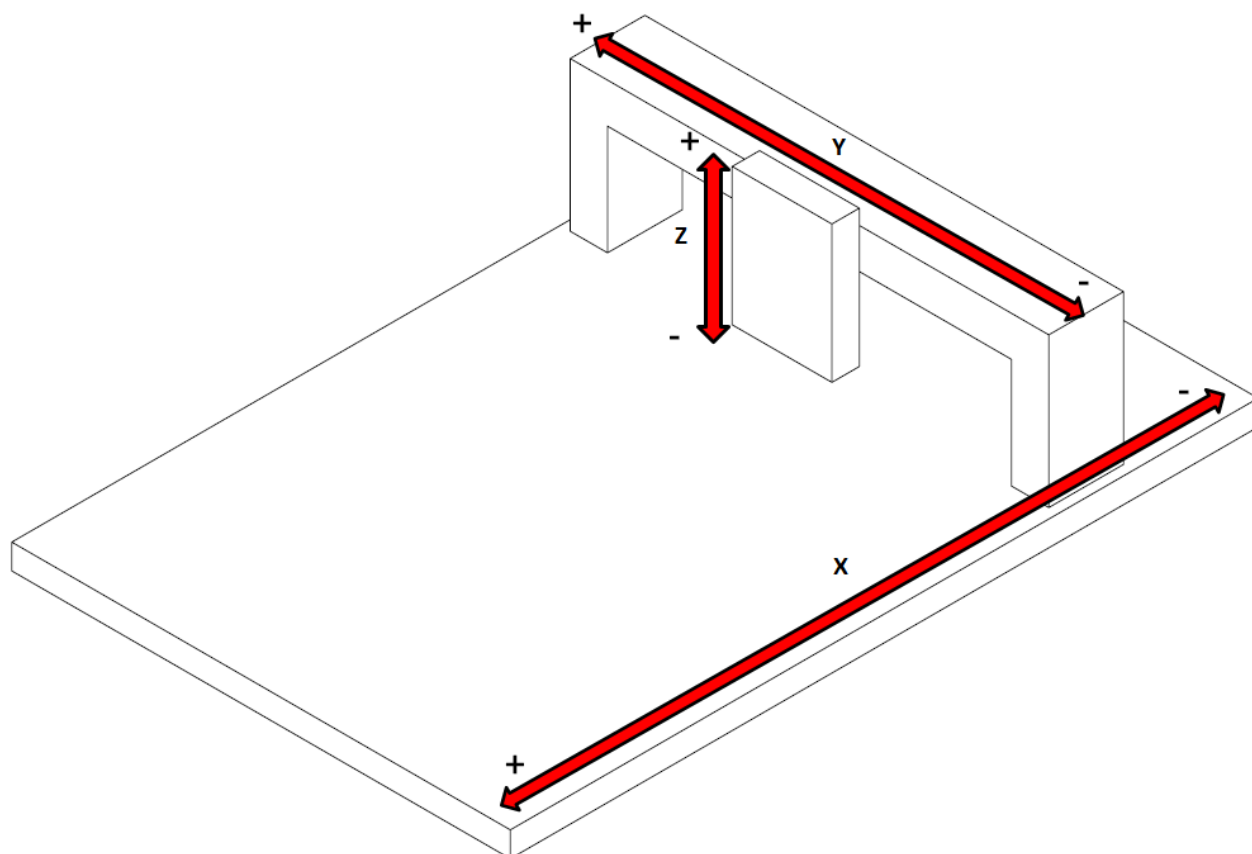


Sele 2.3. Liikuva portaaliga CNC lõikepink

2.2.3 Disaini valik

Võttes arvesse eespool toodud fakte ning antud projekteeritava masina eesmärki, siis on sobivaks disainiks liikuva portaaliga CNC lõikepink. Kuna pingil on tarvis suur tööala (1500x1000), ei ole võimalik ega otstarbekas kasutada statsionaarse portaaliga disaini. Samuti raskendaks plasmalõikusel tekkivad tegurid nagu lõikejäägid ja töölaua vahetus statsionaarse disaini kasutust.

2.3 CNC Lõikepingi lihtsustatud kinemaatikaskeem



Sele 2.4. Lihtsustatud kinemaatikaskeem liikuva portaaliga pingi jaoks.

2.4 Lõikepingi konstruktsioonimaterjali valik

CNC pinki projekteerides on tähtis valida pingi konstruktsiooniks õige materjal. Pingi konstruktsioonil on tarvis piisavalt häid jäikus- ning tugevusomadusi, et töötlemisel ei tekiks pingi läbipainet, purunemist ega vibratsiooni. Samuti tuleb valida materjal, mis on majanduslikult otstarbekas ning kergesti kättesaadav.

Materjali valikust lähtutakse 3 parameetrit arvestades:

1. Materjali jäikuse näitajat elastsusmoodul (Youngi moodul).
2. Materjali tõmbetugevust
3. Materjali hind

2.4.1 Materjali jäikus- ja tugevusnäitajad

Jäikus on detaili võime vastu panna deformatsioonidele. Materjali elastsusmoodulit kasutades saab arvutada ja oletada materjali jäikuse. Kuna elastsusmoodul on seotud Hooke'i seadusega siis on materjali jäikus väljaarvutatav järgmise valemiga:

$$k = \frac{AE}{L} \quad (1)$$

k –

k –materjali jäikus

A – detaili ristlõike pindala

E – elastsusmoodul

L – detaili pikkus

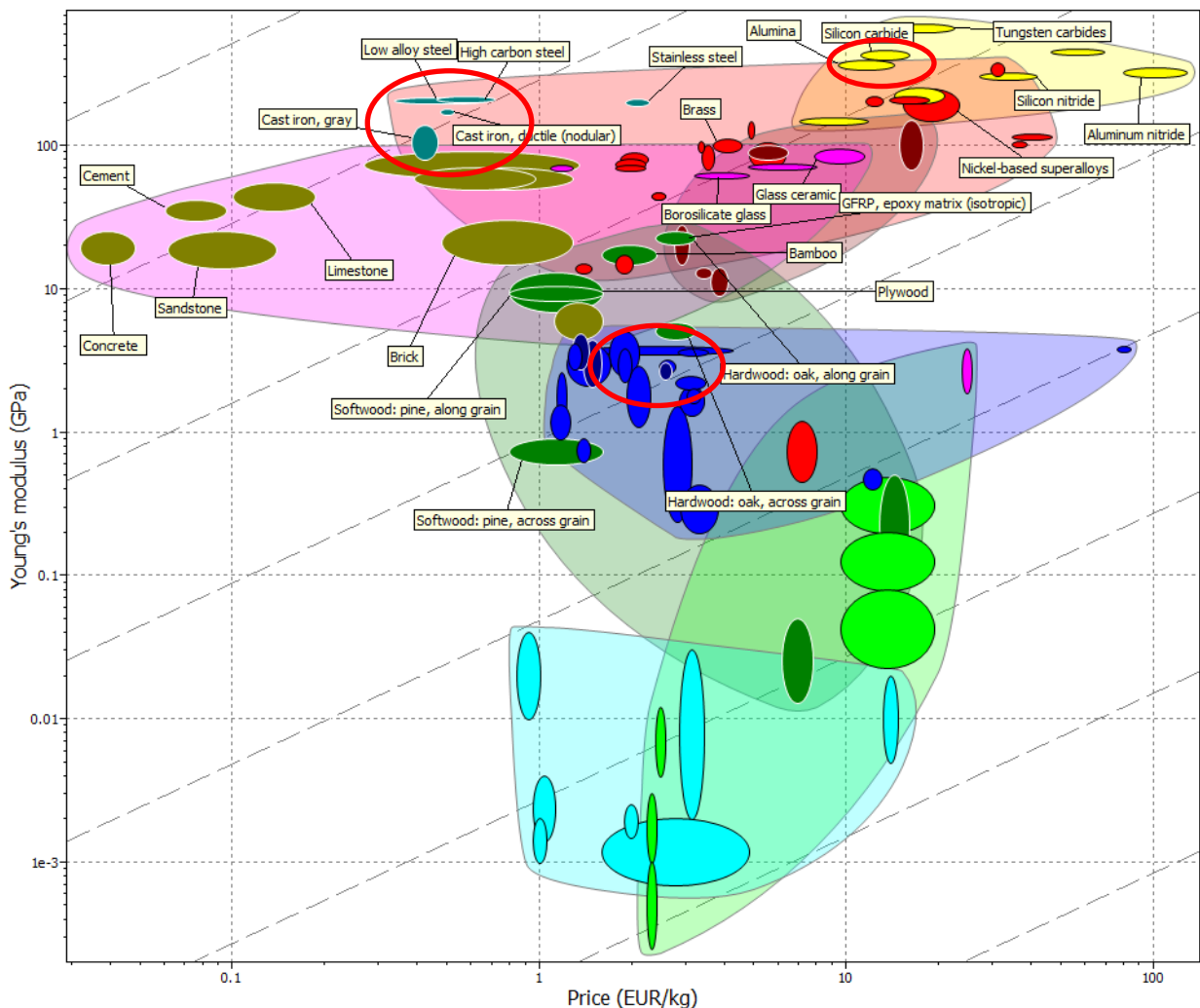
Võttes arvesse valemit 1 võib väita, et materjalid millel on suurem elastsusmoodul on jäigemad. See sõltub ka veel detaili ristlõikest ning pikkusest.

Tõmbetugevus on materjali võime vastu panna pingele kuni purunemise hetkeni. Tõmbetugevust mõõdetakse katseteimide kontrollitud purustamisega. Materjalid võivad plastselt deformeeruda või järsku puruneda. Järsult purunevaid materjale kutsutakse hapralt purunevateks.

2.4.2 Materjali valik kasutades CES selectorit

Materjali valides koostati graafikud, kus X-teljel on kujutatud materjalide hinnad EUR/kg kohta ning Y-teljel materjalide elastsusmoodulid. Antud juhul otsitakse materjali, millel oleks kõrge elastsusmoodul, mis oleks kergesti kättesaadav ning mis oleks majanduslikult otstarbeka hinanga.

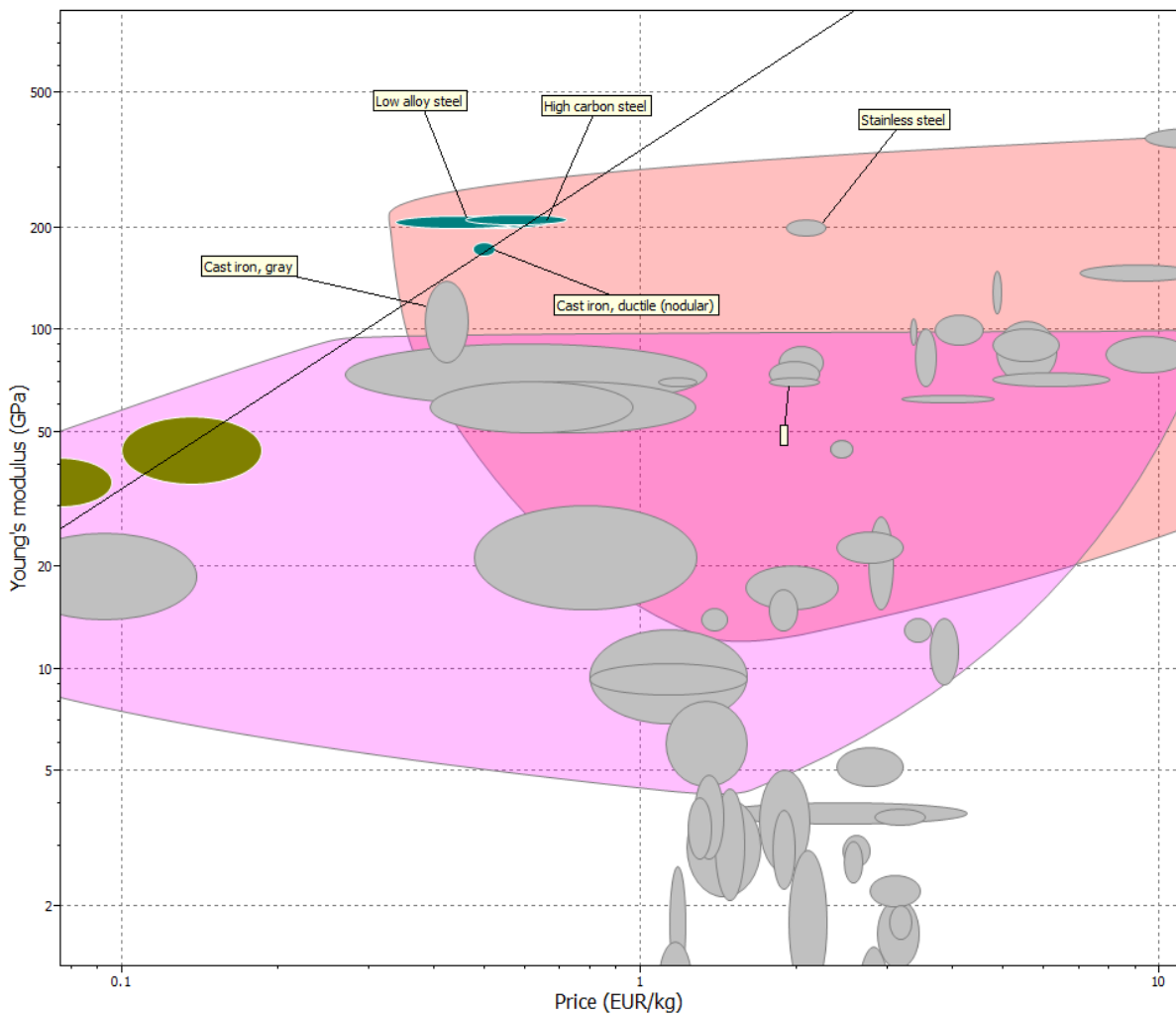
Nagu graafikult näha, joonistub sealt välja üsna konkreetne grupp materjale - ferriitsed metallid. Neil on kõige parem tugevusomaduste/hinna suhe. Terase valikut toetab ka graafik, kus tulevad välja materjali head tõmbetugevus omadused 350-2000 MPa (tõmbetugevus varieerub süsiniksisalduse, legeritavate elementide ja termotötluste tõttu).



Sele 2.5. Materjali valik. Hinna ja elastsusmooduli suhe

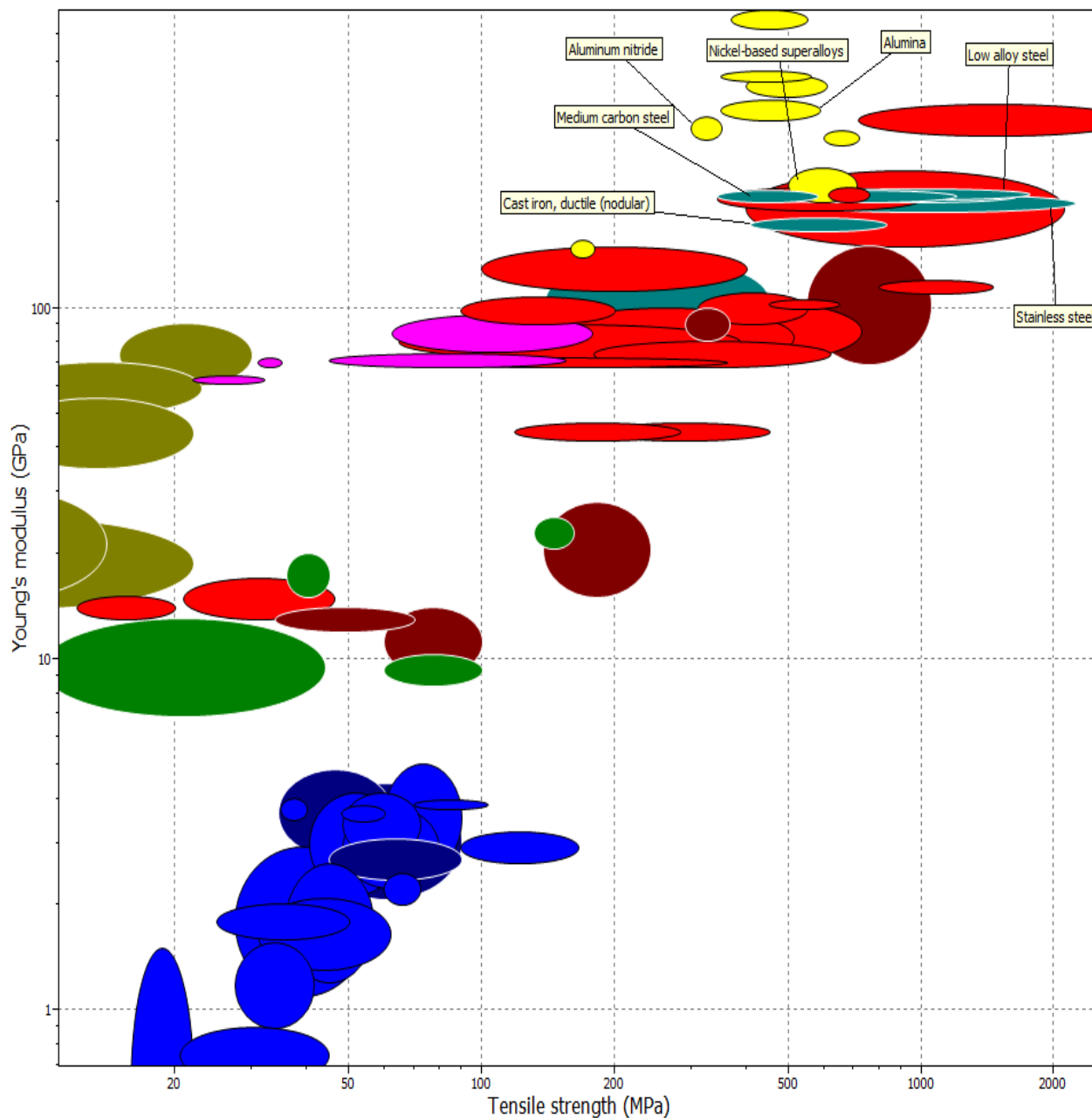
Alternatiivina oleks võimalik kasutada ka alumiiniumprofiilidest valmistatud konstruktsiooni. Alumiiniumprofiilide miinsuseks on aga nende kõrge hind võrreldes terasega. Samuti on alumiinium tunduvalt kergem, CNC masina konstruktsioonil on aga vaja massi, et olla piisavalt jäik kõvema materjali töötlemiseks, kuna lõiketötlusel tekkivad momendid ja jõud on üpriski suured.

CNC lõikepinkide ehituses on levinud materjaliks ka vineer. Vineeri puhul on tegemist puitkomposiidiga. Vineerile, just nagu komposiidile, annab tugevuse tema kihilisus ning materjali kiuline asetus. Võimalik kasutada kihtide erinevat kiulist asetust ning võimalus kasutada erinevaid materjalide konfiguratsioone. Vineeri puuduseks on, et ta pole piisavalt jäik ning terasega sarnase jäikuse tagamiseks oleks tarvis kasutada väga palju materjali, mis suurendaks hinda ning võiks disani mõjutada, seega kasutatakse seda materjali pigem väiskemate pinkide puhul. Üks suurimaid miinuseid, mis takistab antud materjali kasutamast on aga tema süttimisoht, kuna antud pingiga teostatakse ka plasmalõikust.



Sele 2.6. Elastsus mooduli ja hinna suhe. Teraste grupp

Põhinedes saadaval olevale infole, oleks kõige sobilikumaks materjaliks madala-keskmise süsinikusisaldusega konstruktsiooni terased. Seda materjali tarnitakse mitmel eri vormil ning kujul. Materjali madal hind ning tugevusomadused, on teistest materjalidest selgelt üle. Konstruktsiooni materjaliks valitakse S350 teras, voolepiir 350 MPa, tõmbetugevus 585 MPa. Teras on hästi töödeldav ning keevitav.



Sele 2.7. Tõmbetugevuse ja elastsusmooduli suhe.

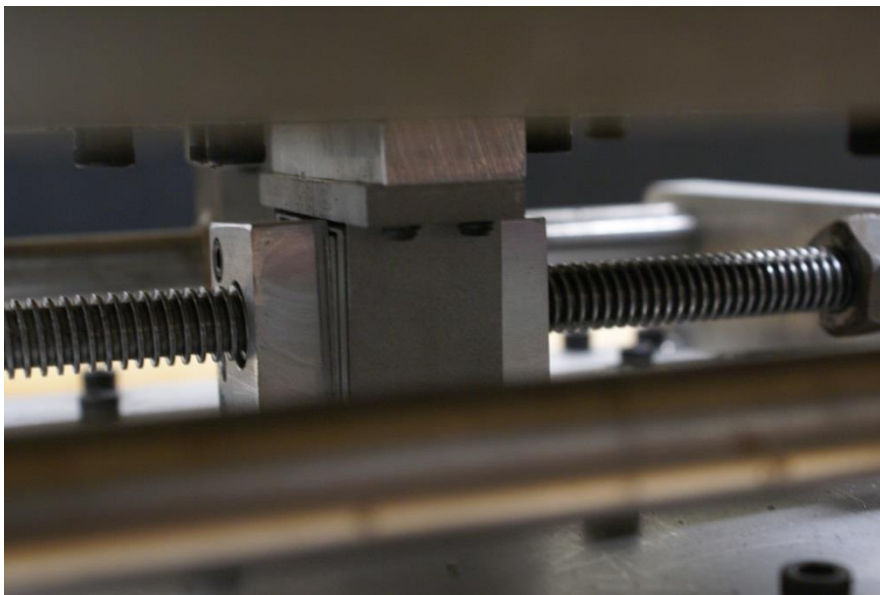
2.5 Jõuülekanne valik

CNC masinat projekteerides on võimalik kasutada mitmeid erinevaid jõuülekanne meetodeid. Enamasti kasutatakse pöörliikumist tekitavaid mootoreid, kuid CNC rakendustes on tavaliselt vaja lineaarset liikumist. Pöörleva liikumise muutmiseks lineaarseks liikumiseks kasutatakse järgmisi meetodeid:

2.5.1 Keermelatt

Keermelatt ehk jõukruvi on vahend millega muudetakse mootorist tulev pöörlev liikumine lineaarseks. Tegemist on latiga millel on kogu pikkuse ulatuses keere. Kasutatakse enamasti ajalt madala jõudlusega ajamites. Keerme tüüpe on erinevaid. Põhilised kasutatavad keermed on:

- Ruutkeere – saab oma nime ruudukujulisest keerme geomeetriast. See keere on kõige suurema kasuteguriga kuna seal esineb kõige vähem hõõrdumist.
- Trapetskeere – trapetsi geomeetriaga keere, mille serva nurk on 29° . Kergem hooldada kui ruutkeeret. Väiksem kasutegur kui ruutkeermel, nurgast tingitud hõõrdumise tõttu.
- Kolmnurkkeere – kolmnurkse geomeetriaga keere. Kasutatakse ainult ühe suunalisel koormusel. Nendel tingimustel on nad sama efektiivsed kui ruutkeermed, kuid neid on lihtsam toota.



Sele 2.8. Keermelatt CNC masinas

Keermelatte toodetakse samamoodi nagu teisi keermega tooteid – rullides, lõigates või vormides. [17]

Eelised:

- Hea jõuülekanne
- Hea saavutatav kiirus
- Suhteliselt odav

Puudused:

- Hõõrdumine ning kulumine tekitab loksumist
- Pikkadel kruvidel võib resonantsi tõttu esineda vibratsiooni ning hüppeid

2.5.2 Kuulkruvi

Kuulkruvid on oma põhimõttelt ja ehituselt väga sarnased keermekruvidele. Kuulkruvil on keeme asemel sissetöödeldud kuuli võrud. Võrud on töödeldud latsti heeliksjoont järgides nagu ka keermekruvidel. Kuulkruvidel esineb minimaalne hõõrdumine ning nad suudavad edasi kanda suuri koormusi suurtel kiirustel. Kuulkruvid on valmistatud kõrgete tolerantsidega ning nende kasutamine masinaehituses tagab suure täpsuse. Kuullaagrid asuvad kuulmutri sees.

Loksu vähendamiseks ning optimaalse jäikuse tagamiseks eelsurveatakse kruvi. See saavutatakse komponentide täpsel töötuses, et nende vahel tekiks väike ping-ist. [17]



Sele 2.9. Kuulkruvi

Eelised:

- Väga väike kulumine ning hõõrdumine
- Suurepärane täpsus ning loksuvabadust.
- Suur saavutatav liikumiskiirus
- Suur jõuüleknade võime

Puudused:

- Kallis
- Laagrid peavad olema pidevalt määritud (suletud võrud)
- Pikkadel kruvidel võib resonantsi tõttu esineda vibratsiooni ning hüppeid

2.5.3 Hammaslatt ja hammasratas ülekanne

Hammaslatt ja hammasratas ülekanne koosneb hammasratastest ning hammaslatist või ketist et pöörlevast liikumisest lineaarset liikumist saada. Hammaslatt ülekandega on saavutatavad väga suured kiirused, kuid suure kiiruse arvelt on ülekantavad jõud väikesed ning kogu süsteemi jäikus on madal. [4]



Sele 2.10. Hammaslati ja hammasratta ülekanne CNC masinas

Eelised:

- Väga suured saavutatavad kiirused
- Kergesti hooldatav
- Suured kiirused võimaldavad kiirete masinate valmistamist, vähendades töötluskulusid

Puudused:

- Madal süsteemi jäikus ning väike ülekantav jõud.
- Ühe telje kohta võib tarvis minna mitut hammaslatt

2.5.4 Rihmülekanne

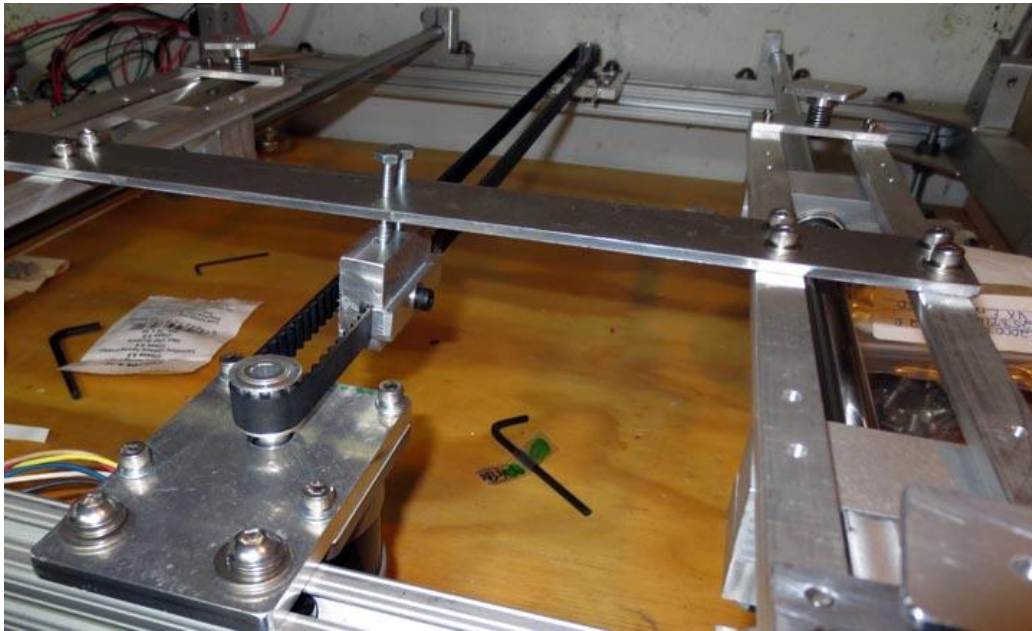
Pöörlev jõud muudetakse lineaarseks hammasrihma ning rihmaratta abil. Rihmülekanne on ideaalne sellistele CNC masinatele nagu plasmalõike, laserlõike ja 3D printerid. Neil ei esine väga palju jõudusi ning neil on madalad pöördemomendid võrreldes freespinkidega. Seetõttu on saavutatavad kiirused äärmiselt suured. [4]

Eelised:

- Kõige suuremad saavutatavad kiirused
- Vähene hooldus vajadus, mõningane rihmade pingutamise vajadus
- Täpne liikumine
- Odav

Puudused:

- Madal jõuülekanne
- Pikkadel rihmadel võib resonantsi tõttu esineda vibratsiooni ning hüppeid



Sele 2.11. Rihmülekanne CNC masinas

2.5.5 Jõuülekannde valik

Jõuülekannde valikul hinnatakse 10 punkti skaalas nelja parameeterit: liikumiskiirust, täpsust, jõuülekanndet ning kulumist.

Jõuülekannde liik	Liikumiskiirus	Täpsus	Jõu ülekannde-võime	Kulumine	Kokku
Keermelatt	6	8	7	4	25
Kuulkruvi	8	10	9	9	36
Hammaslatt	9	3	3	5	20
Rihm	10	6	2	7	25

Tabel 2.1 Hindamismatriks jõuülekannde valiku tegemiseks.

Arvestades kõiki tegureid ning parameetreid, kõige sobilikum jõuülekannde liik antud CNC pingi puhul on kuulkruvi. Kuulkruvi võimaldab masinal suuri teljelisi liikumiskiiruseid, liikumiste suurt täpsust ning kannab üle piisavalt palju jõudu, et võimaldada materjalide lõiketööstust. Samuti on tegemist süsteemiga, millel esineb minimaalset hõõrdumist. See faktor suurendab süsteemi kasutegurit ning ka liikuvate detailide kulumine on minimaliseeritud.

2.5.6 Kuulkruvi valik

Sobivkas kuulkruviks antud rakenduses on Thomson *Precision Rolled* kuulkruvi. Kuulkruvi diameeter on 12mm ning soone vahekaugus 5 mm. Soone vahekaugus näitab mitu mm liigub kruvi lineaarselt 1 täisringi tegemisel. Soone vahekaugus on kujutatud seel 2.13. Kruvi laagrikoostu dünaamiline koormustaluvus 5,4 kN ning staatiline 42,8 kN [17]. Kuna on teada mootori maksimaalne pöörlemiskiirus ning kuulkruvi soone vahekaugus, samme arvutada maksimaalne saavutatava teoreetilise telgede liikumiskiiruse antud valemiga:

$$v_{\text{lineaar}} = n_{\text{mootor}} \cdot s_l = 2100 \cdot 5 = 10500 \text{ mm/min} \quad (2)$$

Kus,

v_{lineaar} – telgede lineaar liikumiskiirus

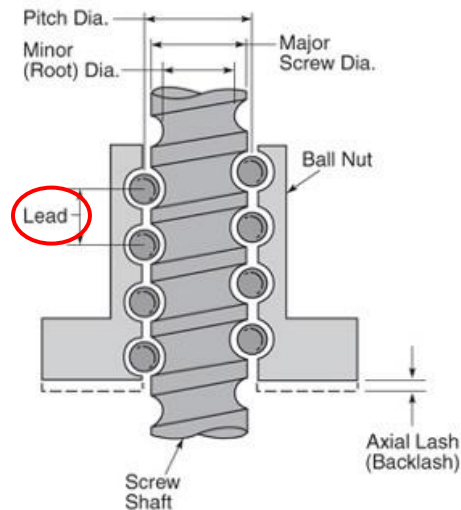
n_{mootor} – mootori pöörlemiskiirus

s_l – kuulkruvi soone vahekaugus

Product Specifications

Ball Screws						Standard Ball Nuts						Preloaded Ball Nuts			
Nom. Dia.	Lead (in/rev)	RH LH	SST 17-4 PH	Support Bearing (See p 51)	Nom. Root Dia.	Screw P/N	Nut P/N	Nut type	No. of Circuits	Dynamic Load Rating (lbs)*	Static Load Rating (lbs)	Torque to Raise 1lb	Nut P/N	Max. Preload (lbs)	Static Load Rating (lbs)
3/8"	.125	R		6mm	.300	R0308†	RB0308-2	A	2	500	4,250	.02 lb-in	–	–	–
	.125	R				PRX10†	RX10-2	D	1	136	1,415		–	–	–
	.125	R	x			PRB15	RB15-2	D	1	25	230		–	–	–
1/2"	.200	R		6mm or 8mm	.390	PR0505	RO505-2	A	2	1,200	9,400	.04 lb-in	RP0505-2	360	9,040
	.500	R		8mm		PR0502	RB20-2	B	2	850	4,150	.09 lb-in	–	–	–
5/8"	.500	R	x	8mm	.480	PRB21	RB21-2	B	2	140	750		.04 lb-in	–	–
	.200	R				PR0605	RC0605-2	D	1	800	6,150	RD0605-2		240	5,910
	.200	R				PR0605	RQ0605-2	F	1	800	6,150	–		–	–
	.200	L				PRL0605	RK0605-2	D	1	800	6,150	RE0605-2		240	5,910
	.200	L				PRL0605	RR0605-2	F	1	800	6,150	–		–	–
	.200	R	x			SPRB30	SRB30-2	D	1	170	1,250	–		–	–
	.200	L	x			SPRB 31	SRB31-2	D	1	170	1,250	–		–	–

Sele 2.12. Kuulkruvi valik



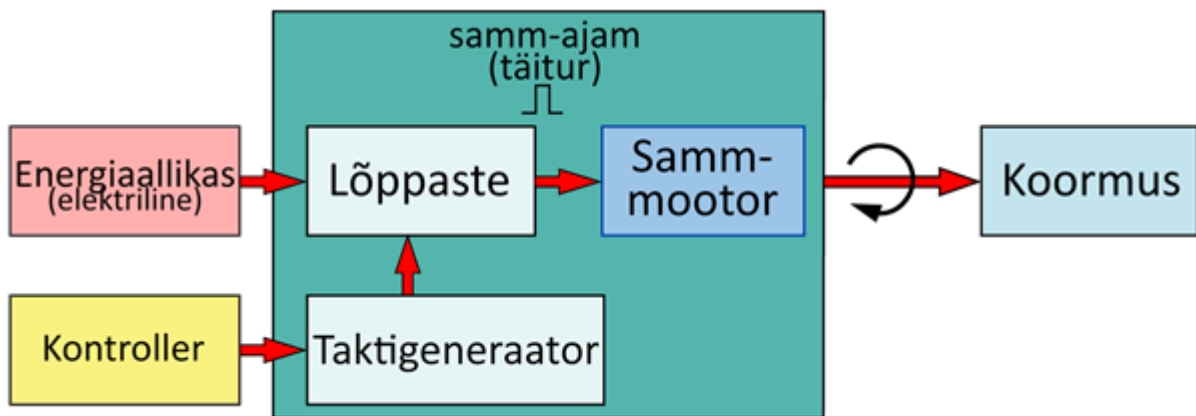
Sele 2.13. Soone vahekaugus

2.6 Mootorid

2.6.1 Samm-mootori ehitus ja tööpõhimõte

Samm-mootor on seade, mis muudab alalispinge impulsid mootori mehaaniliseks energiaks. Samm-mootoritel on sõltuvalt ehitusviisist (bipolaarsed või unipolaarsed mootorid) 4, 6 või 8 ühendusklemmi. Ehituselt on samm-mootorid sünkroonmootorid, mille rootor pöörleb vastavalt staatorimähisesse antud taktimpulssidele ja mille pöördenurk on määratud sammude arvuga. [14,13]

Samm-mootor on numbriliselt juhitav, seega sobib ta ideaalselt kokku diskreetsete juhtimissüsteemidega, näiteks mikroprotsessoriga. Impulssidele vastab teatud pöördenurk α , n impulsile aga pöördenurk $\gamma = n \cdot \alpha$. Siit tuleneb, et samm-mootorit võib kasutada positsioneerimisel avatud juhtimisahelaga ehk tagasisideta süsteemides. Samm-mootori eeliseks on et tal puudub tagasisideanduri vajadus positsioneerimisel. See muudab mootori ehituse ja kontrollimise lihtsamaks. Täpsuse suurendamiseks konstrueeritakse mootorid suurema pooluste kogusega. Kuna samm-mootorit juhitakse järjestikuste impulssidega, siis võib madalatel pööretel tekkida mootoris katkendlikku liikumist. Samm-mootorid on rentaablid võimsuseni kuni ~1 kW, neid toodetakse ka lineaarmootorite kujul [14,13].



Sele 2.14. Samm-mootori struktuurskeem

Samm-mootorite eelised:

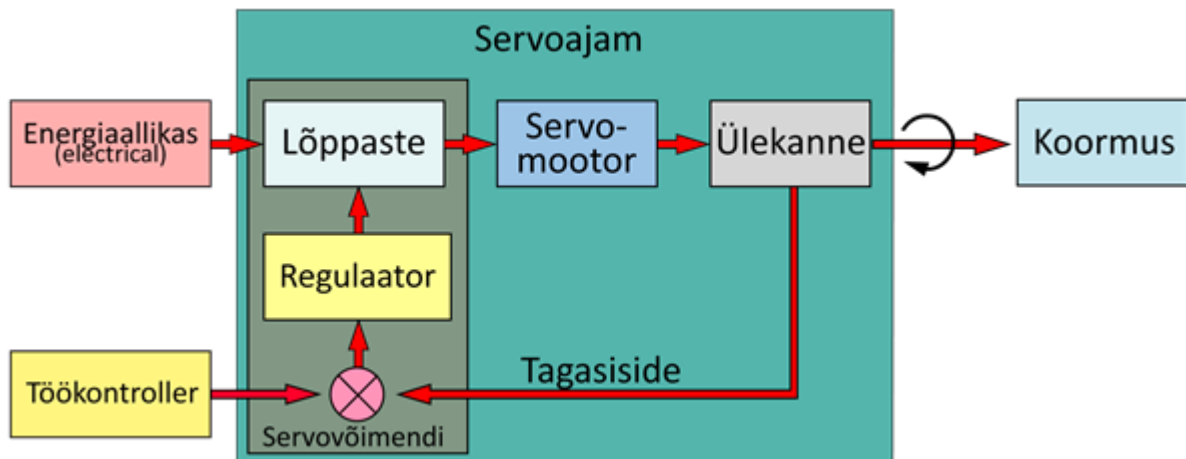
- Suur täpsus
- Hea kiiruse kontrollivõimalus
- Lihtsus
- Suur väändemoment madalatel kiirustel
- Odavad
- Laialtlevinud
- Puudub keerukate enkooderite/juhtskeemide kasutamise vajadus

Puudused:

- Madal kasutegur
- Madalad töökiirused
- Madal väändemoment suurtel kiirustel
- Tagasiside puudumine

2.6.2 Servomootorite tööpõhimõte

Servoajam koosneb kahest põhi komponendist: servomootorist ja servovõimendist (seled 2.43 ja 2.44). Servovõimendi reguleerib ja võimendab peale antavad voolu. Servo tuleb ladinakeelsest sõnast *servus* mis tähendab orja. Tööpinkides kasutatakse servoajameid peamiselt abiajajamitena [12,15].



Sele 2.15. Servovajami struktuurskeem



Sele 2.16. Servovõimendid ja -mootorid.

Servovõimendi reguleerib etteantud momendi ja kiiruse saavutamiseks mootori mähistesse antavat voolu. Servovõimendi koosneb põhiosadena lõppastmest ja regulaatorist. Regulaator juhhib lõppastet ja tagab etteande- ja tegelike suuruste (vool, asend, kiirus) pidevat võrdlust ning see tagab mootori täpse töö isegi muutuvate koormuste tingimustes. Lõppaste on sisuliselt jõuelektronikal põhinev modulaator, mis formeerib servomootori toitevoolud ning tagab täituri ettenähtud liikumistrajektoori [15].

Servoajami töö on ebaühtlane, see erineb tavalistest elektriajatmitest, mis töötavad enamasti püsikiirusel. Nimikiiruseni kiirendamine kestab vaid mõne millisekundi, sellele järgneb lühikese aja pärast kiire pidurdus; positsioneerimistäpsus peab olema sajandikmillimeetri suurusjärgus.

Servoajamitele esitatakse paljudel juhtudel alljärgnevalt loetletud nõudeid:

1. suur positsioonimistäpsus;
2. suur kiiruse reguleerimistäpsus;
3. suur reguleerimispiirkond;
4. momendi stabiilsus;
5. küllaldane ülekoormatavus;
6. suur toimekiirus.

Servoajami eelised ülejäänud reguleeritavate ajamite ees on head dünaamilised näitajad, suur täpsus ja nullkiirusmoment (suur moment nullilähedastel kiirusel). Samuti on servodel kompaktsed ning suure erivõimsusega. Ajami dünaamiliste omaduste all mõistetakse toimekiirust, mille suurenemisel kasvab töömashinate kiirus, töötsükli arv ning lõpptulemusena masinate tootlikkus.. Servoajamid on suure täpsuse ja toimekiirusega. Nende kiirusvahemikud on laiad ning nad täidavad oma funktsioone ka ajutise ülekoormatuse puhul. Servoajameid kasutatakse suurt täpsust nõudvates rakendustes ja masinates. Mõningad kasutusvaldkonnad: suure-kiirusega CNC masinad, teleskoopide peeglite juhtimine [12,15]

Puudused:

- Kallimad kui stepper mootorid
- Keeruliste enkooderite kasutamise vajadus
- Väiksem kättesaadavus
- Vajadus kasutada servovõimendit

2.6.3 Mootori valik

Sammootorid saavad suurepäraselt hakkama kiirustega vähem kui 2000 p/min. Servomootorid on väga kasulikud peale 2000 p/min. Seetõttu antud töös on mõistlik kasutada sammootoreid nende lihtsuse ja kasutamissõbralikkuse tõttu. Neil on väga hea täpsus, tarvilik võimsus ning õige töökiirus antud CNC masina tarbeks.

2.7 Laagrite valik

Antud rakenduse puhul ei ole laagrite täpsus niivõrd oluline, kuna pöörlemiskiirused on madalad (maksimum 2000 p/min). Samuti on tekkivad jõud suhteliselt madalad. Seega sobib antud rakenduse tarvis radiaaltugilaager jõuülekannet toetama. SKF laagrikood 6000-2RSH, dünaamiline koormussekandevõime on 4,75 kN ning staatiline 1,96 kN.

Principal dimensions			Basic load ratings		Speed ratings		Designation
d	D	B	dynamic C	static C ₀	Reference speed	Limiting speed	
mm			kN		r/min		* SKF Explorer bearing
10	26	8	4,75	1,96	-	19000	6000-2RSH *

Calculation factors
 k_f 0,025
 f_0 12

Sele 2.17. Radiaaltugilaager 6000-2RSH

2.8 Plasmalõikuri valik

Lõikuriks sobib Hypertherm Powermax 125 CNC plasmalõikur. Valitud lõikurit on võimalik integreerida CNC kontrolleri ja tarkvaraga. Plasmalõikuri parameetrid:

- Väljund vool: 30-125 A
- Väljundpinge: 175 V
- Töötükli vool 40°C juures: 125 A
- Dimensioonid: 592mm D; 274 mmW; 508 mm H
- Süsteemi kogu kaal: 45,2 kg
- Kaitsegaas: puhas, kuiv õhk

Soovitavad lõikekiirused ja parameetrid on toodud tabelis 2.2. Tulemused on saadud katsetuste põhjal ning need on teostatud tootja poolses laboratooriumis. Tabelist selgub, et CNC pink peaks võimaldama teljelist liikumist vähemalt 9000 mm/min [8]. Projekteeritav masin suudab teoreetiliselt arendada teljesuunalisi liikumisi kuni 10500 mm/min.

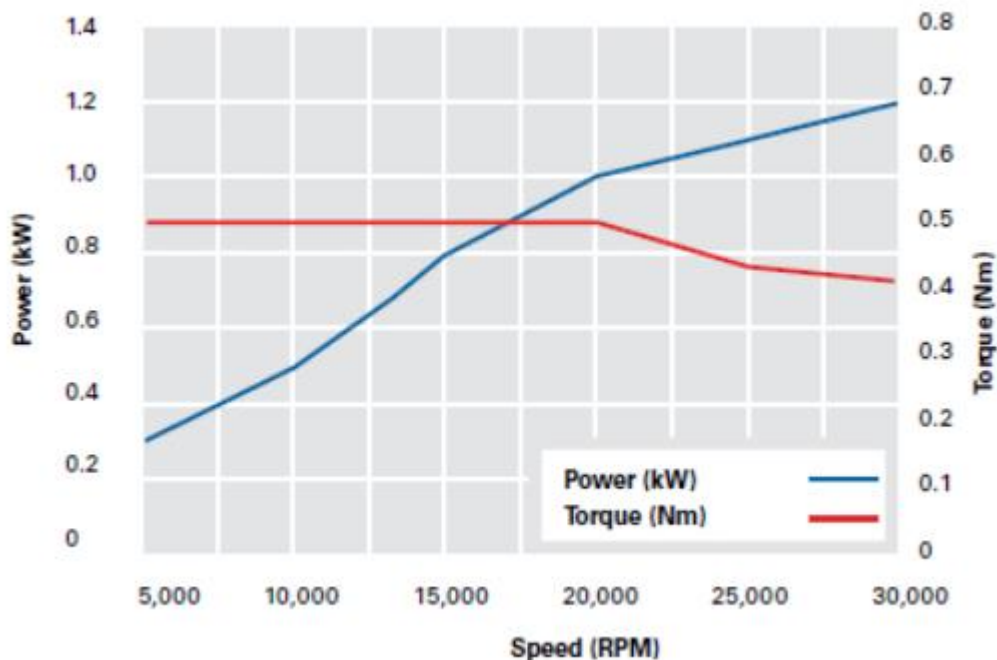
Materjal	Paksus	Vool	Tootmise lõikekiirus
	mm	A	mm/min
Teras	6	125	5960
	12	125	2510
	20	125	1140
	25	125	780
Roostevaba teras	6	125	7690
	8	125	5550
	12	125	2710
	20	125	1030
Alumiinium	6	125	8560
	12	125	3070
	20	125	1500
	25	125	1050

Tabel 2.2. Plasmalõikuri töötlemiskiirused ja parameetrid

2.9 Spindli valik

Spindel on tööriist millega lõiketöödeldakse erinevaid materjale. Spindlid on enim kasutatavamad lõikeriistad CNC lõikelaudade puhul.

Sobivaks spindliks on Datron *High-Frequency* spindel EcoS. Spindli võimsus 1.2 kW, maksimaalne väändemoment 0,5 Nm @ 900 p/min ning maksimaalne pöörlemiskiirus 30000 p/min. Spindliga võimalik freesida, graveerida ja töödelda alumiiniume, plastikut, puitu, komposiitmaterjale ja muid mitteferriitseid metalle. Võimaldab kasutada tööriista pesasid suurustes: \varnothing 3mm, 3.175 mm, 4 mm, 6 mm ja 8 mm. [6]



Sele 2.18. Spindli jõu, väändemomendi ja kiiruste karakteristik.

2.10 Kontseptsiooni lahendus. CAD mudel

Antud lõikepink on *gantry* ehk portaal-stiilis. Lõikepingi maksimaalsed telgede sihilied liikumiskiirused on 10500 mm/min. Pingi konstruktsioon on modulaarne ning lahti-kokku käiv. Kõik pingi osad on kinnitatud poltliidetega. Pingil on oma elektrikilp, kuhu koondub kogu juhtmestik, elektroonika ja juhtseadmed. Lõikelaud on modulaarne ning lahti käiv. Võimalus on tugijalad eemaldada ning lõikelaud panna kas põrandale, lauale või muu pinna peale. Pingi kogukaal ligikaudu 207 kg (freelõike konfiguratsiooniga). Tehnilised joonised pingist on lisas 1 ning arvutirenderdused lisas 2.

2.10.1 Pingi raam

Pingi raam on keevistoode ning on valmistatud terasest S350. Raam tagab pingile vajaliku toetuspunkti, tugevuse ning jäikuse. Pingi raam on kogu konstruktsiooni üks kriitilisemaid osasid. Keskmistel taladel on avad lõikelaudade kinnitamiseks. Külgmiste toruprofilide mõõtmed: 80x60x5, sisemiste profiilide mõõtmed 60x40x4 40x40x4. Raami mõõtmed: pikkus 1900 mm, laius 1160, kõrgus 80 mm. Raami kaal 73 kg. Raam on näidatud seel 2.22.

2.10.2 Pingi tugijalad

Sõltuvalt kasutaja vajadustest, on pink võimalik üles seada kas valmis töölauale või neljale tugijalale. Jalad on valmistatud 5 mm paksusest lehtterasest S350. Pinnalaotus on välja lõigatud kasutades vesi-,plasma- või laserlõikust, seejärel on pinnalaotus painutatud, et anda talle vastav kuju. Jalgade all on reguleeritavad toed (ostutoode), mille abil saab pingi tasakaalustada ka ebatasasel pinnal. Jalad kinnitatakse raamile poltliite abil. Tugijalad on kujutatud seel 2.23.

2.10.3 X-telg ning selle ehitus.

Lineaarliikumise komponendid, mis moodusutuvad x-telje kinnituvad raamile poltliidete abil. See võimaldab liikuvate osade vahetust ning kergest hooldust ja transporti. X-telje moodustavad lineaarrööpad $\varnothing 16$ mm, koos kahe lineaar tugilaagriplokiga ühe rööpa kohta. Tugiplokid toetavad Y-telge.

X-telje mootor on 4 mm paksuset lehtterasest kronsteini abiga kinnitatud raami külge. Mootor on ühendatud elastse siduri abil kuulkruviga. Kuulkruvi toetab 2 laagriplokki ning laagriplokid on spetsiaalsete terasest freesitud kinnitusvahendite abil kinnitatud raamile. Raami külge on kinnitatud ka kaablikrae renn. Renni eesmärk on kaablikraed juhtida ja toetada. Renn on painutatud 1,5 mm paksusest lehtterasest. X-telje ülevaade on seel 2.24-2.26.

2.10.4 Y-telg ning selle ehtius.

Y-telje ehitus on *gantry* ehk portaal-stiilis. Telg koosneb kahest suuremast osast: põhiosast – mille ülesanne on kanda rööpaid ning ülekandvat kuulkruvi; tugisammastest – mille ülesanne on toetada põhiosa ja luua ühendus X-teljega. Tugisambad toetavad ka mootorit ja laagreid. Mõlemad konstruktsiooni elemendid on konstrueeritud kasutades 30x30x2,6 teras ruutprofiili. Konstruktsiooni elemendid on koostatud keevisliidet kasutades ning omavahel poltliitega ühendatud. Portaali osasi tugevdavad ka spetsiaalsed 5 mm paksusest terasest tugevdused, mis ühendavad poltliitega konstruktsiooni osasi. Mootor on kinnitatud ühele tugisambale 4 mm paksusest lehtterasest kronsteini abil. Mootor ja kuulkruvi on ühendatud elastses siduriga. Lineaarrööpad ja laagriplokid on samad nagu X-teljel. Ülevaade Y-teljest on seel 2.27-2.28.

2.10.5 Z-telg ning selle ehtius.

Z-telg koosneb kahest suuremast tugielemendist: Telgede plaadist, mille ülesandeks on tagada teljeline jäikus ning kanda laagreid, mootorit, rööpain ja kuulkruvi; tööriistahoidja plaat, mille ülesandeks on tagada tööriista XYZ teljeline jäikus, stabiilsus ja tugevus. Telgede plaat on freesitud terasest. Tööriista hoidja on freesitud alumiiniumist. Tööriistahoidja liigub kahe hiwin profiilrööpa peal ning seda toetavad 2 ristkülik lineaarlaagriplokki. Mootor on

kinnitatud telgedepaadile poltliite ja 4mm paksusest lehtterasest kronsteini abil. Mootori ja kuulkruvi on ühendatud elastse siduriga. Tööriista kandjal on ka universaalsed tööriistahoidjad, millest täpsem ülevaade on punktis. Z-telg kinnitub Y-teljel olevatele laagriplokkidele poltliite abil. Ülevaade Z-teljest on seel 2.29-2.30

2.10.6 Universaalne tööriistahoidja.

Kuna antud lõikepink töötleb materjali kahe erineva lõikevahendiga, siis on tarvis disainida lauale universaalne tööriistahoidja, mis võimaldab kasutajal lihtsalt ja kiirelt tööriista vahetada kasutades minimaalsel hulgal tööriistu. Hoidja ehitus on kahest osast. Põhiosa on universaalne ning jääb alati Z-teljel oleva tööriistakandja peale, vajadusek korral on seda süiski võimalik eemaldada. Tööriista poolne osa on sõltuvalt tööriistale unikaalne. Universaalse tööriistahoidja põhimõte on lihtne, põhiosal on kahe erineva raadiusega tööriista pesad. Suurem avad on spindli jaoks ning väiskem ava plasmalõikeriista tarbeks. Tööriistapoolne osa on mõlema tööriista jaoks eraldi valmistatud, mõlemad ühilduvad põhiosaga. Tööriista vahetamiseks on tarvis vahetada ainult tööriista poolne osa, mõlemad on kinnitatud kahe M5 poldiga. Ülevaade tööriistahoidjast seel 2.31.

2.10.7 Limiitlülitid ehk telgede piirdelülitid

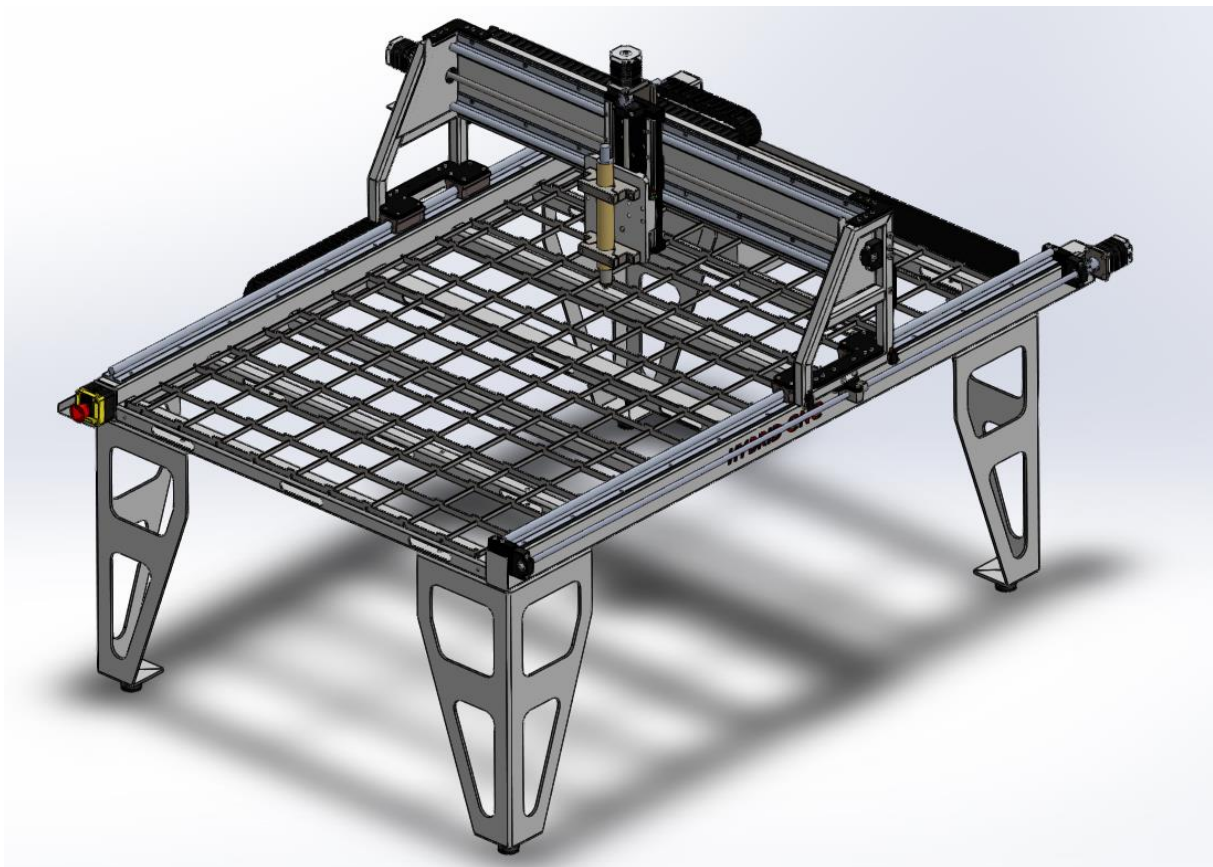
Lõikepingil on XYZ telje mõlemas suunas piirdelülitid, mis määravad ära kuhu maani teljed maksimaalselt liikuda saavad. Piirdelülititest ning nende asukohtadest parema ülevaate annavad seel 2.32-2.34.

2.10.8 Plasma ja freesimise töölaud

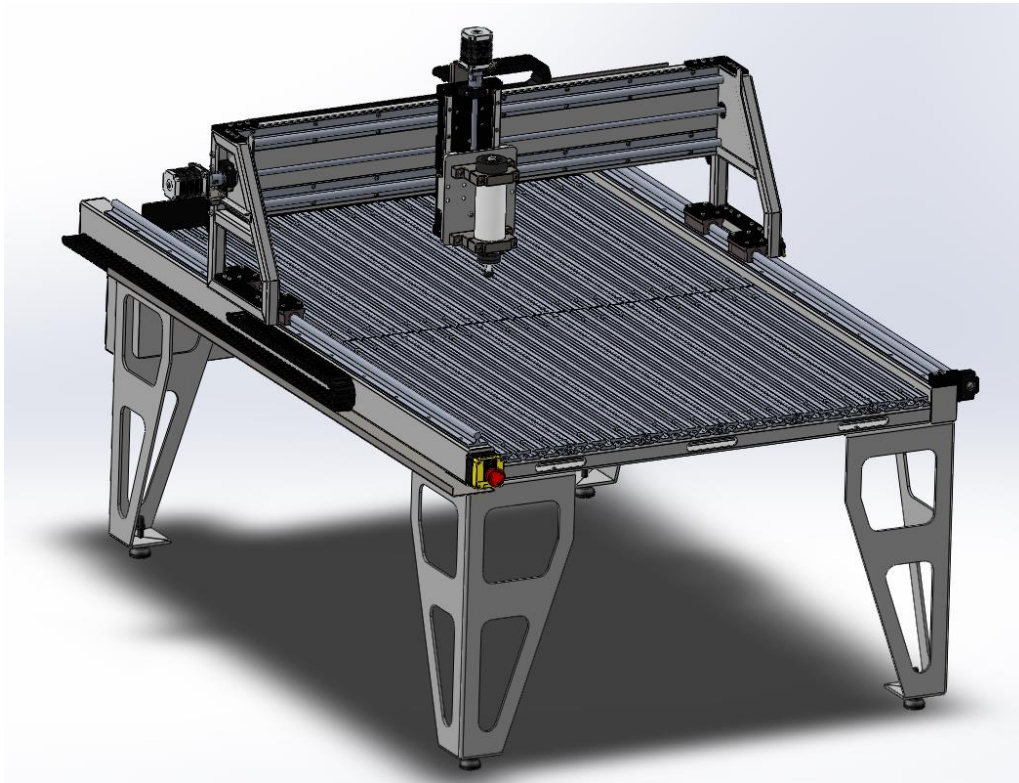
Vastavalt lõiketöötlusrežiimile on ka lõikelaual vastav töölaud. Töölauda vahetamiseks asetab vastavalt vajadusele operaator vastavad töölauda masinale. Töölauda vahetamiseks kulub maksimaalselt 15 minutit ning on võimalik teostada ühe operatoori poolt.

Plasmatöötuse tarbeks on vaja terasresti, mis toetab lehte ning võimaldab sädemetel ning jääkidel maha langeda. Terasrest on valmistatud 3 mm paksustest terasribadest mis on omavahel restiks keevitatud. Terasrestid on enim levinuimad laua tüübid plasmalõikuse tarbeks. Plasmalaud kinnitub raamile spetsiaalse kinnitusvahendi abil. Plasmalaud katab kogu tööala. Plasmalaua kogukaal 10 kg.

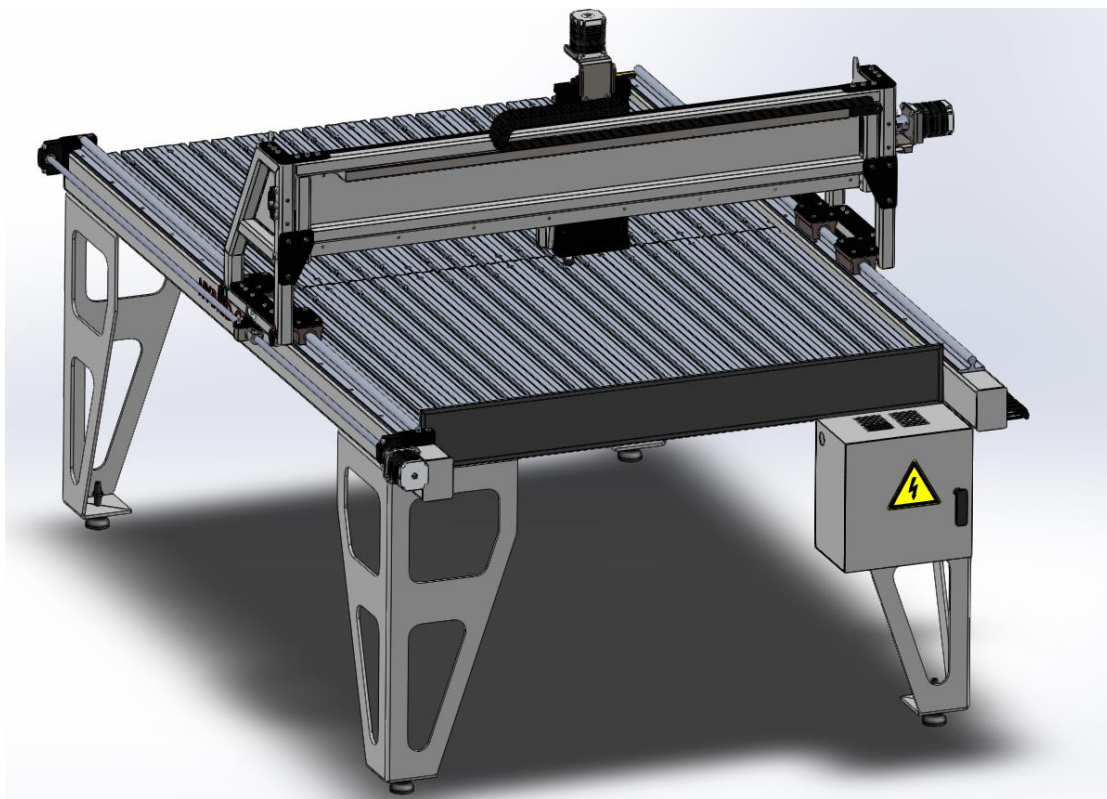
Freesimise tarbeks on vaja platvormi, kuhu on võimalus kinnitada erinevaid supporte ja toorikukinnitusvahendeid ning rakiseid. Selleks sobib spetsiaal alumiiniumprofiil, kus on sooned kinnitusmutrite tarbeks. Laud koosneb erinevatest moodulitest, ühe mooduli mõõtmed: 180x 22,5x 800 mm. Ühe mooduli kaal 4,1 kg. Poole töölaua katmiseks kulub ligikaudu 6 järjestikust moodulit kogukaaluga 24,6 kg. Profiilid on omavahel ühilduvad ning saab luua modulaarseid laudade konfiguratsioone vastavalt kasutaja vajadustele. Profiilid ühilduvad 10 mm t-mutriga mille abil on kerge erinevaid kinnitusvahendeid lauale kinnitada. Freesimis laud kinnitub raamile poltliite abil. Ülevaade töötuslaudadest seledel 2.35-2.37.



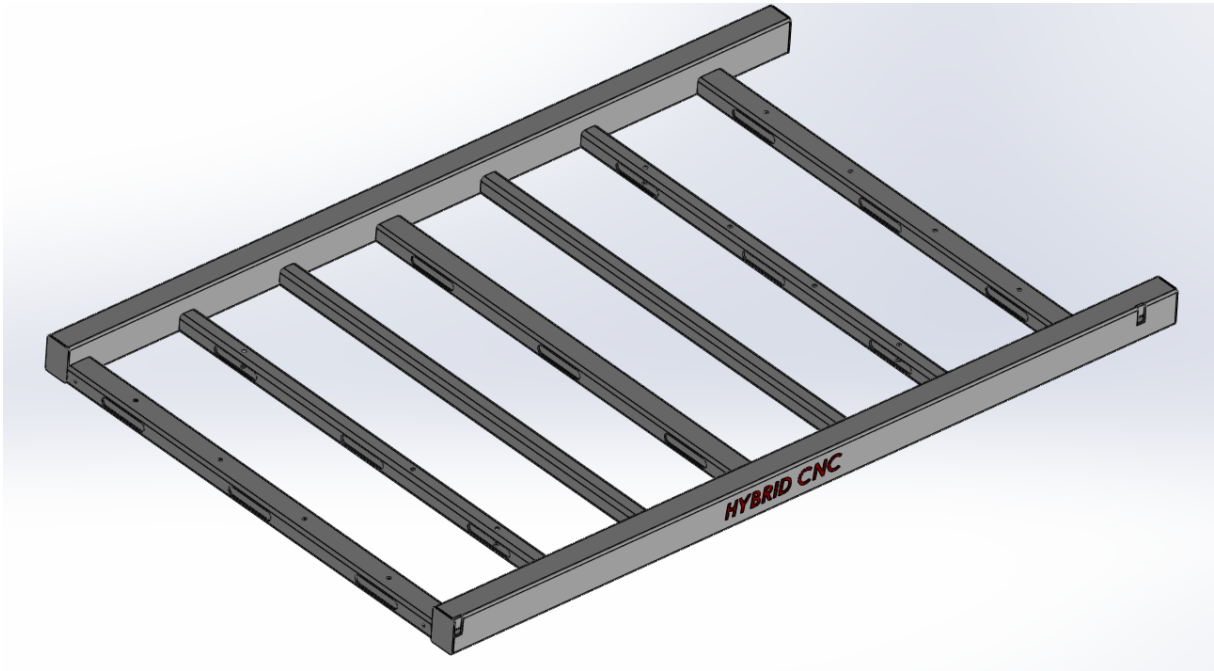
Sele 2.19. Lõikelaud plasmalõikus režiimil.



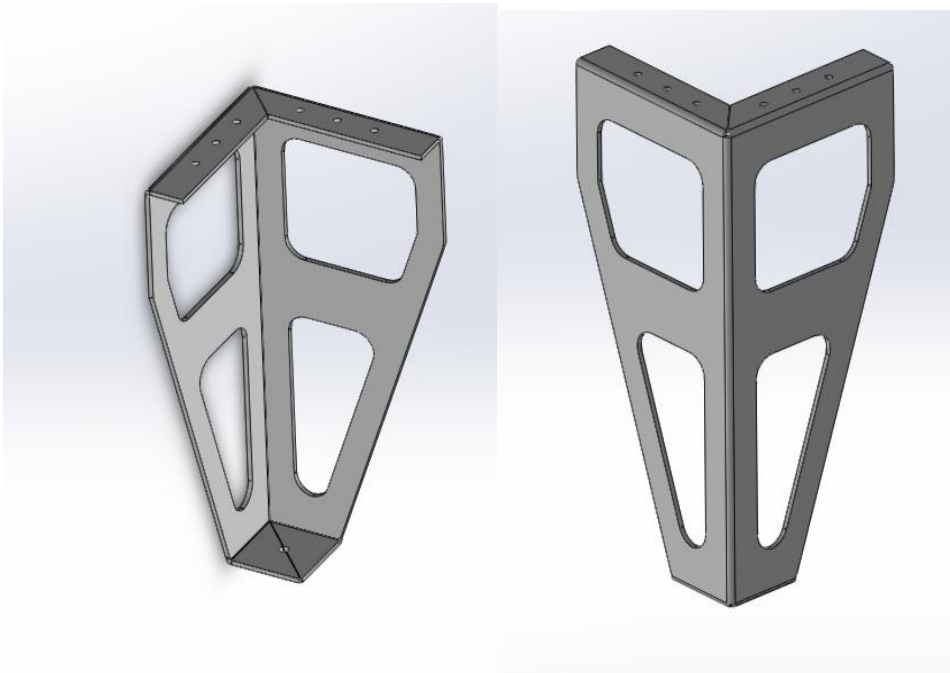
Sele 2.20. Lõikelaud freesimis režimil.



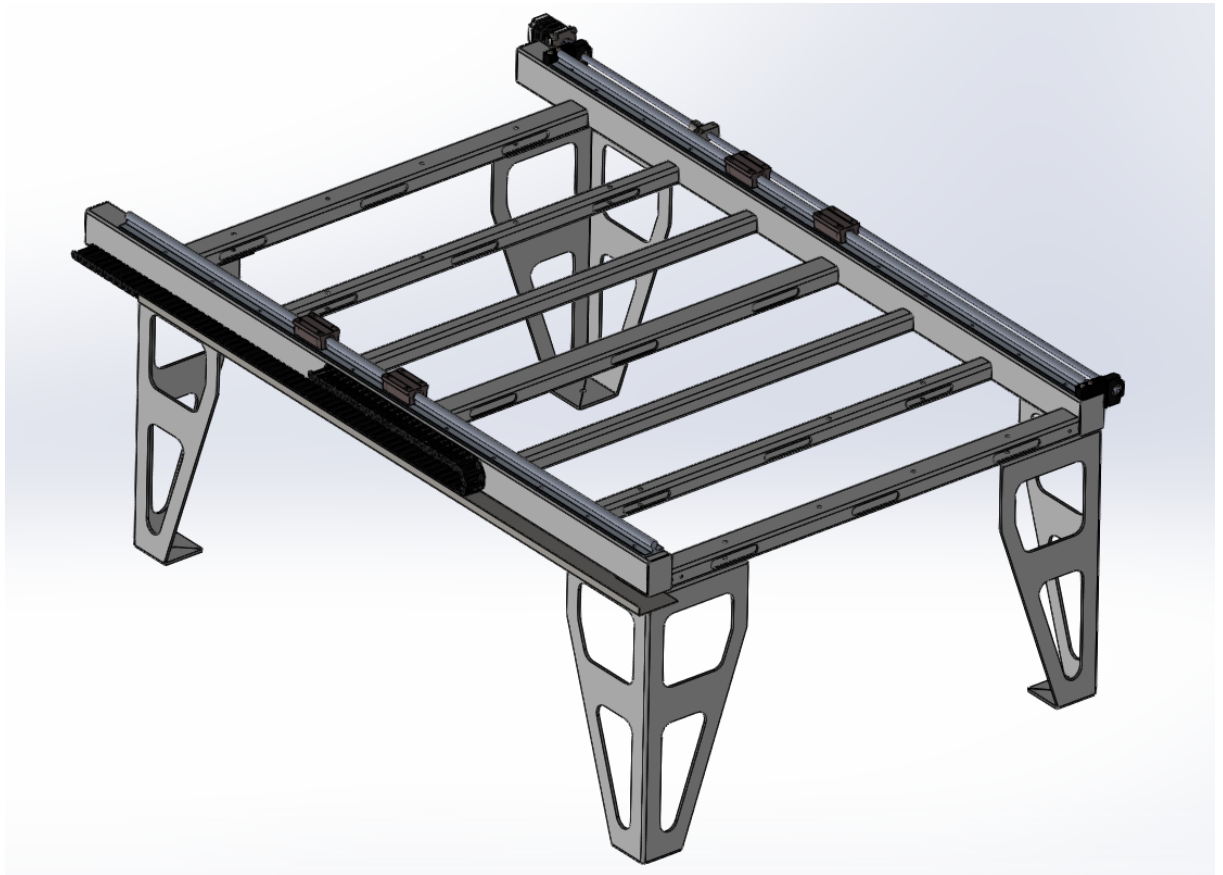
Sele 2.21. Lõikelaud tagantvaates.



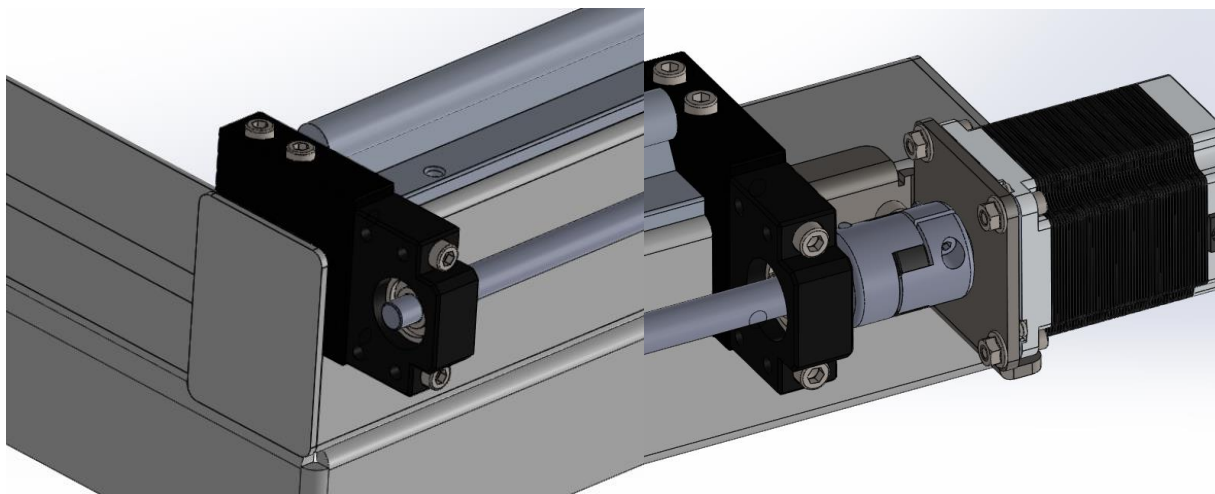
Sele 2.22. Pingi raam



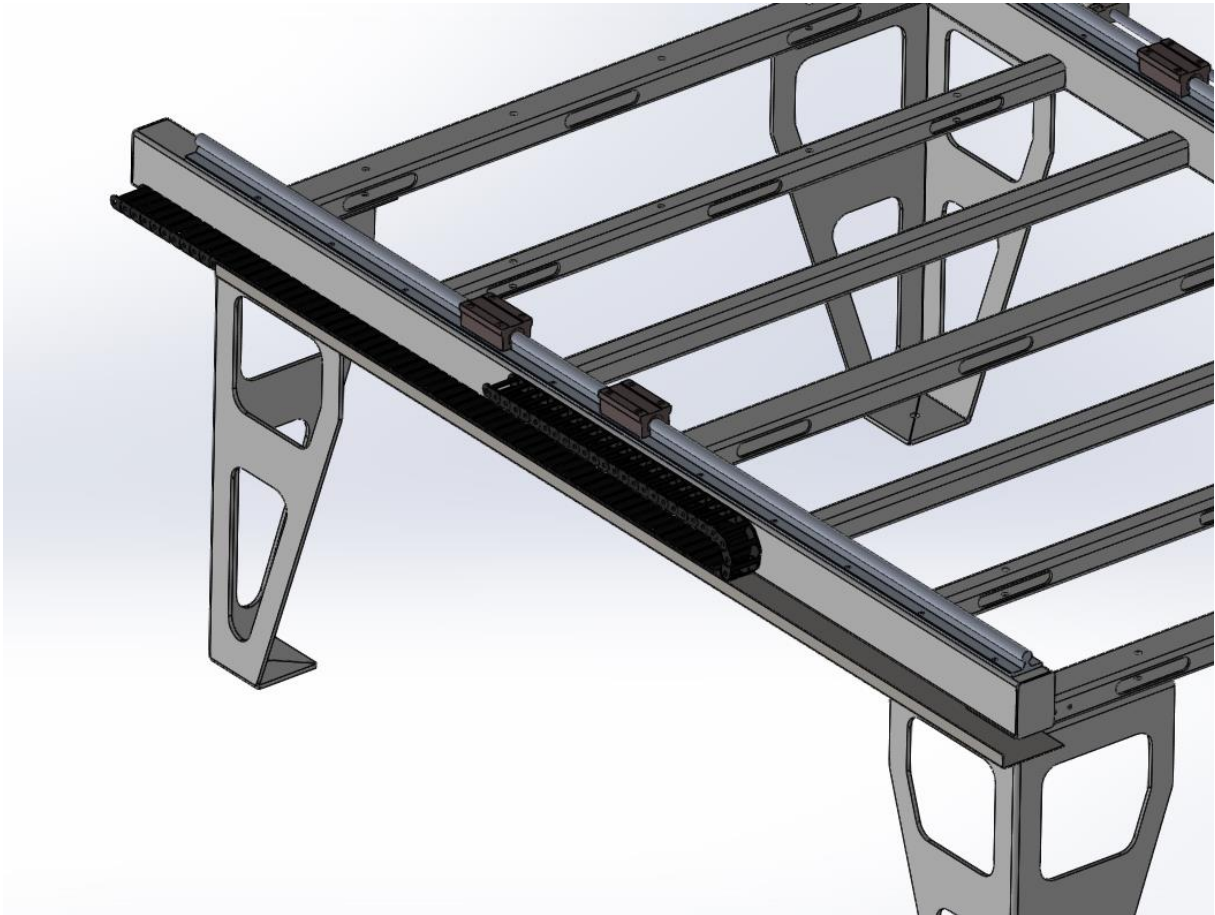
Sele 2.23. Tugijalad



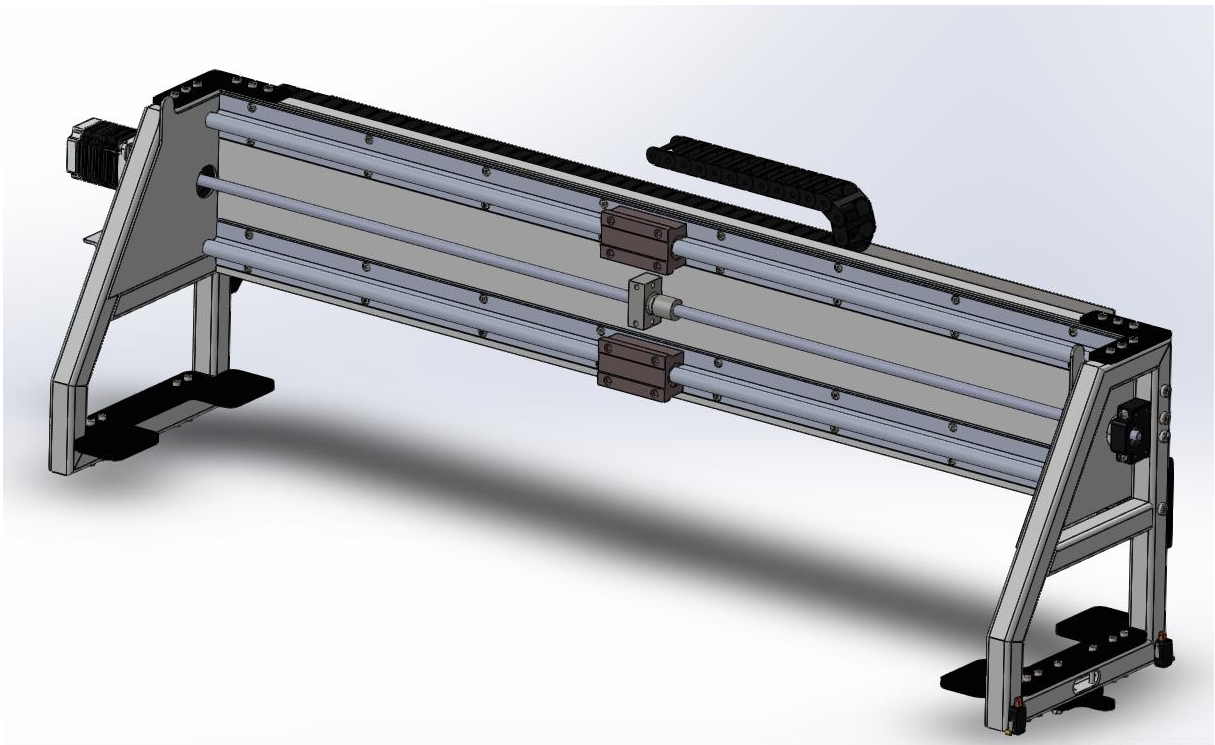
Sele 2.24. X-telje ülevaade



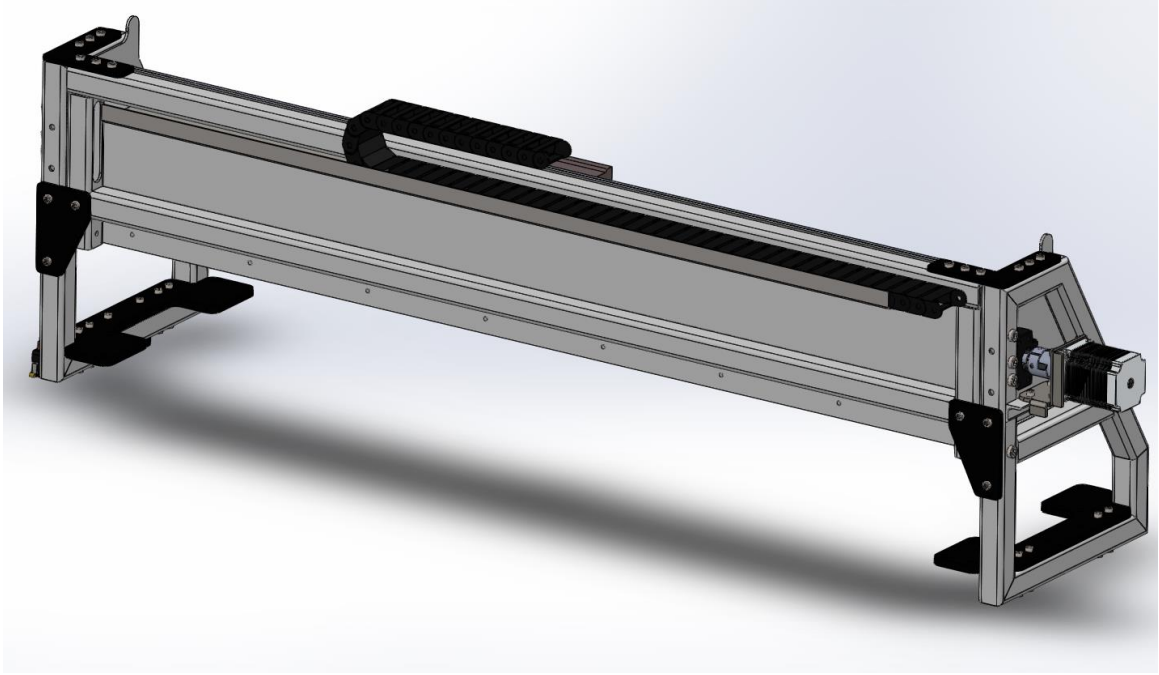
Sele 2.25. X-telg mootori ja kuulkruvi ühendus



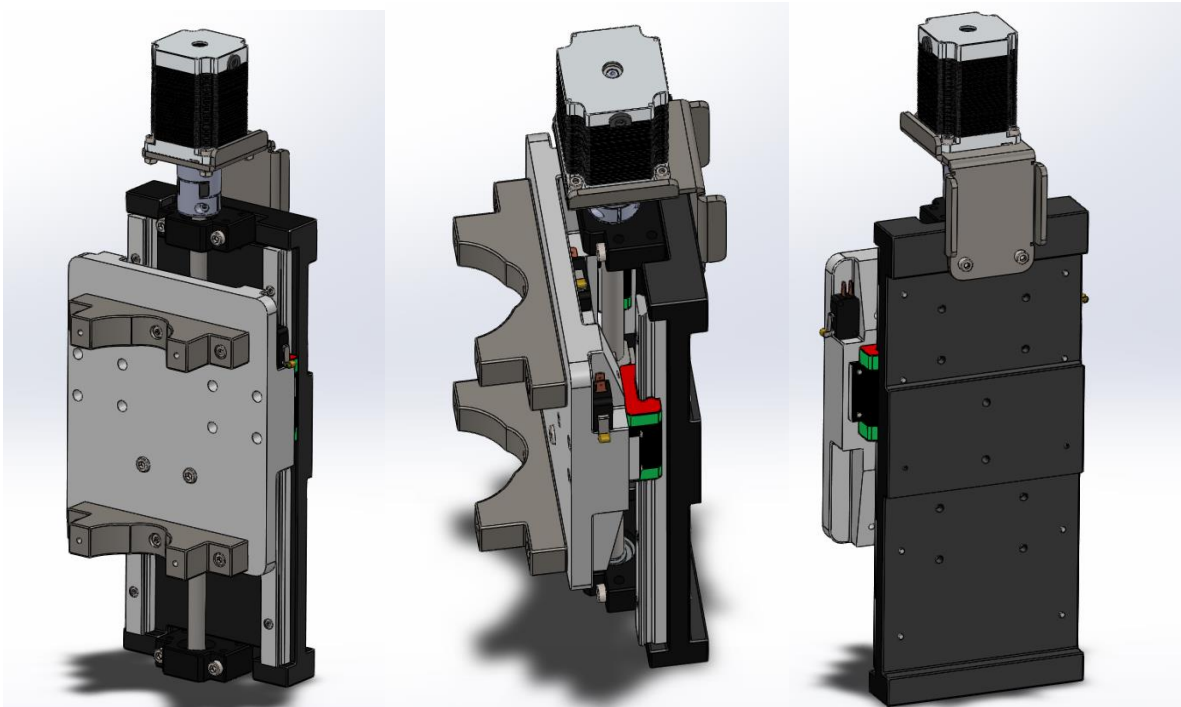
Sele 2.26. X-telg ja kaabli kanal



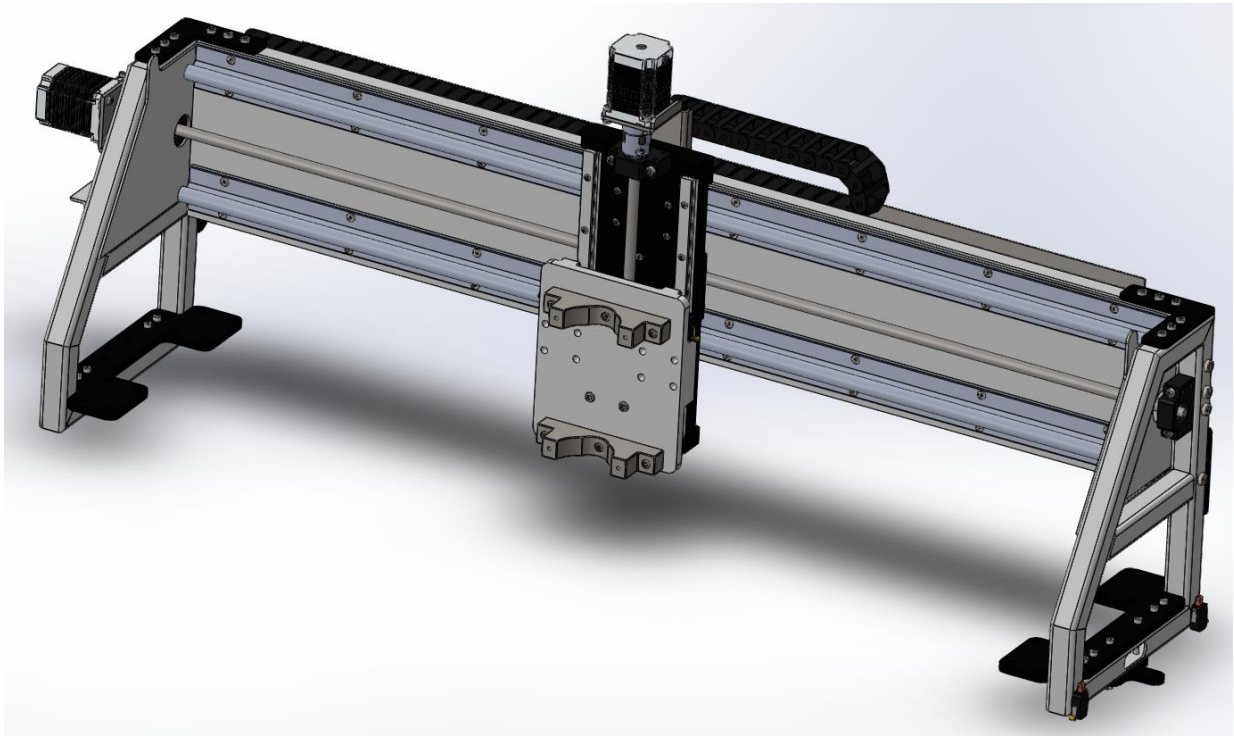
Sele 2.27. Y-telje ülevaade eest



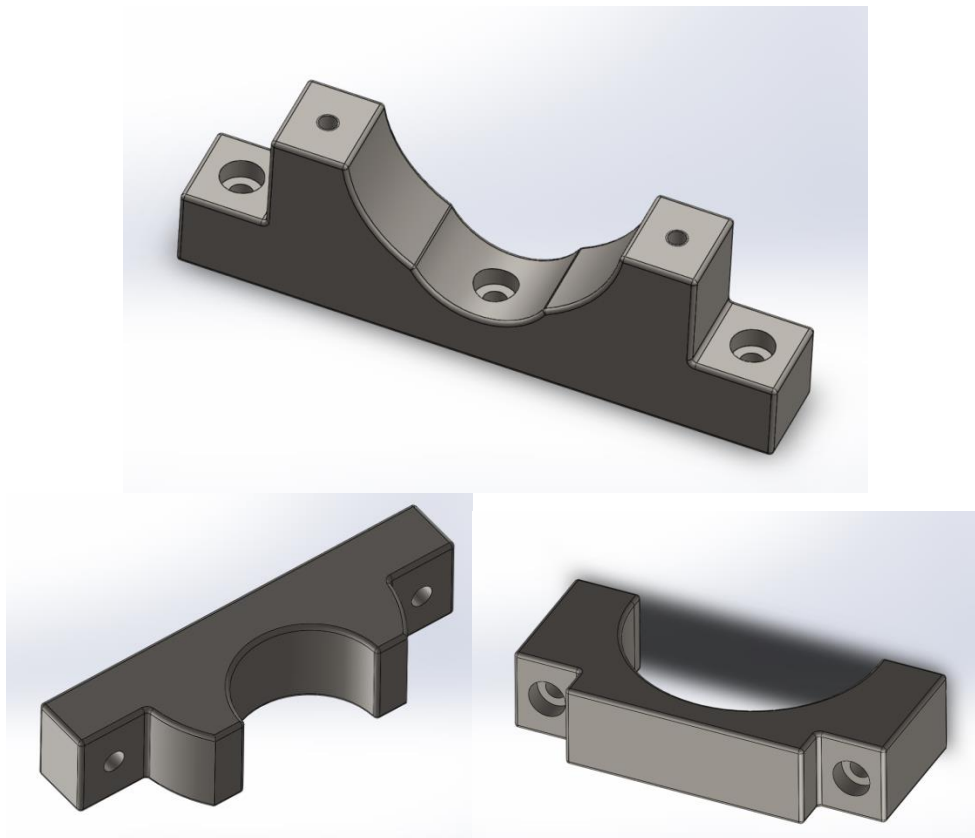
Sele 2.28. Y-telje ülevaade tagant



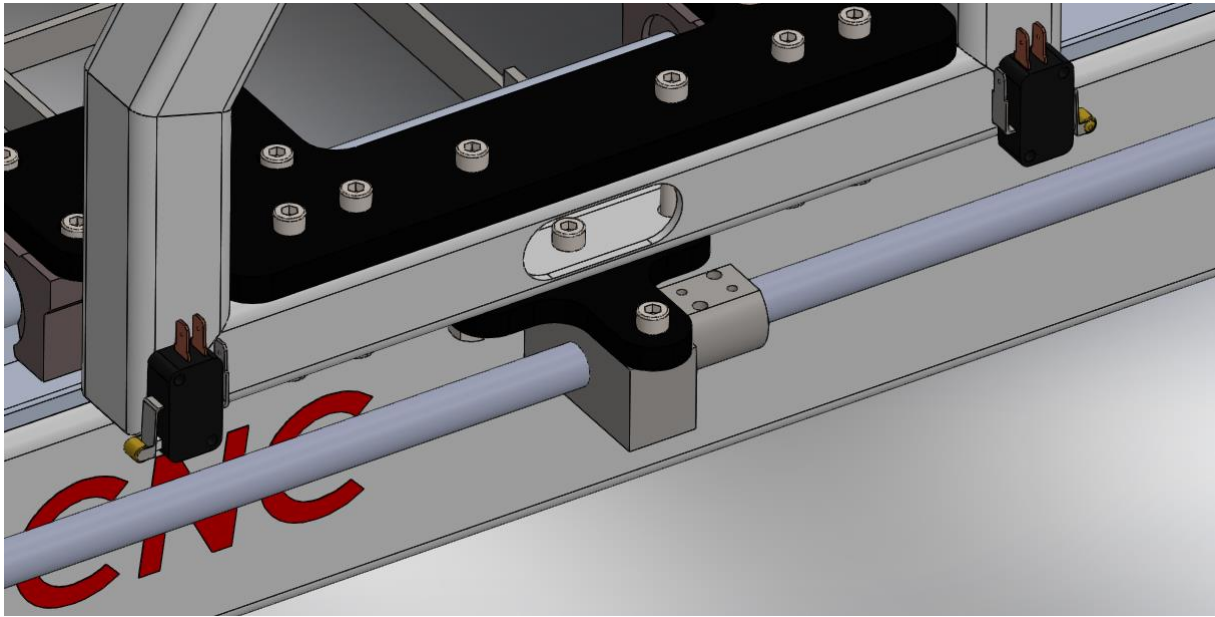
Sele 2.29. Z-telje ülevaade.



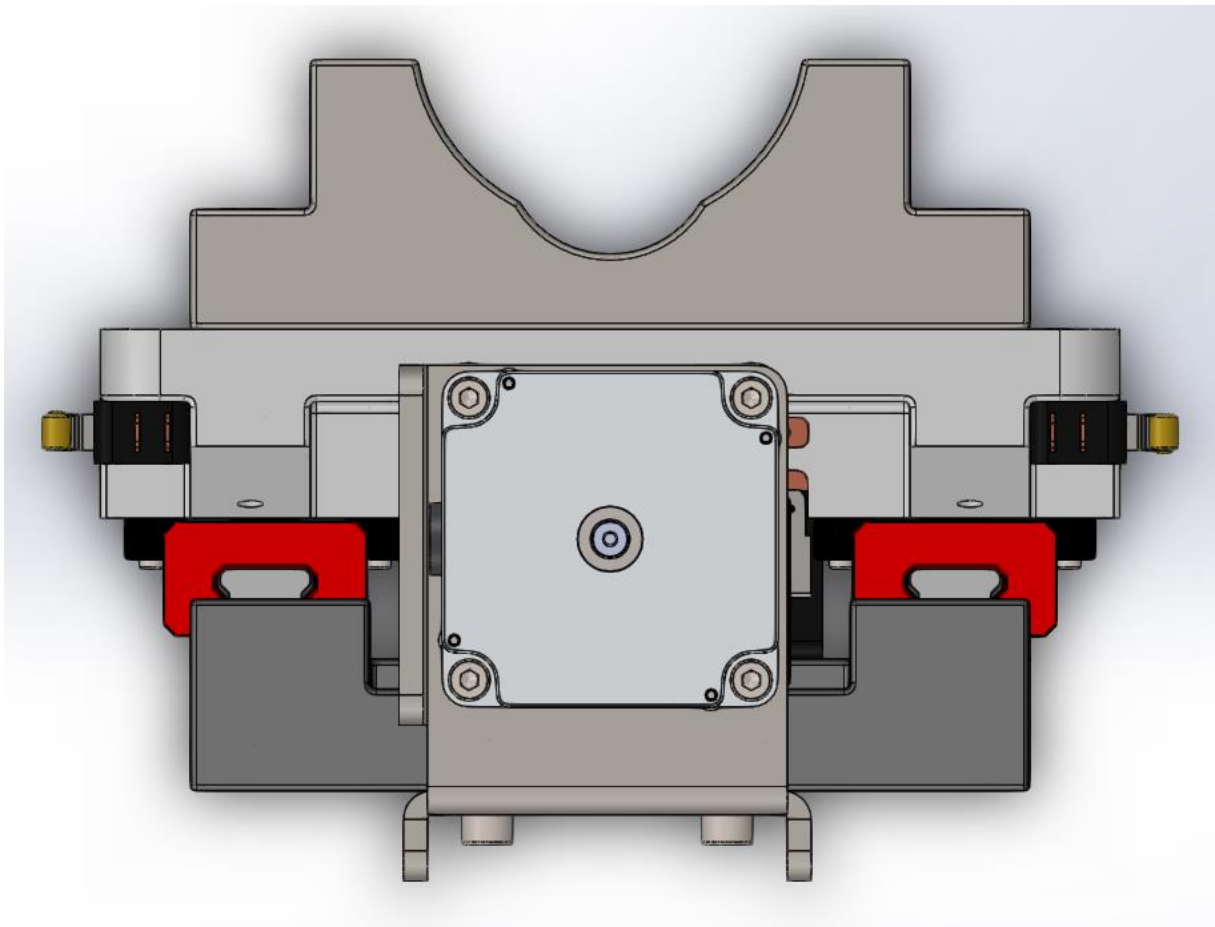
Sele 2.30.YZ-telje ülevaade.



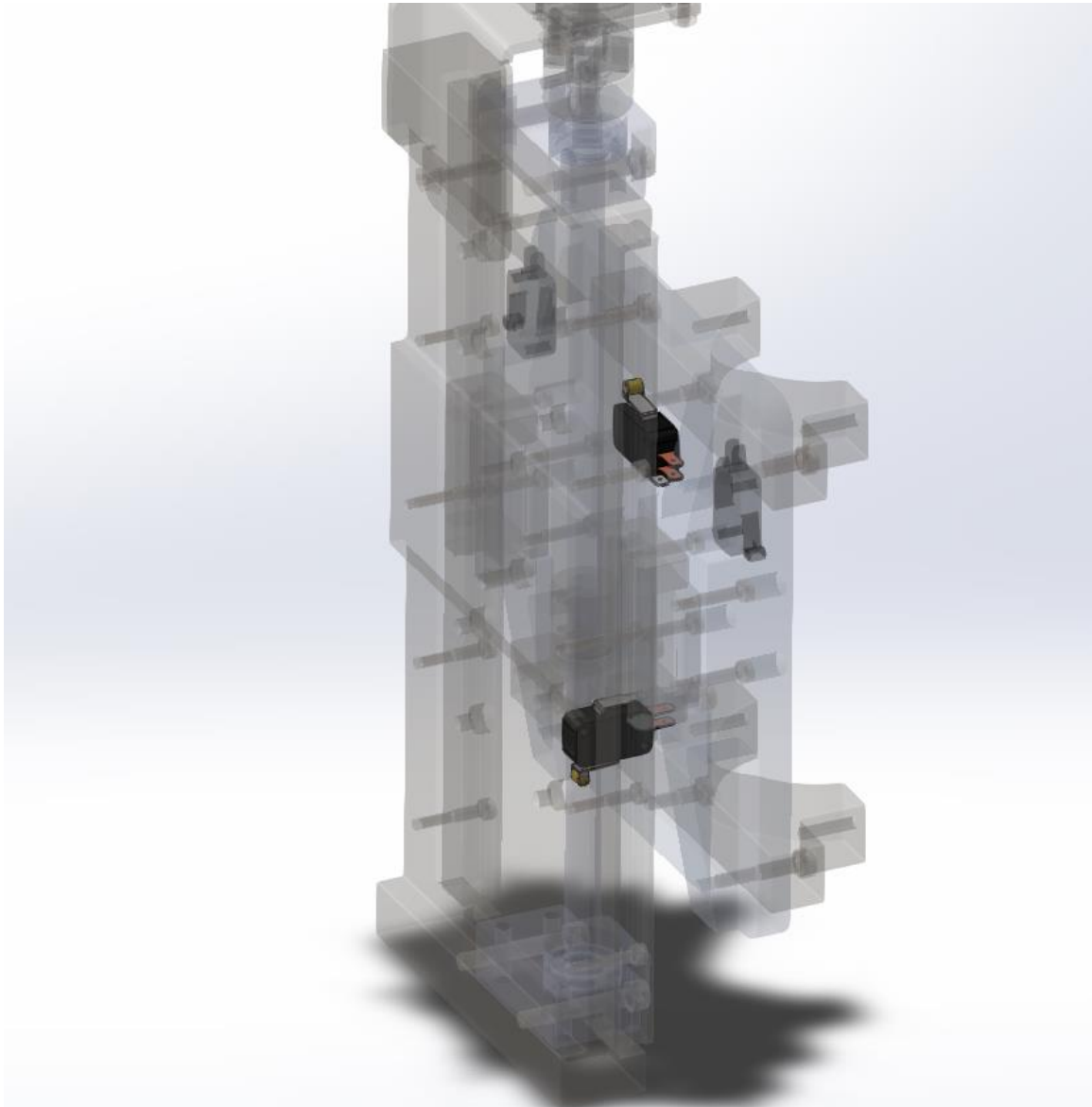
Sele 2.31. Universaaltööriistahoidja. Üleval põhiosa, vasakul plasmalõikeriista kinnitus, paremal spindli kinnitus.



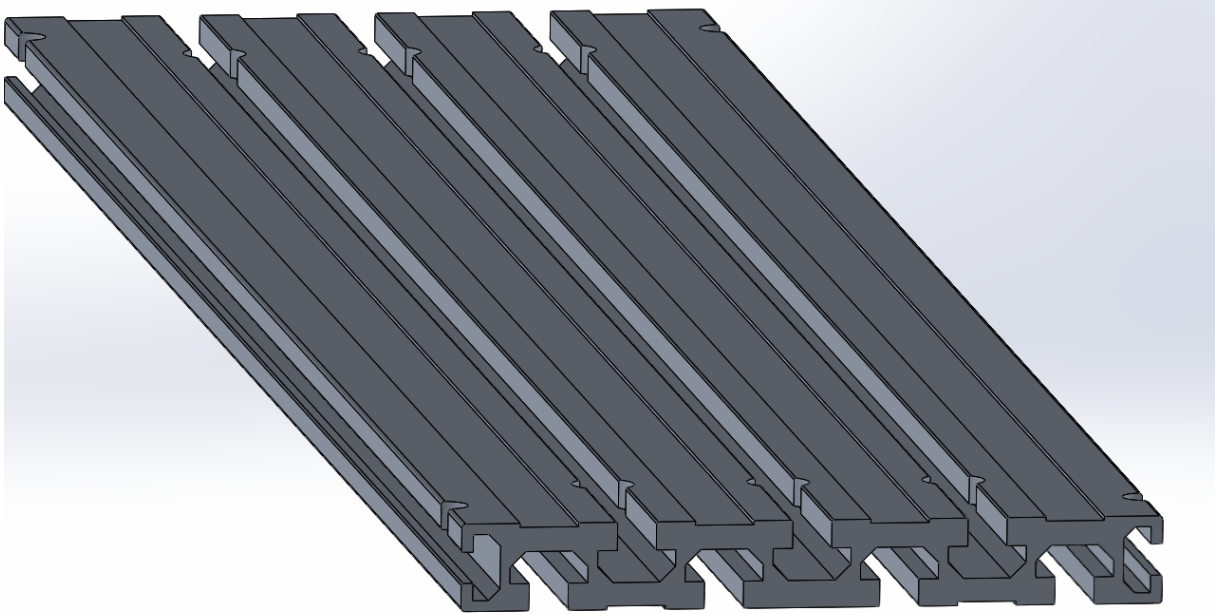
Sele 2.32. X-telje püirdelülitid



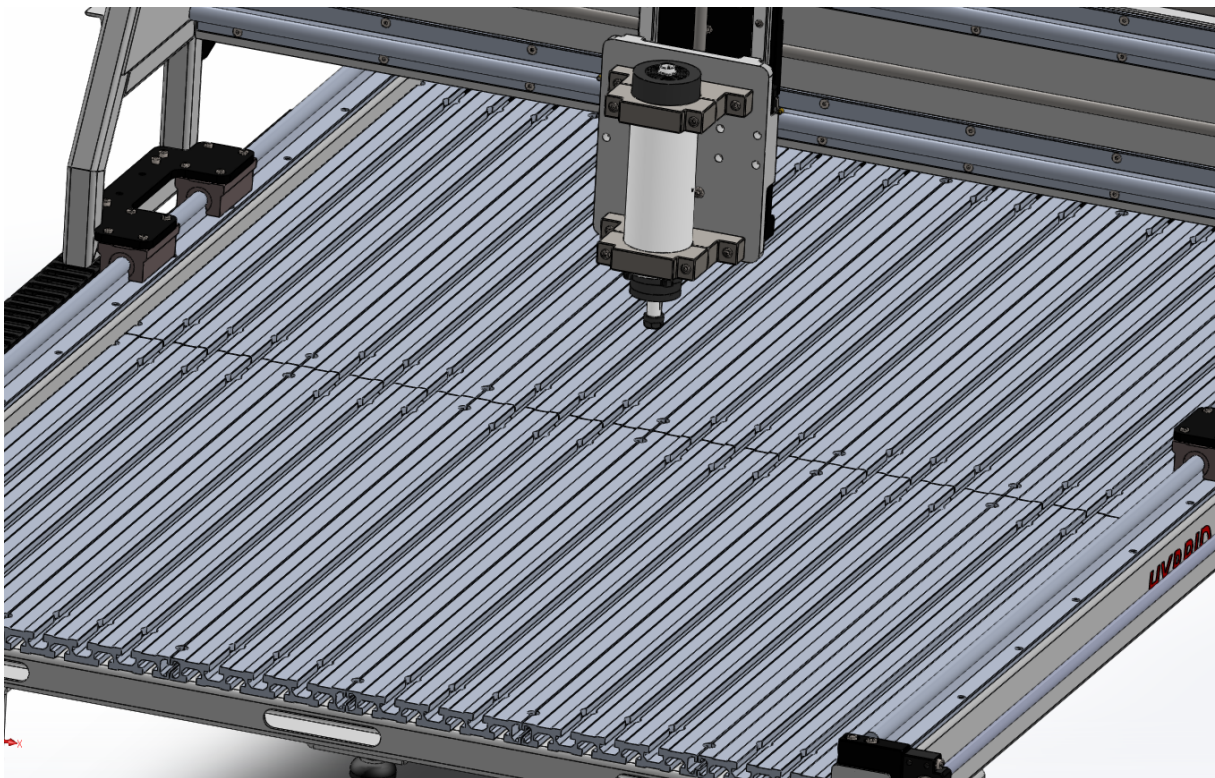
Sele 2.33. Y-telje püirdelülitid



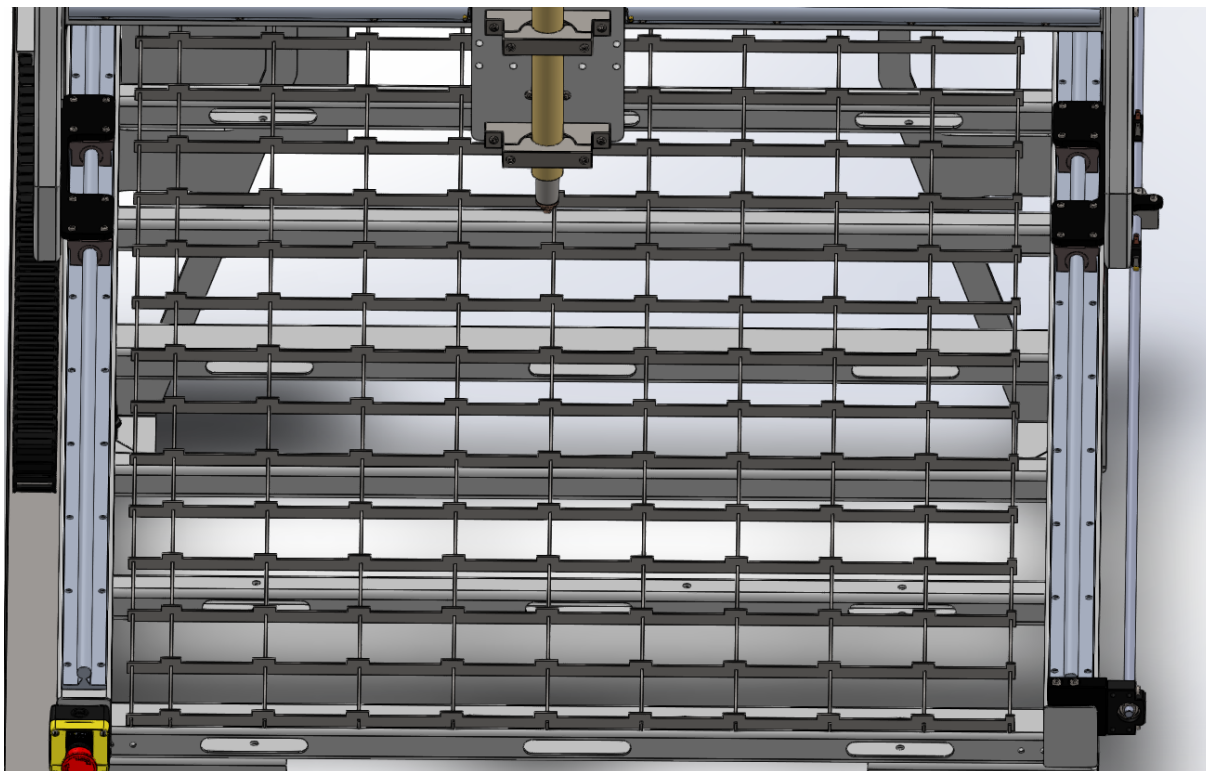
Sele 2.34. Z-telje p irdel l tid



Sele 2.35. Freeslaua alumiiniumprofiil moodul



Sele 2.36. Ülevaade freeslauast.



Sele 2.37. Ülevaade plasmalauast

2.11 Elektroonikakomponendid ning juhtseadmed

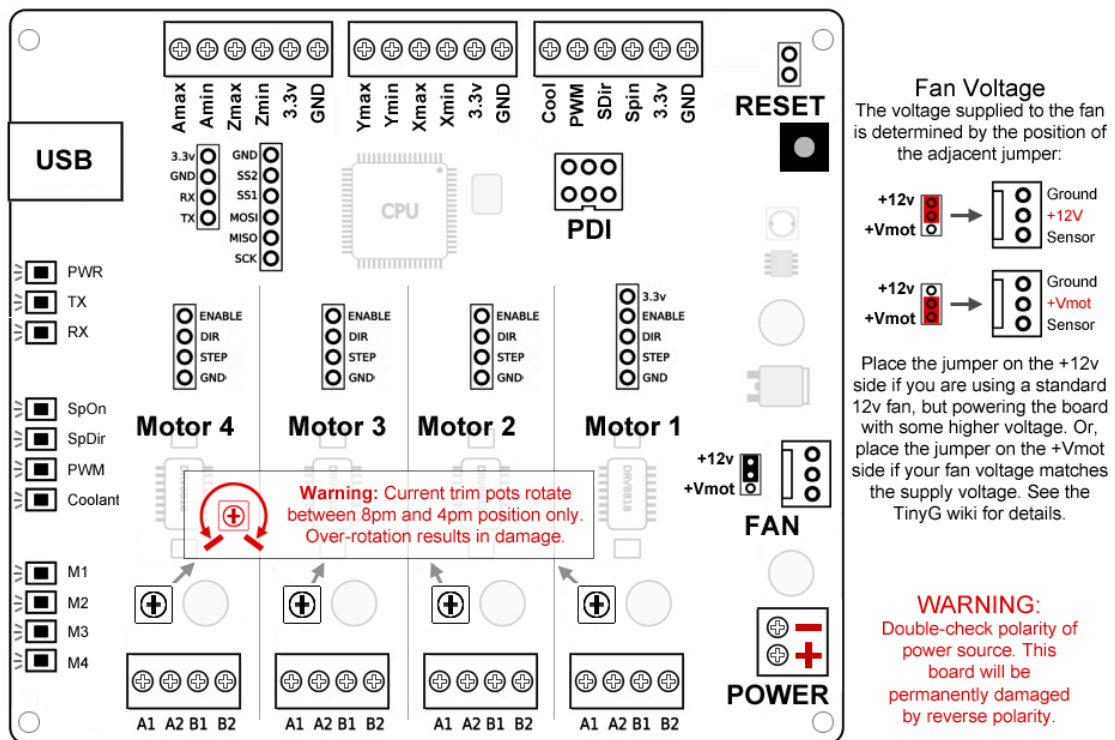
CNC lõikepingi juhtimiseks on vajalikud järgmised elektroonikakomponendid:

- Kontroller
- Mootori draiverid
- Stepper mootorid
- Süsteemi toide
- Juhtmestik
- Telgede limiitandurid
- Arvuti koos tarkvaraga
- Plasma ning spindli vaheline ümberlülitusplaat
- Jahutus
- Juhtprogramm

2.11.1 Kontroller

Kontroller on süsteemi aju. Kontrollerisse tulevad kõik CNC pingis olevate seadmete ühendused mootoritest kuni telgede limiitlüliteni. Sobivaks kontrolleriks on TingyG kontroller. Kontroller võimaldab juhtida 6-telgseid CNC masinaid ja 4 mootori juhtimist. Antud kontrollerisse on juba sisseehitatud neli 2 pooliga stepper-mootorite draiverit (TI DRV8811), seega pole tarvilik eraldi draivereid stepper-mootorite jaoks paigaldada. Draiverid toetavad nii bipolaarseid kui unipolaarseid stepper-mootoreid. Kontrolleri lihtsustatud skeem on seel 2.38. Kontrolleri parameetrid:

- Stepper-mootori draiveri vool: max 2.5 A pooli kohta
- 1/8 mikrosammumise võimalus
- Ühendatav võrku ning teiste kontrolleritega RS485 abil suuremate seadmete tarbeks
- 6- telje kontrollilimine (XYZ + ABC pöörlevad teljed)
- Võtab vastu G-koodi otse USB ühendusest.
- Eraldi algoritmid liikumiste kiirendamiseks ja joonte ning kaarte silumiseks.
- Sujuv sammu sageduse generatsioon.
- Tööpinge: max 30 V



Sele 2.38. CNC kontrolleri TinyG

2.11.2 Stepper mootorid

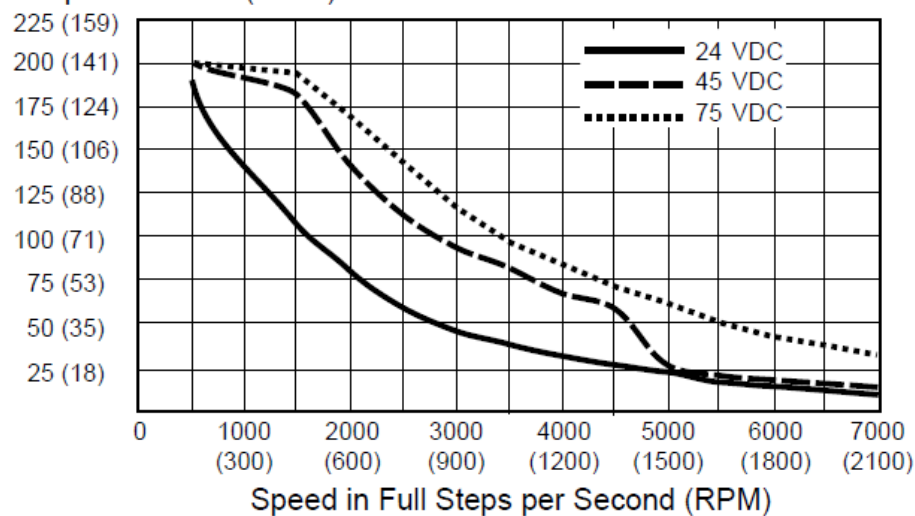
Urvides mootorite turgu ning muid turul olevaid CNC lõikeseadmeid oleks sobilik kasutada NEMA23 klassi stepper mootoreid. Mootori maksimaalne väändemoment 169 Ncm @ 300 p/min, 24V. Maksimaalne pöörete arv minutis 2100 [11]. Mootori karakteristik on kujutatud seel 2.39.

Mootori M-2231-2.4 parameetrid:

- Hoidemoment: 169 N-cm
- Rootori inerts 0.468 kg-cm²
- Kaal 1000 g
- Faasi vool 2,4 A

M-2231-2.4

Torque in Oz - In (N-cm)



Sele 2.39. Mootori karakteristik

2.11.3 Süsteemi toide

Süsteemil on vaja eraldi toidet, kuna mootorid ning kontrollid ei tööta seinast tuleva 220 voldiga. Sobivaks toiteks on SP-320-24 alalisvoolu toiteplokk. Toiteploki parameetrid:

- Väljundpinge: 24 V
- Väljundvooluvahemik: 0 ~ 13 A
- Võimsus: 312 W
- Efektiivsus: 88%
- Kaal: 1,1 kg

Arvutame tarbitava vooluhulga

$$I = w * I_m * z = 2,4 * 2 * 3 = 14.4 A \quad (3)$$

Kus,

I - tarbitav vooluhulk

I_m - mootori voolutarve

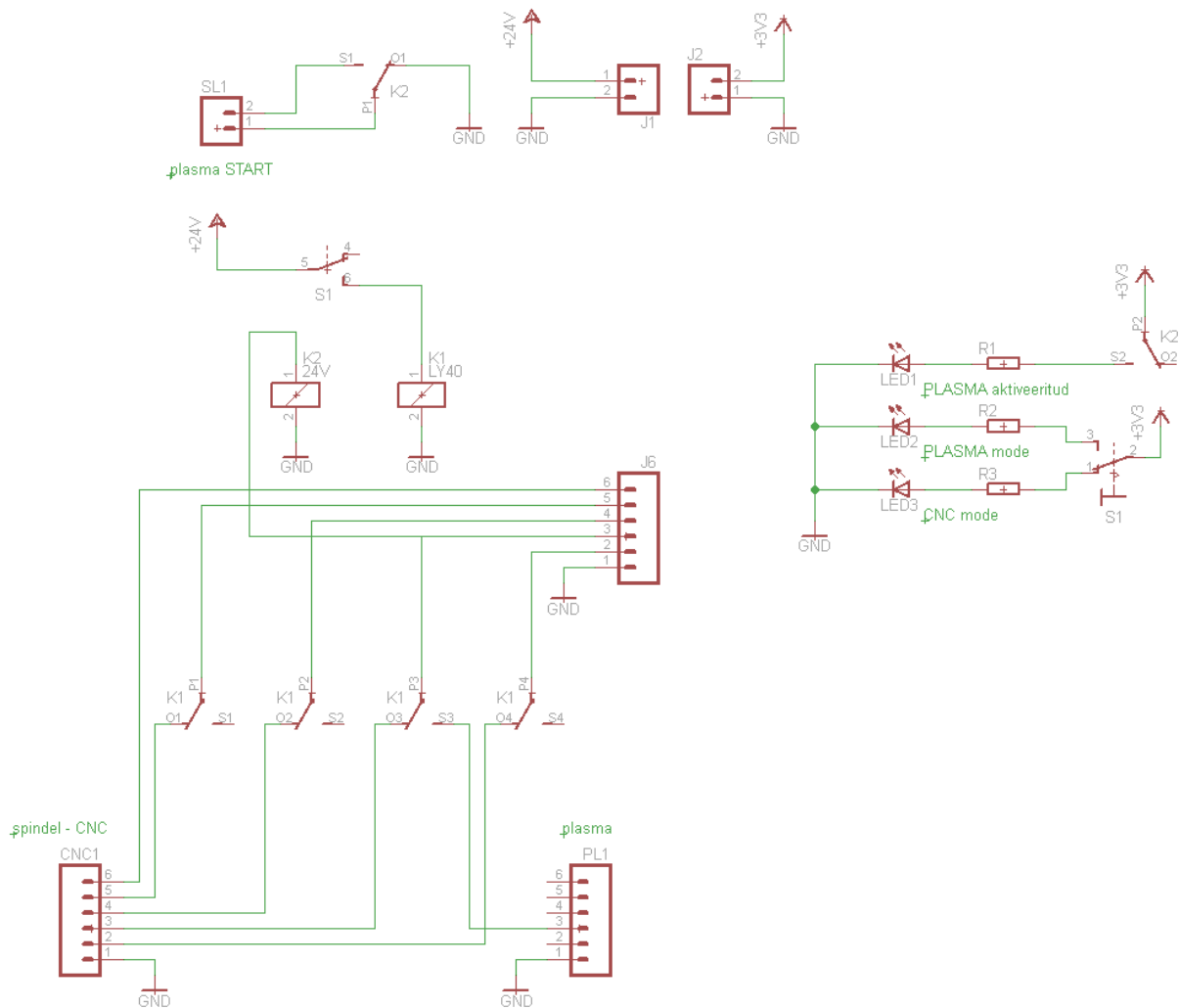
Z - mootorite arv

w - poolide arv draiveris

Lähtudes reaalsusest, siis korraga ei tööta kunagi maksimum kiirusel kõik mootorid, plasmalõike juhul töötaksid maksimumil ainult 2 mootorit ja Z-telje mootor ei töötaks. Seega maksimum reaalne voolutarve oleks 9.6 A [18]. Antud toide sobib!

2.11.3 Ümberlülitusplaat

Ümberlülitusplaat on vajalik selle jaoks, et võimaldada kasutajal lihtsalt lülitada plasmalõikeselt freesimisele ja vastupidi. Vastavalt režiimile põleb ka vastav tuld, ning kasutajal on võimalik visuaalselt kindlaks teha mis režiimil masin töötab. Ümberlülitus plaat ühendatakse kontrolleri otsa J6 abil. Plaat koosneb enamjaolt releelülititest. Ühendisviigud lähevad erinevatelt kontaktidelt eraldi tööriistadesse (spindel ja plasmalõikur). Kasutaja saab lüliti abil valida ühe neist lõigates ära kontki teisega.



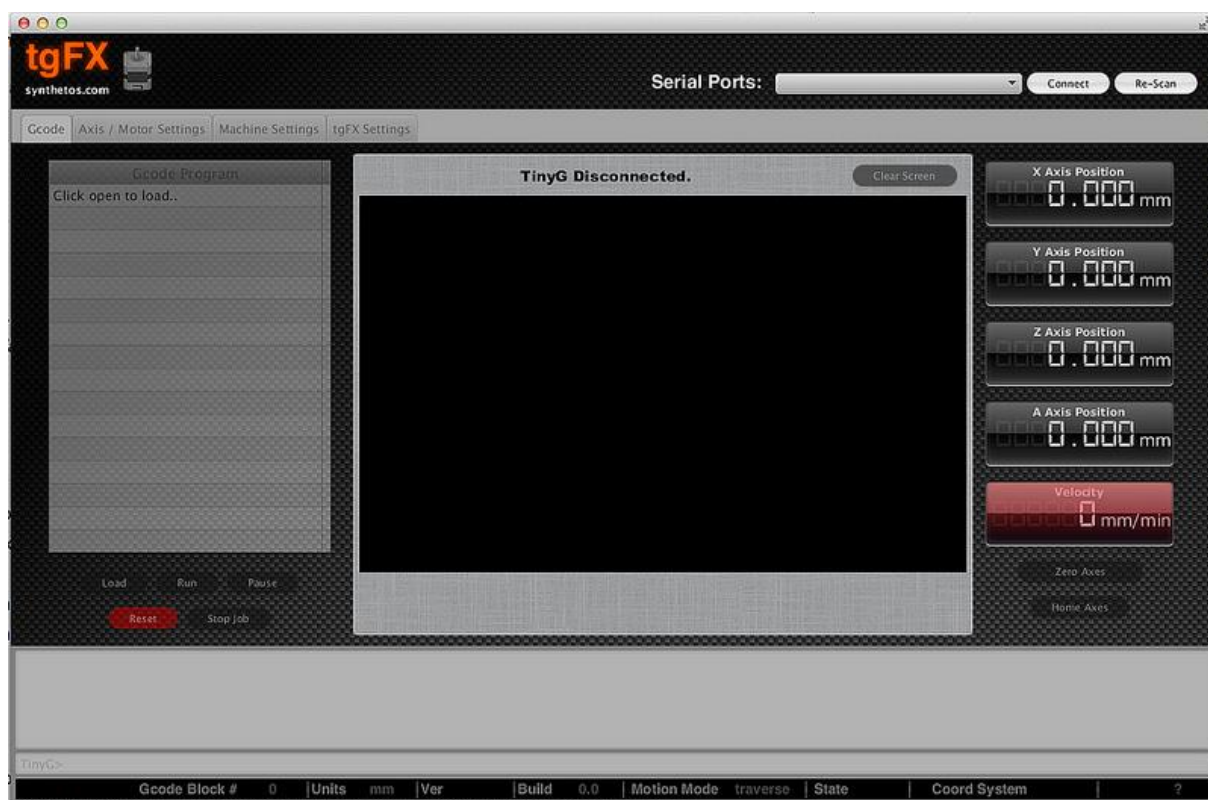
Sele 2.40. Ümberlülitusplaadi skeem. J6 – ühendus kontrolleri, PL1 – ühendus plasmaga, CNC1- ühendus spindliga.

2.11.4 Jahutus

Opereerides nema 23 mootoriga, maksimum kiirustel, võivad kontrollerial tekkida jahutusprobleemid. Selle tarbeks oleks vaja kontrollerial õhkjahtust, mis suunaks kuuma õhu välja ja lükkaks külma õhku peale. Antud kontrolleri jahutamiseks sobivad standardsed 12V ventilaatorid.

2.11.5 Juhtprogramm

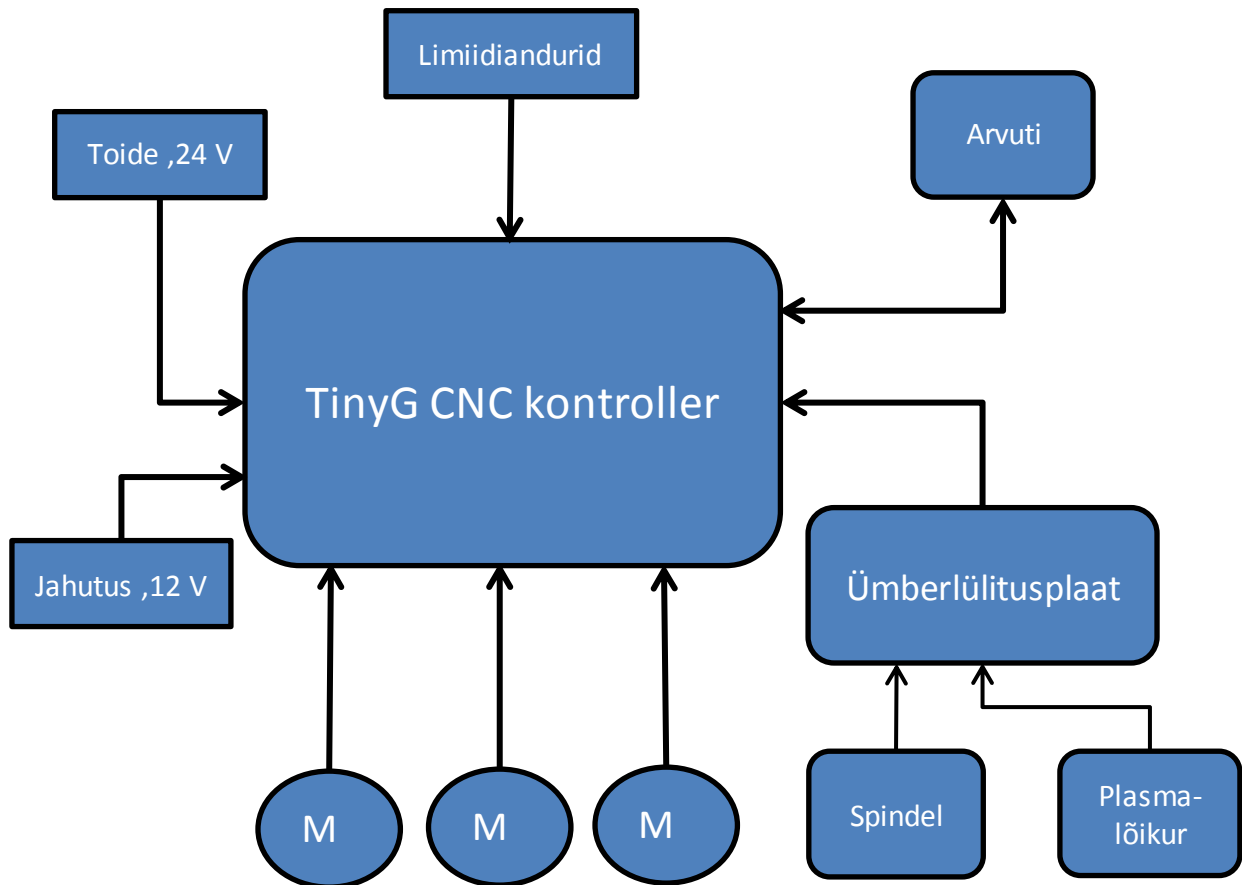
Sobivaks juhtprogrammiks TinyG kontrolleri jaoks on tgFX tarkvara. Tarkvara võimaldab kasutajal kontrolleri juhtida, seadistada ning masinale vastavaid töökäsked sisse anda. Samuti on võimalik masinat reaalajas juhtida. Juhtprogramm töötab standartse arvutiga, nii Windows kui ka OSx operatsioonisüsteemi kasutades.



Sele 2.41. tgFX kasutajaliides.

2.11.6 Ühendusskeem

Antud skeem annab ülevaate elektroonikaühendustest ning komponentidest



Sele 2.42. Elektroonika ühendusskeem

2.12 Lõikepingi maksumus

Lõikepingi ligikaudne maksumus. Komponentid on valitud veebipõhistest kataloogidest ja poodidest ning hinnad sisaldavad käibemaksu.

Eeldates, et plasmalõikur on juba ettevõttel või kasutajal olemas, tuleks pingi ligikaudseks hinnaks: **2755 €**

	Kogus	Ühiku hind	Kokku	%
Konstruksiooni materjalid				
Alumiinium	4,0	3,5	14,0 €	
Teras	151,0	1,1	158,6 €	
Muu			- €	
		Kokku	172,6 €	1,73%
Lineaarliikumise süsteemi osad				
Lineaarrööbas, juhtplokk 1600 mm	2,0	140,0	280,0 €	
Lineaarrööbas, koos juhtploki 1100 mm	2,0	120,0	240,0 €	
Hiwin lineaarrööbas, 300 mm	2,0	45,0	90,0 €	
Hiwin rööpa, juhtplokk	2,0	40,0	80,0 €	
Kaablivedaja, 15x50mm, 1m	3,0	20,0	60,0 €	
		Kokku	750,0 €	7,53%
Jõuülekanne komponendid				
Kuulkruvikoost, 12x1600 mm	1,0	150,0	150,0 €	
Kuulkruvi koost, 12x1150 mm	1,0	115,0	115,0 €	
Kuulkruvi koost, 12x350 mm	1,0	80,0	80,0 €	
Elastne sidur, 6x10 mm	3,0	7,0	21,0 €	
Nema 23 mootor, 2.4A	3,0	32,0	96,0 €	
Muu			- €	
		Kokku	462,0 €	4,64%
Elektronika komponendid				
TinyG kontrolleri	1,0	170,0	170,0 €	
Limiitlüliti	6,0	1,0	6,0 €	
Jahutus, 12V ventilaator	2,0	5,0	10,0 €	
Elektrikilp	1,0	25,0	25,0 €	
Toide, 24V 13A	1,0	97,0	97,0 €	
Arvuti komplekt	1,0	400,0	200,0 €	
Ümberlülitusplaat	1,0	25,0	25,0 €	
Muu elektronika	1,0	20,0	20,0 €	
Ohulüliti	1,0	6,0	6,0 €	
		Kokku	559,0 €	7,62%
Muud osad				
Reguleeritavad jalad, M12x 50 mm	4,0	5,0	20,0 €	
Kinnitusvahendite komplekt	1,0	50,0	50,0 €	
		Kokku	70,0 €	0,70%

Lõikeseadmed				
Spindel	1,0	500,0	500,0 €	
Plasmalõikur powermax 125	1,0	7000,0	7 000,0 €	
		Kokku	7 500,0 €	75,33%
Töötused ja muud teenused				
Keevitus	1,0	84,0	84,0 €	
Painutus	1,0	18,0	18,0 €	
Transport	1,0	100,0	100,0 €	
Värvimine	1,0	30,0	30,0 €	
Laserlõikus	0,1	100,0	10,0 €	
		Kokku	242,0 €	2,43%
KOKKU			9 755,6 €	

Tabel 2.3. Pingi hinnakalkulatsioon

3.ARVUTUSED

3.1 Laagrite elueaarvutus

Valitud laagrid töötavad antud masinas kahel erineval koormustasandil. Lõiketöötusel on radiaalsuunalised ning aksiaalsuunalised jõud suured, aga pöörded väiksed. Plasmalõikusel on koormused väikesed, kuid pöörlemiskiirused suured. Teostame arvutused mõlema koormuskseemiga.

Lõiketöötusel esinev koormus on esitatud seel 3.1a. Lõiketöötusel tekkivad jõud on võetud punkti põhjal. Plasmatöötusel esinev koormus ja arvutus on esitatud seel 3.2b.

Nagu arvutustest selgub, siis plasmatöötuse puhul pole laagrite eluiga kriitiline, kuna sellises koormusolukorras laagrite eluiga on pikk >10000000 h. Seega vaatame lähedamalt laagrite eluiga lõiketöötuse puhul.

Eeldame, et masin töötab päevas 14 tundi. Ülejäänud ajast masin seisab, mis tuleneb töötusel esinevatest abiaegadest, tööliste pausidest, hooldusest jms. Töötamine masinaga käib 5 päeva nädalas, 4 nädalat kuus, 12 kuud aastas. Aastas töötaks siis masin:

$$\textit{töötunnid aastas} = 18 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 12 = 4320 \textit{ h}$$

Arvestades laagrite eluiga, mis seel põhjal on 42000 tundi, saaksime laagrite ligikaudseks elueaks 10 aastat.

NB! Antud arvutus on puhtalt teoreetiline ning ei arvesta kõiki reaalseid parameetreid. Tulemused ei pruugi kajastada reaalelus ning soovitatav laagrite vahetus võiks siiski toimuda kord üle 5 aasta või vastavalt vajadustele.

Input parameters

Select bearing internal radial clearance	Normal internal radial clearance
F_r Radial load	0.4 kN
F_a Axial load	0.4 kN
n_i Rotational speed of the inner ring	800 r/min
Operating temperature Bearing outer ring	22 °C
η_c specification method	Cleanliness classification(recommended)
Lubricant type and cleanliness	High cleanliness (sealed bearing)
Grease used in the bearing	MT47
Viscosity at 40 °C	70.0 mm ² /s
Viscosity at 100 °C	7.3 mm ² /s

L_{10mh} SKF rating life	42000 hour
a_{SKF} SKF life modification factor a _{SKF}	7.31
κ Viscosity ratio	6.48
P Equivalent dynamic bearing load	0.73 kN
η_c Factor for contamination level	0.74
v₁ Required kinematic viscosity for κ=1	34.6 mm ² /s
L_{10h} Basic rating life	5740 hour
L₁₀ Capped bearing grease life	⚡ hour
C/P Load ratio	6.5

Sele 3.1a Laagrite arvutus lõiketöötus koormusolukorras

Input parameters

Select bearing internal radial clearance	Normal internal radial clearance
F_r Radial load	0.1 kN
F_a Axial load	0.1 kN
n_i Rotational speed of the inner ring	2000 r/min
Operating temperature Bearing outer ring	22 °C
η_c specification method	Cleanliness classification(recommended)
Lubricant type and cleanliness	High cleanliness (sealed bearing)
Grease used in the bearing	MT47
Viscosity at 40 °C	70.0 mm ² /s
Viscosity at 100 °C	7.3 mm ² /s

L_{10mh} SKF rating life	>1000000 hour
a_{SKF} SKF life modification factor a _{SKF}	50
κ Viscosity ratio	11.2
P Equivalent dynamic bearing load	0.23 kN
η_c Factor for contamination level	0.74
v₁ Required kinematic viscosity for κ=1	20 mm ² /s
L_{10h} Basic rating life	73400 hour
L₁₀ Capped bearing grease life	⚡ hour
C/P Load ratio	20.7

Sele 3.1b. Laagrite arvutus plasmalõikusel

3.2 Stepper-mootorite kontrollarvutus

Mootorite suuruses ja võimsuses veendumiseks on soovitatav teostada kontrollarvuts, mis võtab arvesse eelnevalt leitud parameetreid ja tegureid. Selleks arvutame kõige raskema telje liigutamisest tulenevad väänemomendid. Liigutatakse portaali ehk siis YZ telge. Mootorite võimsuse kontrolliks on vaja leida mootorile mõjuvad kolm komponenti.

Staatiline väändemoment lineaarjuht komponentidest tulenevast hõõrdest:

$$T_{gf} = \frac{h_p}{2\pi} \mu_{gf} [(m_t + m_w)g + F_z] = 0,0602 Nm \quad (4)$$

Kus,

T_{gf} – staatiline väändemoment lineaarjuht komponentidest tulenevast hõõrdest

H_p – kuulkruvi soone vahekaugus: 0,005 m/rev

μ_{gf} – hõõrde koefitsent lineaarjuhtides: 0.1

m_t – liigutatav mass: 50 kg

m_w – tooriku mass: 20 kg

F_z – maksimaalne vertikaaljõud (10% maksimaalsest löikejõust): 70 N

Laagritele mõjuv väändemoment:

$$T_{lf} = \mu_b \frac{d_p}{2} (F_f) = 0,0225 Nm \quad (5)$$

Kus,

T_{lf} – laagritele mõjuv väändemoment

μ_b – laagrite hõõrdetegur: 0,005

d_p – kuulkruvi läbimõõt: 0,012 m

F_f – maksimaalne ettenihke jõud: 700 N

Ettenihke ehk lõikejõudude ületamiseks vajaminev väändemoment:

$$T_f = \frac{h_p}{2\pi} F_f = 0,557 \text{ Nm} \quad (6)$$

Totaalne staatilisest koormusest tingitud väändemoment kuulkruvile.

$$T_s = \frac{T_{gf} + T_{lf} + T_f}{r_g} = 0,639 \text{ Nm} \quad (7)$$

Kus,

T_s – totaalne staatilisest koormusest tingitud väändemoment kuulkruvile.

r_g – mootori ja kuulkruvi vaheline ülekandesuhe: 1.

Totaalne väändemoment mis mõjuv kuulkruvile ning ka mootorile on 0,639 Nm. Valitud samm-mootorite nema 23 väändemoment on 1,69 Nm. See on üle kahe korra suurem kui vajalik väändemoment YZ-telje liigutamiseks. Antud mootorite võimsus on piisav!

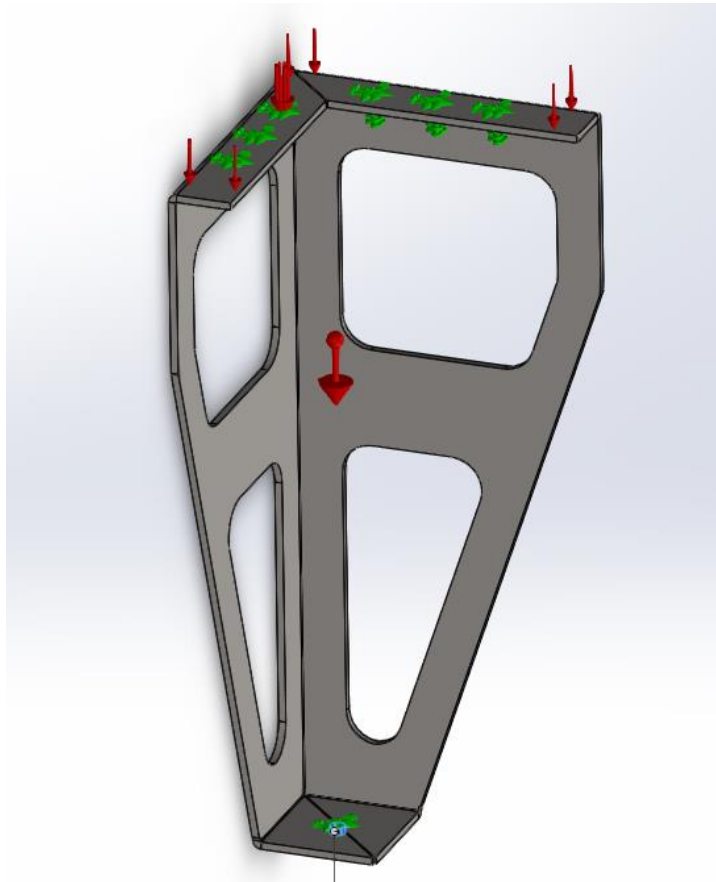
3.3 Tugevusarvutused

Pingi konstruktisooni osadele on tarvis teha tugevusarvutused. Lõikepingi puhul on põhiline pingi osade jäikus. Pingi ehituses peab esinema võimalikult vähe deformatsioone, et vältida sellest tulenevaid lõiketötluse ebatäpsuseid.

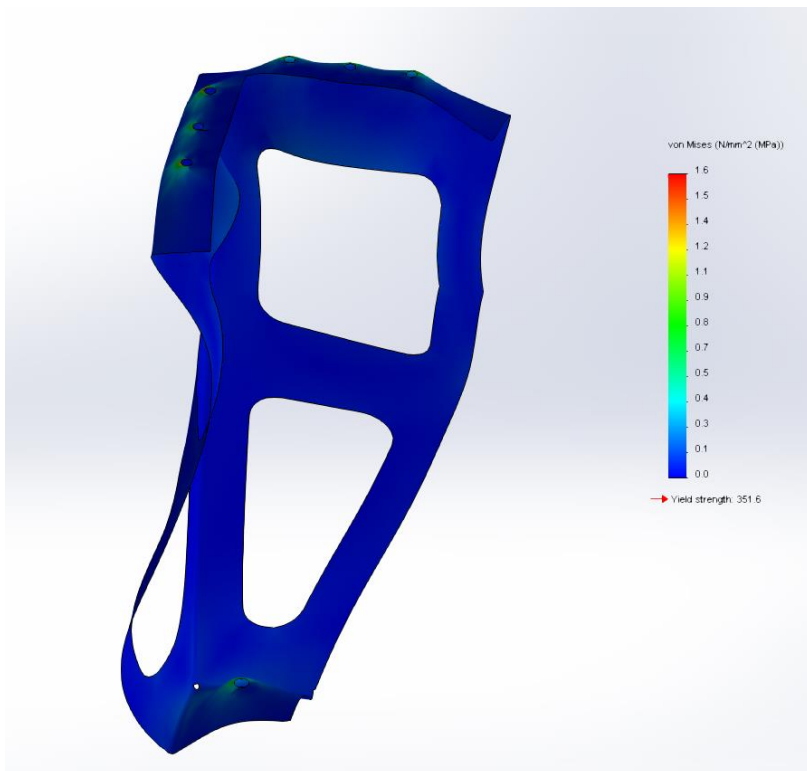
3.3.1 Tugijalgade arvutus

Tugijalad on valmistatud 5 mm paksusest lehtterasest S350. Terase voolepiir 350 MPa, tõmbetugevus 420 MPa. Lauda toetab neli jalga. Laua kogukaal on ligikaudu 220kg. Arvutus teostatud, kasutades koorikelemente.

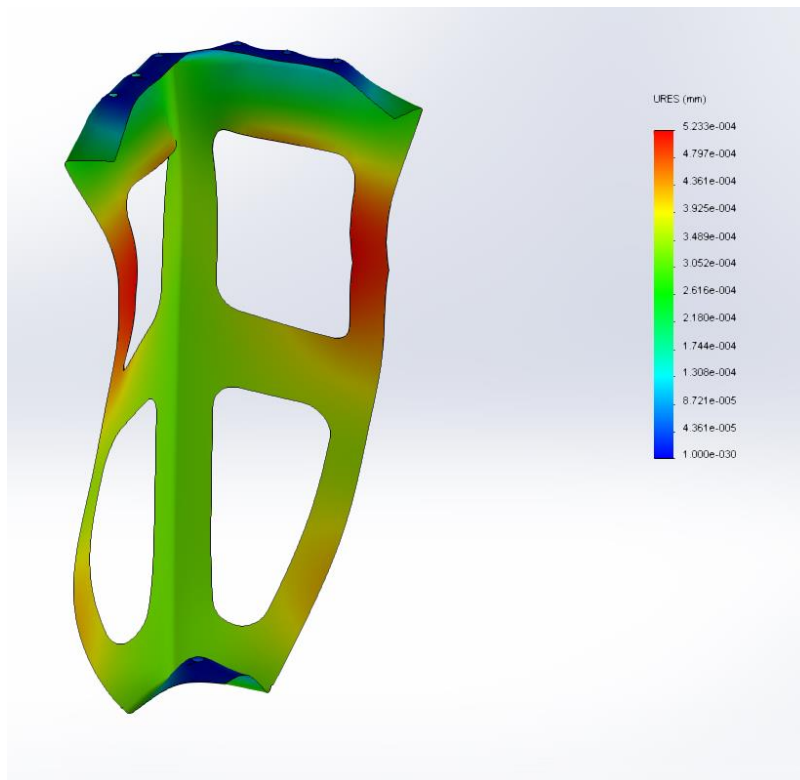
Koormuseks võetakse 3 kN, kuna jalgu on kokku 4 jagatakse ka koormus kuuega, seega ühele jalale mõjuaks koormuseks on 333 N. Suurim pinge tekib jala kinnitus punktide kohal. Suurimaks pingeks on 3,4 MPa. Suurim deformatsioon on 9,199e-004 ehk 0,00991 mm. Järeldus. Detaili tugevus on tagatud. Võiks väita, et detail on üledimensioneeritud ning vajaduse korral oleks võimalik detaili konstruktisiooni kulude vähendamise otstarbeks optimeerida.



Sele 3.2. Koormuskeem



Sele 3.3. Suurim esinev pinge



Sele 3.4. Maksimum deformatsioonid

3.3.2 Lõikeelemendi kandja deformatsioon

Lõikeelemendi kandja on freesitud alumiinium sulamist, 6061-T6 (materjali voolepiir 275 MPa). Tegemist on lihtsa plaadiga, millel on avad kinnituste jaoks ja tööriista hoidjate jaoks. Plaadil on ka paar tugevdavat struktuuri elementi. Plaadi konstruktsioon on kahekordselt sümmeetriline. Plaat on kujutatud seel 3.5.

Antud arvutuses lähtume kahest lõike stenaariumist. Mille tõttu tekivad elemendile erinevad koormusolukorrad. Koormuseks on mõlemas suunas kahekordne keskmine lõikejõud ehk 700N. Meshi ehk elementide võrgu tihedus antud mudelil on 69652 elementi

1. Freesitakse korruga ZY suunas
2. Freesitakse korruga XZ suunas

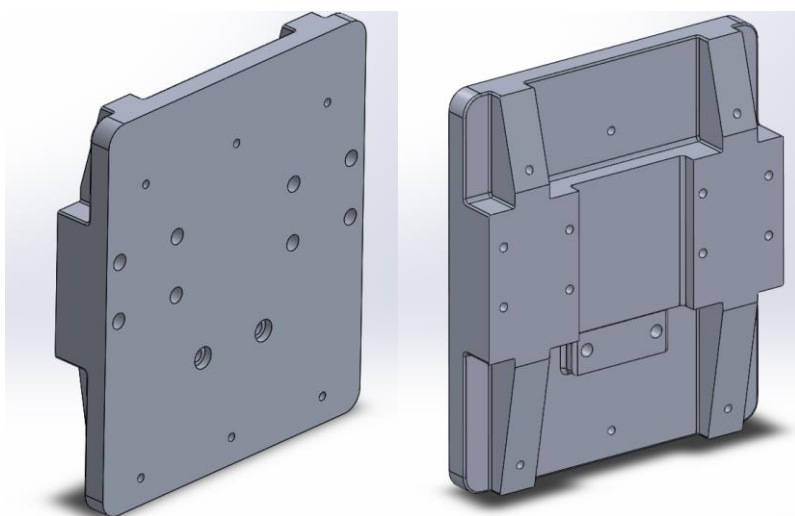
ZY suunas freesimisel tekkis maksimaalne pinge struktuurile 9,9 MPa ning maksimaalne deformatsioon $5,120e-003$ mm ehk 0,0051 mm. Tekkind pinge on äärmiselt väike ning deformatsioonid on minimaalsed, ega mõjuta pingi tööd ja täpsust.

XZ suunas freesimisel on tekkinud pinged suuremad 10,6 MPa, kuid mitte oluliselt. Maksimaalne deformatsioon $1,323e-002$ mm ehk 0,01323 mm. Antud suurus tekitab juba

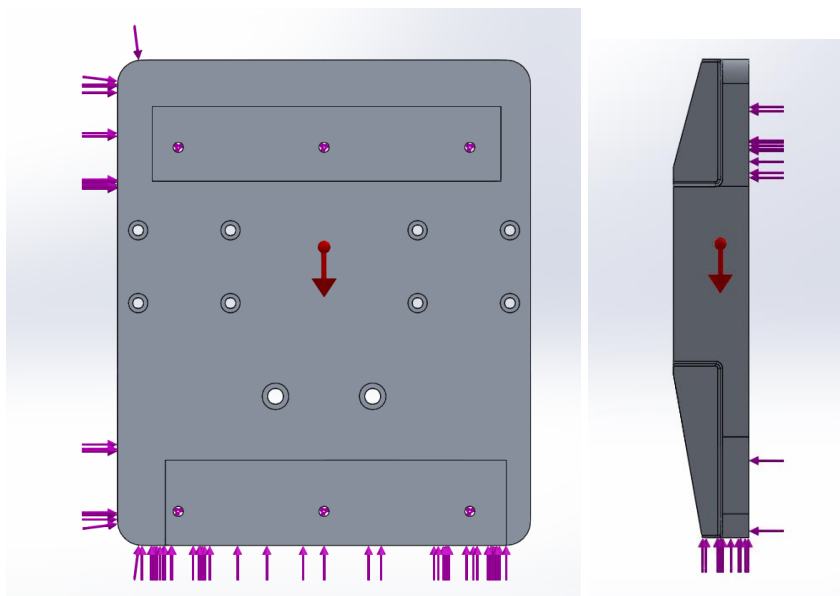
lõiketöötusel mõningaid ebatäpsusi ning sellise deformatsiooniga, ei saa rahule jääda. Seega tuleb detaili konstruktsiooni tugevdada.

Peale konstruktsiooni tugevdamist alanes detailile mõjub pinge 10,6 – 6,7 MPa peale ning deformatsioon langes 7,930e-003 mm peale. See tulemus on tunduvalt parem, kui eelmise detaili konstruktsiooni puhul. Selline deformatsioon ei mõjuta masina lõikeprotsessi täpsust ega tugevust kuigi palju.

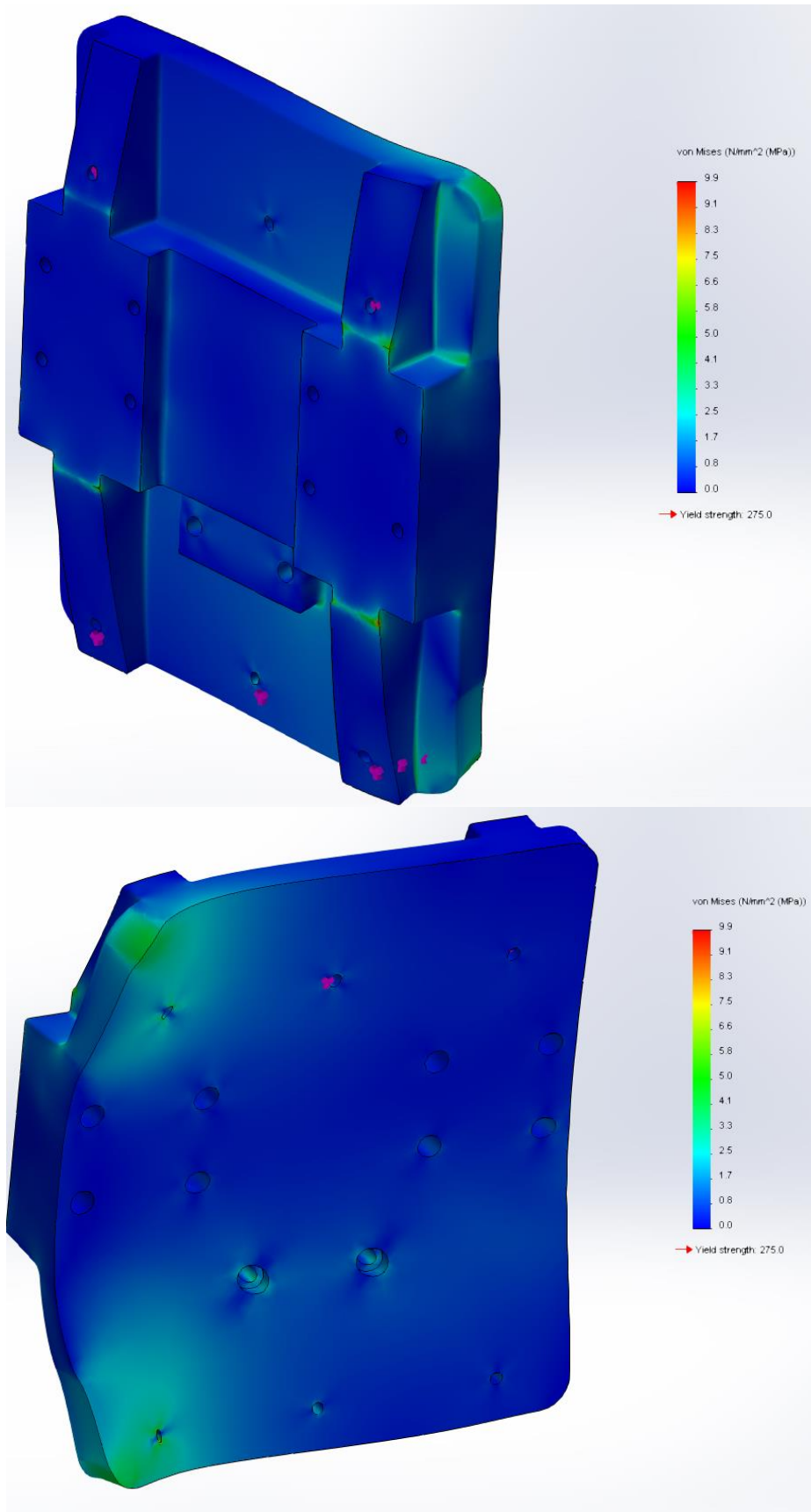
Järeldus. Peale konstruktsiooni tugevdamist vähenes lõikeelemendi läbipaine tunduvalt. Antud tulemuste põhjal võib väita, et detaili tugevus ja jäikus on tagatud!



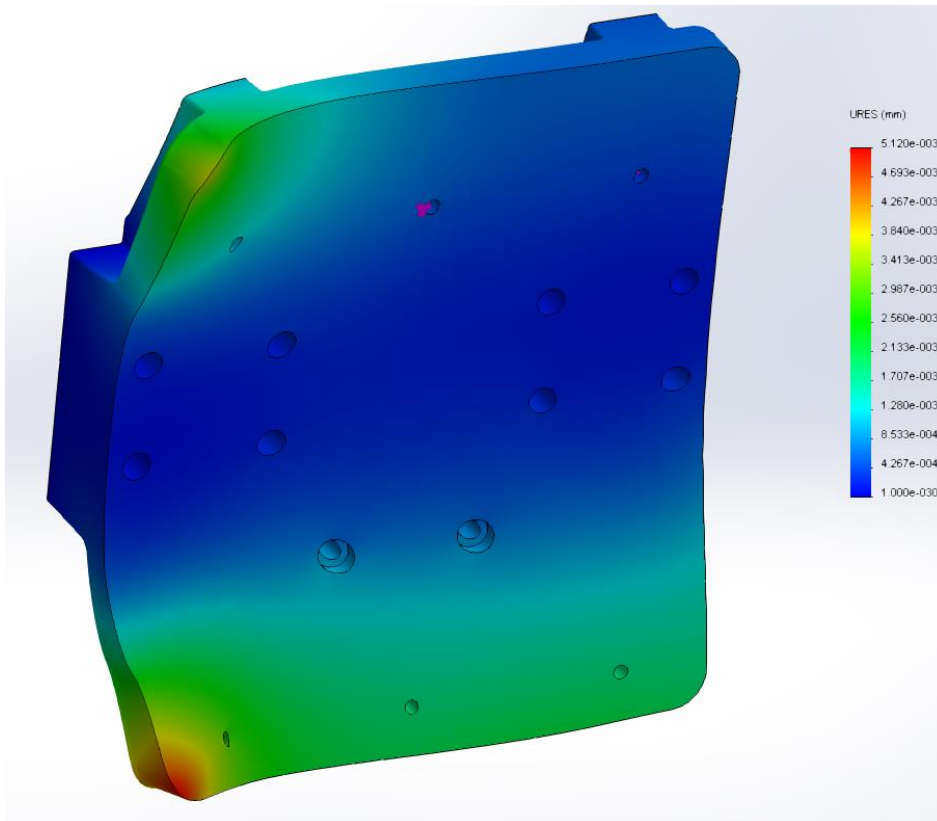
Sele 3.5. Plaadi esi- ja tagukülg.



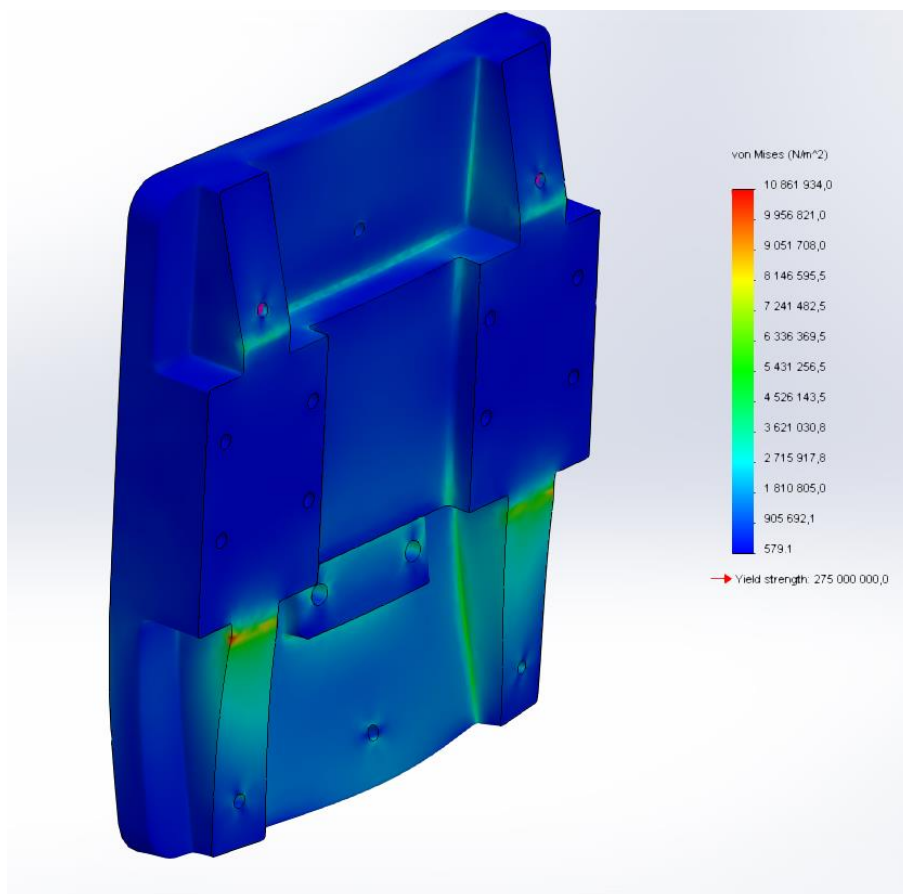
Sele 3.6. Vasakul ZY koormuskeem; paremal XY koormuskeem



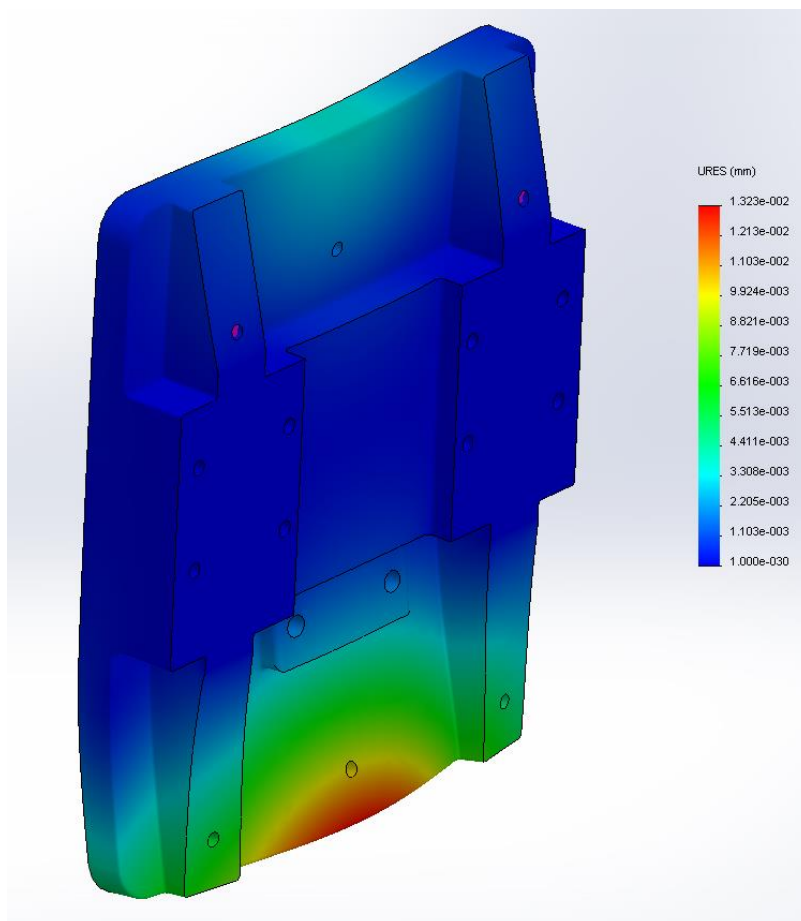
Sele 3.7. Mudelis esinevad pinged ZY lõikuse korral



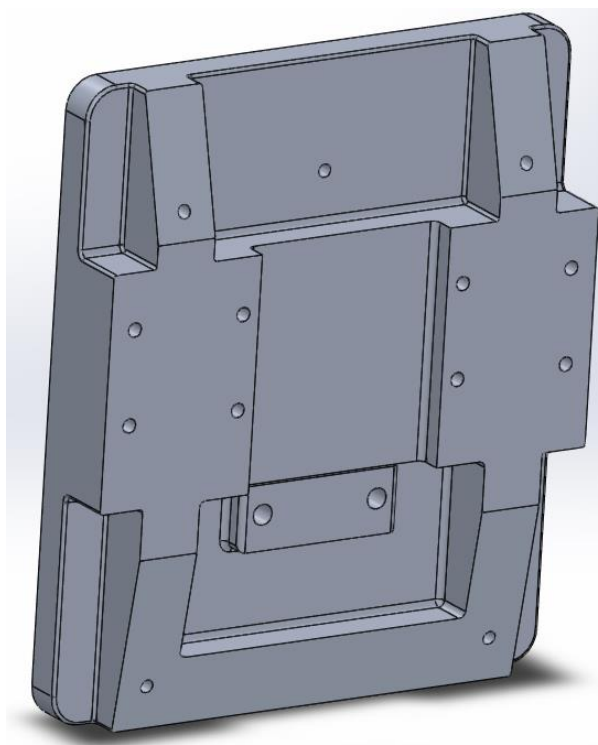
Sele 3.8. Deformatsioonid ZY olukorras



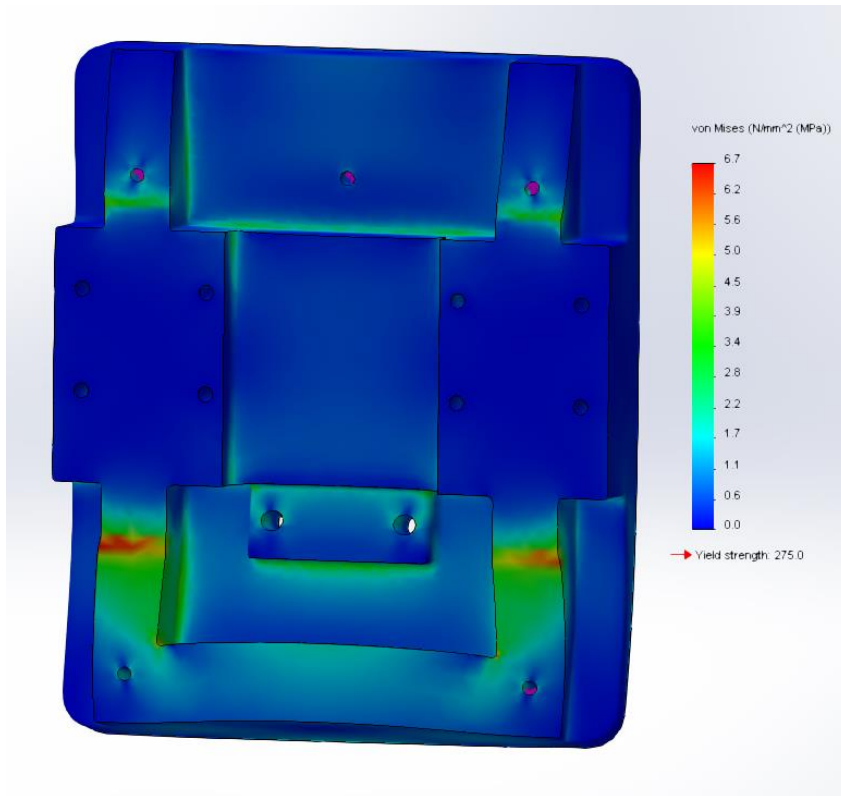
Sele 3.9. Esinevad pinged XY olukorras



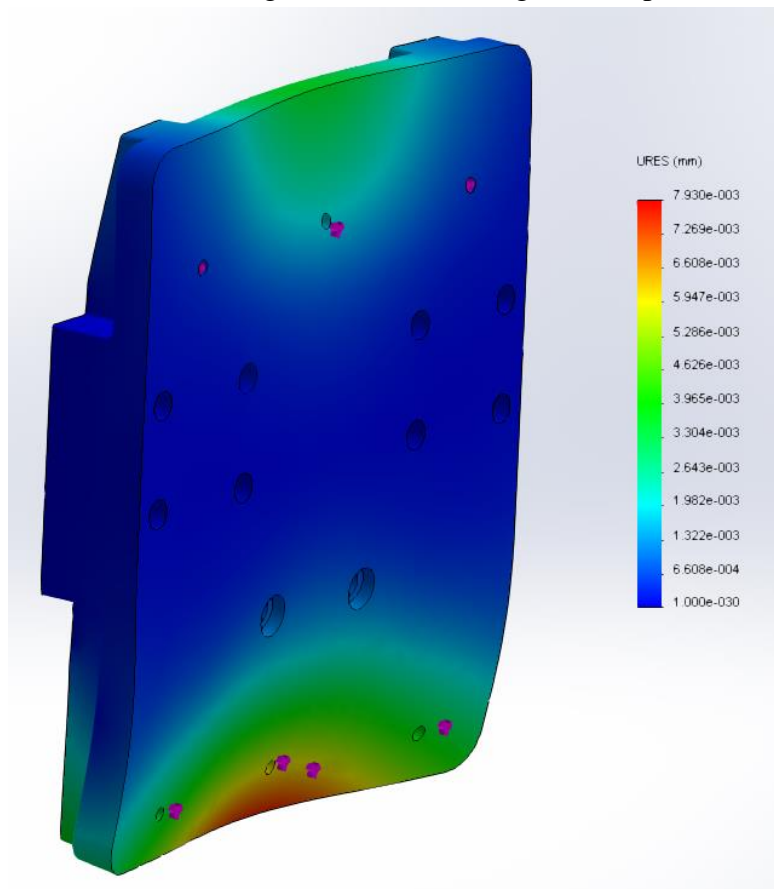
Sele 3.10. Deformatsiooni XZ olukorras.



Sele 3.11. Tugevdatud detaili konstruktsioon



Sele 3.12. Pinge XZ olukorras, tugevdatud plaat



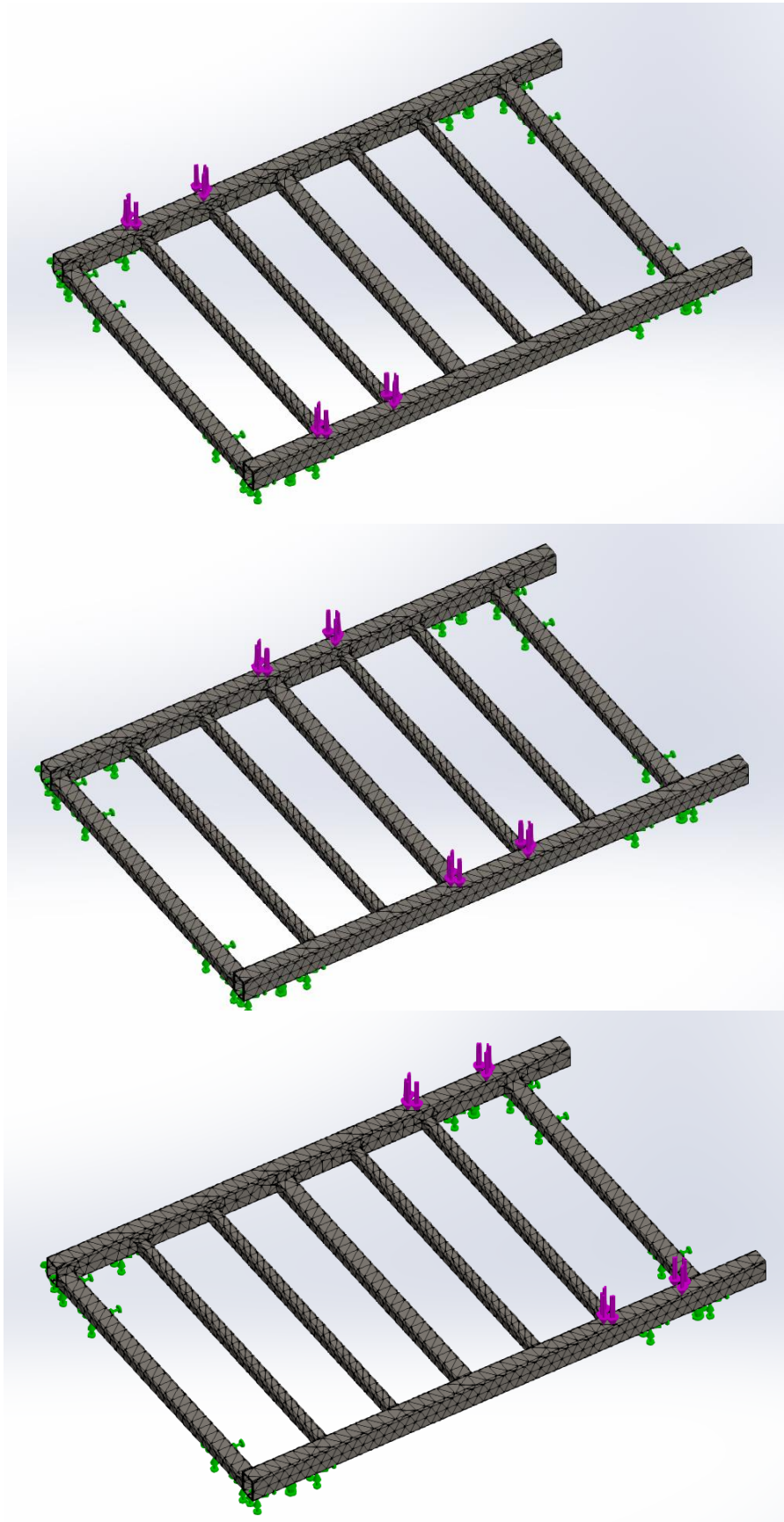
Sele 3.13. Deformatsioon XZ olukorras, tugevdatud plaat

3.3.3 Raami tugevusarvutus

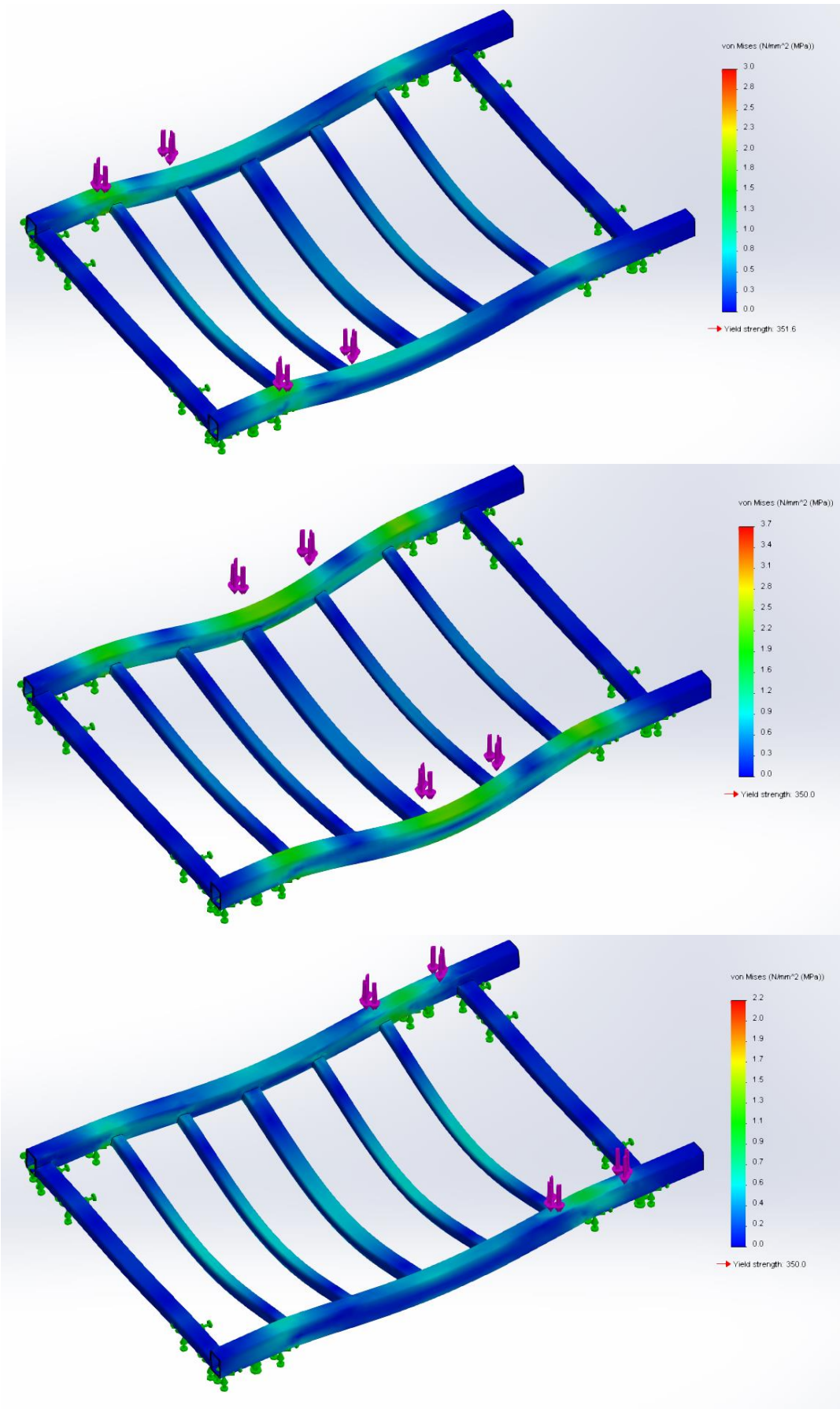
Raami läbipande ja tugevuse hindamiseks oleks vaja teostada sellele tugevusarvutus. Raamile mõjub otseselt YZ-telje raskus. YZ kaalub 56 kg . Kaal on jaotatud kahe tala peale. Arvestatakse varuteguriks 2, seega tala kohta 560N. Kuna YZ-telg liigub, siis võib ta asuda kolmes eri kohas, seega teostatakse arvutused ka iga asukoha kohta. Koormuskeem kujutatud seel.

- Y-telg pingi esiosas. Maksimaalne pinge: 2.9 MPa; läbipaine X-telje taladel: $8.287e-003$ kuni $1.243e-002$ mm.
- Y-telg pingi keskel. Maksimaalne pinge: 3.7 MPa; läbipaine X-telje taladel: $1.847e-002$ kuni $6.155e-003$ mm.
- Y-telg pingi tagaosas. Maksimaalne pinge: 2.2 MPa; läbipaine X-telje taladel: $6.434e-003$ mm.

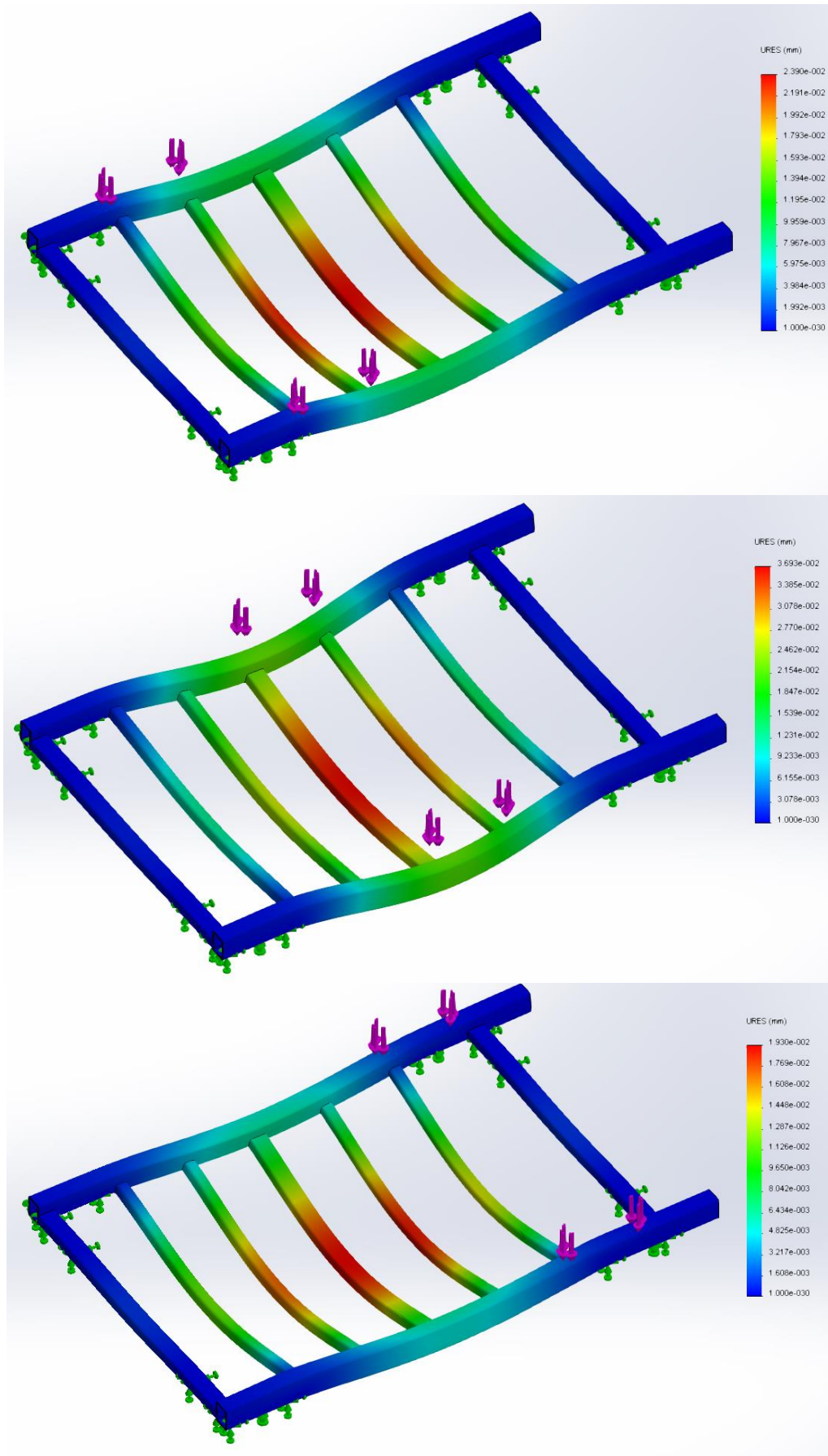
Järeldus. Raami konstruktsioonile tekkivad pinged on äärmiselt väikesed. Maksimaalne tekkiv pinge on 3.7 MPa. Antud materjali voolepiir 350 MPa. Läbipaine tala keskel on maksimaalselt $1.847e-002$ ehk 0.0184 mm. Selline tulemus saadi analüütilist LEMi kasutades kahekordse tegeliku jõuga ning reaalses olukorras tugevdavad raami veel lineaarrööpad, töölaud ning muud elemendid. Antud pingi täpsus pole samuti niivõrd kriitiline. Antud tulemus rahuldab tingimusi.



Sele 3.14. Koormuskeem. Üleval – koormus pingi esiosas; keskel- koormus pingi keskosas; all – koormus pingi tagaosas.



Sele 3.15. Makismaalsed pinged



Sele 3.16. Deformatsioonid

Kokkuvõte

Antud lõputöö eesmärk on projekteerida multifunktsionaalne CNC lõikepink. Lõikepingi multifunktsionaalsus seisneb selles, et ta võimaldab teostada nii freeslõikust kui ka plasmalõikust. Pingi abil saab freesida kolme- ja kahe-teljeleiselt mitteferriitseid materjale nagu: alumiiniumit, erinevat puitu, komposiite ja plastikuid. Pink võimaldab ka terase plasmalõikust. Multifunktsionaalsus tagatakse vahetatavate lõikeriistade ja töölaudadega. Samuti on pingi teljeline liikumine optimeeritud mõlema lõikemeetodi tarbeks.

Töö esimeses osas uuritakse CNC masinate üldehitust ja põhimõtteid. Vaadatakse plasmalõikuse ja freesimise erinevusi ning võimalikke viise nende ühildamiseks. Esimeses osas pannakse paika ka pingi sihtgrupp ning tehakse ligikaudne turuprognosis.

Töö teises osas tegeletakse pingi projekteerimisega. Kõigepealt pannakse paika pingi geometria ning üldisain. Põhjendatakse ära pingi materjalivalik ning pakutakse ka võimalikke alternatiive. Tuuakse välja erinevad telgede jõuülekannete liigid ning määratakse sobilik jõuülekanne antud rakenduseks. Selles osas määratakse ka kõik muud pingi komponendid, elektroonika, lõikeriistad ning juhtsüsteemid. Seejärel projekteeritakse antud pink lähtudes eelnevalt tehtud valikutest ja järeldustest. Projekteerimise põhirõhk on sellel, et pingi ehitus oleks võimalikult lihtne, modulaarne ning sellel oleks piisav jäikus ning tugevus. Lõpuks arvutatakse pingi ligikaudne maksumus.

Töö kolmandas osas teostatakse arvutusi komponentide ja pingi konstruktsiooni töökindluses veendumiseks. Laagritele teostatakse elueaarvutus vastavalt tekkivale koormusele. Samuti kontrollitakse mootori väändemomendi piisavust. Pingi konstruktsiooni osadele teostatakse tugevusarvutused, mis kontrollivad lõiketöölusel tekkivaid võimalikke läbipaindeid ning struktuurile esinevaid pingeid. Tugevusarvutuste käigus selgus, et üks konstruktsiooni osa ei rahulda tingimusi ning seljuhul rakendati konstruktsiooni disaini muudatust, mis parandas tulemusi märgatavalt. Üldiselt olid projekteeritava pingi konstruktsioonis esinevad pinged väikesed ning deformatsiooni aste madal.

Abstract

The purpose of this thesis is to design a multifunctional CNC cutting bench. The cutting bench is able to mill non-ferrous materials and plasma cut steel. The ability to have two different cutting methods integrated into one machine, makes it multifunctional. The cutting bench is capable of milling and engraving aluminum, woods, composites, plastics, etc. It can plasma cut stainless steel, steel, aluminum and other metals. Multifunctionality is granted with universal tool fixtures and interchangeable working tables.

In the first stage of the thesis, data about CNC cutting machines is collected. Their design and construction is studied. Different cutting methods are compared and a concept of how to integrate them is created. Also the target group of the cutting bench is defined and the market is evaluated.

In the second stage of the thesis, the main focus is on design of the cutting bench. Firstly, the geometry and type of the bench is defined. Also the construction material of the bench is selected and possible alternatives are suggested. Secondly, a proper power transmission for the axes is selected out of many possible solutions. Also the key components such as bearings, ballscrews, linear guides, cutters, electronics, etc are selected. Finally the cutting bench is designed in CAD software. The main emphasis during the designing process is to make the structure simple yet rigid and strong. The machine is also designed to be ergonomical and modular. The cost of the bench is also calculated in this part.

In the third stage of the thesis, the structural calculations are performed for the construction elements of the bench. Life expectancy of the bearings and required motor torque is also calculated. Structural calculations are based on cutting forces during milling process and evaluate the deformation and maximum stress levels on the structural elements. During the calculations one of the structural element was not strong enough and the deformation levels exceeded the limit. After changes in the structural design, the deformation decreased. Overall stress and deformation levels were relatively low on the designed cutting bench.

Kasutatud kirjandus

1. Altintas, Y. Manufacturing automation. *Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design*. Cambridge:Cambridge University Press. 2000. 4-13, 159-164
2. Barathi P., Chaudhury A. (2006). Current Status of Technology Adoption. - *Micro, Small and Medium Manufacturing Firms in Boston, 5-15* [Online] ACM Digital Library (17.05.2015).
3. *CNC router design* [WWW] <http://www.instructables.com/id/Building-a-CNC-router/step1/The-design> (05.05.2015)
4. *CNC router resource* [WWW] www.CNCroutersource.com/index.html (05.05.2015)
5. Collins P., Cummings C., Dittrich W., Jones P., Sealey A. *CNC Application and Design; magistratöö*. Worcester, USA. 2011
6. *Datron spindles* [WWW] <http://www.datron.com/accessories/spindles.php> (20.04.2015)
7. History of numerical control [WWW] http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_numerical_control (15.04.2015)
8. *Hypertherm plasma cutter* [WWW] http://www.hypertherm.com/en/Products/Handheld_cutting/Systems/powermax125.jsp (16.04.2015)
9. Muller P., Gagliardi D., Caliendo C., Bohn U N., Klitou D. Annual Report on European SMEs 2013/2014. – *A partial and fragile recovery*. 15-17, 84-90. [Online] SME European Commission (17.05.2015)
10. Põldmaa V. (2008). Õppe-metoodiline materjal kursusele – *Arvprogrammjuhtimisega pingid ja nende programmeerimine*. 3-7. [Online] ENE TTU (24.04.2015)
11. *Schneider electric* [WWW] <http://motion.schneider-electric.com/downloads/quickreference/NEMA23.pdf> (19.04.2015)
12. Servo mootorid. [WWW] <https://learn.adafruit.com/adafruit-motor-selection-guide/rc-servos> (01.05.2015)
13. Stepper mootorid. [WWW] <https://learn.adafruit.com/all-about-stepper-motors/what-is-a-stepper-motor> (01.05.2015)
14. Tallinna Tööstushariduskeskuse Mehhatroonikaseadmete koduleht. [WWW] http://www.tthk.ee/MEH/Taiturid_8.html (14.04.2015).
15. Tallinna Tööstushariduskeskuse Mehhatroonikaseadmete koduleht. [WWW] http://www.tthk.ee/MEH/Taiturid_9.html (14.04.2015).
16. Tandon V., El-Mounayri, H Kishawy. (2002). NC end milling optimization using evolutionary computation , 8-10 [Online] (24.04.2015)
17. *Thomson Precision screws* [WWW] http://www.thomsonlinear.com/downloads/screws/Precision_Screws_ctuk.pdf (15.04.2015)
18. *TinyG koduleht* [WWW] <https://github.com/synthetos/TinyG/wiki/TinyG-Start> (10.05.2015)
19. Vällo, A. Eritöötlusviisid. Tallinn:TTÜ kirjastus. 1994. 19-26.

LISA 1. TEHNILISED JOONISED

LISA 2. ARVUTIRENDERDUSED LÕIKEPINGIST

