



CHALMERS



Konstruera och tillverka en CNC-fräs för trä- och polymermaterial

Kandidatarbete inom tillämpad mekanik

FILIP ALPSTEN
EMIL BORGLUND ASPLER
LUCAS BJÖRKLUND
FREDRIK KARLSSON
JESPER LEIULFSRUD
KEVIN STÅHL

KANDIDATARBETE 2017:06

Konstruera och tillverka en CNC-fräs för trä- och polymermaterial

FILIP ALPSTEN
EMIL BORGLUND ASPLER
LUCAS BJÖRKLUND
FREDRIK KARLSSON
JESPER LEIULFSRUD
KEVIN STÅHL

Institutionen för Tillämpad mekanik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2017

Konstruera och tillverka en CNC-fräs för trä- och polymermaterial
Kandidatarbete i Tillämpad mekanik
FILIP ALPSTEN
EMIL BORGLUND ASPLER
LUCAS BJÖRKLUND
FREDRIK KARLSSON
JESPER LEIULFSRUD
KEVIN STÅHL

© FILIP ALPSTEN, 2017
© EMIL BORGLUND ASPLER, 2017
© LUCAS BJÖRKLUND, 2017
© FREDRIK KARLSSON, 2017
© JESPER LEIULFSRUD, 2017
© KEVIN STÅHL, 2017

Kandidatarbete 2017:06
ISSN 1654-4676
Institutionen för Tillämpad mekanik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: +46 (0)31 772 1000

Omslag:
Rendering på den färdiga detaljkonstruktionen av CNC-fräsen

Typsatt i L^AT_EX
Tryckeri /Institutionen för Tillämpad mekanik
Göteborg, Sverige 2017

Konstruera och tillverka en CNC-fräs för trä- och polymermaterial

FILIP ALPSTEN

EMIL BORGLUND ASPLER

LUCAS BJÖRKLUND

FREDRIK KARLSSON

JESPER LEIULFSRUD

KEVIN STÅHL

Institutionen för Tillämpad mekanik

Chalmers tekniska högskola

Sammandrag

Detta kandidatarbete syftar till att möjliggöra tillverkning av formar för komposit-tillverkning på Chalmers genom att konstruera och tillverka en CNC-fräs för trä- och polymermaterial. Arbetet har utförts på Institutionen för Tillämpad mekanik, Chalmers tekniska högskola.

En komplett treaxlig maskin har konstruerats och tillverkats, uppfyllnad av kravställningar har verifierats genom simuleringar och en testplan för fysiska tester har upprättats. Som stöd vid framtida underhållsarbete och vidareutveckling har en komplett CAD-modell av maskinen och ett kopplingsschema över dess styrsystem tagits fram. Maskinen tillverkades och monterades med hjälp av den utrustning som finns att tillgå i Prototyplabbet på Chalmers.

Den färdigställda maskinen öppnar upp för möjlighet till intern tillverkning av formar för komposittillverkning som inte tidigare funnits på Chalmers. Genom att Chalmers Formula Student och Eco-Marathon-teamen själva kan tillverka formar förväntas kostnader associerat med detta kunna reduceras, dessutom ges större frihet att testa olika konstruktioner.

Nyckelord: CNC, fräs, polyuretanskum, kompositer, form, maskin, produktutveckling, detaljkonstruktion

Abstract

This Bachelor's thesis aims at enabling production of molds for composite manufacturing at Chalmers by designing and manufacturing a CNC mill for wood and polymer materials. The work has been carried out at the Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology.

A complete three-axis machine has been designed and manufactured, fulfilment of requirements have been verified through simulations and a plan for physical tests has been established. As a support for future maintenance and further development, a complete CAD model of the machine and a wiring diagram of its control system have been developed. The machine was manufactured and assembled using the equipment available in the Prototype Lab at Chalmers.

The completed machine opens up for the possibility of inhouse manufacturing of composite molds that have not previously been available at Chalmers. Since the Chalmers Formula Student and Eco-Marathon teams now can make molds themselves, it is expected that costs associated with this can be reduced, as well as greater freedom to test different designs.

The report is written in Swedish.

Keywords: CNC, mill, polyurethane foam, composite, mold, machine, product development, product design

Förord

Rapporten beskriver arbetet med att konstruera och tillverka en CNC-fräs för trä- och polymermaterial. Rapporten omfattar ett kandidatarbete vid institutionen för Tillämpad mekanik under vårterminen 2017 på Chalmers tekniska högskola i Göteborg.

Ett stort tack till vår handledare Knut Andreas Meyer, doktorand, som har motiverat oss genom att visa stort engagemang. Vägledningen har varit stödjande under hela projektets gång. Vi tackar även vår examinator Mikael Enelund, biträdande professor, som har hjälpt till med utformningen av projektet.

Ett stort tack riktas även till studentföreningen eXPerimentverkstaden som har gjort tillverkningen av maskinen möjlig genom att hålla Prototyplabbet öppet på kvällar och helger.

Författarna, Göteborg, Maj 2017

Termer och förkortningar

AC	Alternating current
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CDIO	Conceive Design Implement Operate
CFS	Chalmers Formula Student
CNC	Computer Numerical Control
DC	Direct current
MDF	Medium Density Fibreboard
MIG	Metal inert gas
NO	Normally open
NC	Normally closed
TIG	Tungsten inert gas
VFD	Variable frequency drive

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Förutsättningar och avgränsningar	2
1.4	Disposition	2
2	Teori	5
2.1	Fräsmaskin	5
2.2	Computer Numerical Control	6
2.2.1	Globala och lokala koordinatsystem	6
2.2.2	Referenskörning och inmätning av arbetsstycke	7
2.2.3	G-kod	7
2.3	Toleranser	8
2.3.1	Noggrannhet och repeterbarhet	8
2.3.2	Rakhet	9
2.3.3	Planhet	10
2.3.4	Vinkelräthet	10
2.4	Kablar	11
2.5	Stegmotorer	11
2.6	Sensorer	12
2.7	Styrsystem	12
2.7.1	Styrkrets	12
2.7.2	Mjukvara	12
2.8	Signalkonvertering	13
2.9	Spindel	13
2.10	Variable Frequency Drive	13
3	Problemöversikt och säkerhetsrisker	15
3.1	Problemöversikt	15
3.2	Säkerhetsrisker	17
3.2.1	Säkerhet vid drift	17
3.2.2	Tillverknings- och monteringsäkerhet	18
4	Kravspecifikation	19
4.1	Metod	19
4.2	Resultat	19

5	Konceptgenerering och konceptval	21
5.1	Metod	21
5.1.1	Morfologisk matris	22
5.1.2	Elimineringsmatris	22
5.1.3	Pughs konceptvalsmatris	22
5.2	Resultat	23
5.2.1	Konceptgenerering	23
5.2.2	Eliminering av koncept	27
5.2.3	Konceptval	28
5.2.4	Val av basram och Y-ram	31
5.2.5	Beskrivning av valt koncept	32
5.2.6	Val av elkomponenter	33
6	Detaljkonstruktion	35
6.1	Metod	35
6.1.1	Delsystemuppdelning	35
6.1.2	Användning av programvaror	36
6.2	Resultat	36
6.2.1	Dimensionering och val av elkomponenter	37
6.2.2	Dimensionering av kulskruv	41
6.2.3	Linjärstyrning	41
6.2.4	Basram	42
6.2.5	Överram	43
6.2.6	Arbetsbord	44
6.2.7	Portal	45
6.2.8	Z-assembly	48
6.2.9	Belastningsfall portal och Z-assembly	49
6.2.10	Apparatlåda	52
6.2.11	Dammskydd	53
6.2.12	Sammanställning av komponenter	55
7	Tillverkning och montering	57
7.1	Metod	57
7.1.1	Sammanfognings- och fästmetoder	57
7.1.2	Bearbetning	59
7.1.3	Montering	59
7.1.4	Installation av elkomponenter	60
7.2	Resultat	60
7.2.1	Basram	60
7.2.2	Överram	62
7.2.3	Portal	62
7.2.4	Z-assembly	63
7.2.5	Arbetsbordet	64
7.2.6	Apparatlåda	64
7.2.7	Kabeldragning	65
7.2.8	Elkomponenter	66
7.2.9	Monterad maskin	69

8	Testplan	71
8.1	Vinkelräthet	71
8.2	Utböjning	71
8.3	Planhet arbetsbord	72
8.4	Transportmatningshastighet	72
8.5	Acceleration	72
8.6	Vibrationer	72
8.7	Drivningsglapp	73
8.8	Kompensation i programvara	73
9	Reflektion	75
9.1	Genomförande	75
9.2	Resultat	75
9.2.1	Skärkrafter	76
9.2.2	Simuleringar	76
9.2.3	Tillverkning och montering	76
9.2.4	Installation av elkomponenter	77
9.3	Vidareutveckling	78
9.3.1	Inneslutning	78
9.3.2	Omfattande testning och inkörning	78
9.3.3	Inmätning av arbetstyckets position	78
10	Slutsats	79
Bilagor		I
A	Kravspecifikation	I
B	Elimineringsmatris	III
C	Pughs konceptvalsmatris	IV
D	Kopplingsschema	V
E	Komponentlista	VII
F	Beräkningar	X
F.1	Beräkningar av axialkraft från stegmotorer	X
F.2	Knäckning kulskruv	XI
F.3	Resonans kulskruv	XII
F.4	Beräkning av skärkraft för hårda plaster	XIII
F.5	Beräkning av skärkraft för trä	XV
G	Monterad maskin	XVI

1

Inledning

Denna rapport beskriver ett kandidatarbete som utförs på Institutionen för tillämpad mekanik vid Chalmers tekniska högskola. Kandidatarbetets mål är att utveckla, utvärdera och implementera en CNC-fräs för bearbetning av mjuka material.

1.1 Bakgrund

Chalmers maskinteknikprogram saknar för närvarande möjligheter till tillverkning av formar för komposittillverkning samt avancerade prototyper i trä. Dagens datorstyrda maskinpark kan inte användas för bearbetning av trä och andra dammiga material då dammet täpper igen kylkanalerna. Då det finns ett behov av att kunna bearbeta trä och polymera material på Chalmers kommer en CNC-fräs för detta ändamål att konstrueras och tillverkas för att placeras i det kompositlabb som för tillfället utvecklas.

Ett exempel på användning som kräver bearbetning av material som dammar är tillverkning av formar i polyuretan för komposittillverkning, se figur 1.1, i projekten Chalmers Formula Student och Eco-Marathon. Dessa projekt betalar varje år över 80 000 SEK för tillverkning av formar. Kostnaderna för detta kan reduceras kraftigt om möjligheten att tillverka formar finns på Chalmers, därtill ökas studenternas möjlighet att producera och testa olika prototyper.



Figur 1.1: Längst till vänster visas en form som används vid komposittillverkning. I mitten visas en form i polyuretan. Längst till höger visas kolfiberdetaljen som tillverkats med hjälp av formen i mitten.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att leverera en färdig CNC-fräs som kan bearbeta trä och polymera material. Den skall kunna användas av projektteamen i Chalmers Formula Student, Eco-Marathon samt medlemmar i studentföreningen eXPerimentverkstaden. Tillsammans med maskinen ska det finnas dokumentation och en komplett CAD-modell för eventuell vidareutveckling och underhållsarbete i framtiden.

Projektet har en omfattande produktutvecklingsfas som kommer ge förståelse genom praktisk tillämpning av befintliga och nyskapade utvecklingsmetoder. Eftersom projektet sträcker sig från idé till färdig produkt är en del av syftet att testa och utvärdera maskinen utifrån en kravspecifikation.

1.3 Förutsättningar och avgränsningar

Projektet har två huvudsakliga förutsättningar som blir begränsande för arbetets storlek. En budget är satt till 30 000 SEK varav approximativt 12 000 SEK avsätts till de mekatroniska komponenterna. Dessutom skall projektet utföras inom tidsramen för vårterminen 2017 och vara färdigt för presentation den 23:e maj. Arbetsinsatsen är begränsad till halvtid för sex studenter.

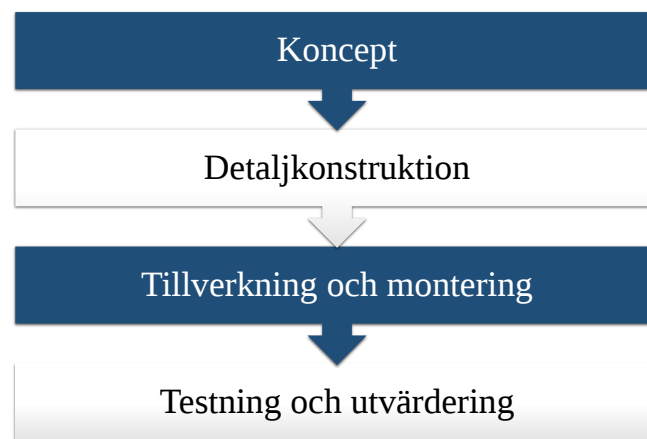
Styrningen av maskinen utgörs av köpta komponenter; stegmotorer, spindel, nätaggregat samt hård- och mjukvara. Ett förslag över dessa komponenter fanns framtaget innan starten av projektet, som under konceptgenereringen anpassades till tillämpningens och användarnas önskemål och behov.

Konstruktionen avgränsas till att innefatta tre linjära axlar. Detta med anledning av att fler axlar ger en ökad komplexitet och att det inte krävs för de former som i dagsläget tillverkas till Chalmers Formula Student. Om det senare uppkommer att ytterligare en axel är nödvändig så lämnas expansionsmöjligheter för senare utvecklingsprojekt på maskinen.

1.4 Disposition

Inledningsvis presenteras projektets bakgrund, syfte samt förutsättningar och avgränsningar. Därefter redogörs teori som tas fram genom litteraturstudier. Teorin behandlar bland annat toleranser och elkomponenters funktion. Kapitel 3 redogör för problem och säkerhetsrisker som kopplas till projektet. Efter det följer en skildring av kravspecifikationen, hur den tas fram och vilka krav och önskemål den resulterar i.

CDIO, Conceiving – Designing – Implementing – Operating, är ett ramverk för genomföra ett projekt i fyra större steg. För att redogöra för det här projektets tillvägagångssätt har CDIO tillämpats enligt figur 1.2. I rapporten behandlas de fyra olika stegen som egna kapitel uppdelat i metod och resultat.



Figur 1.2: Projektets tillämpning av de fyra stegen i CDIO, varje steg är ett enskilt kapitel.

Efter det att de olika resultaten redovisats, följer en reflektion som belyser vad resultaten innebär och vad som kan vidareutvecklas. Slutligen uttrycks de slutsatser som projektet uppnått.

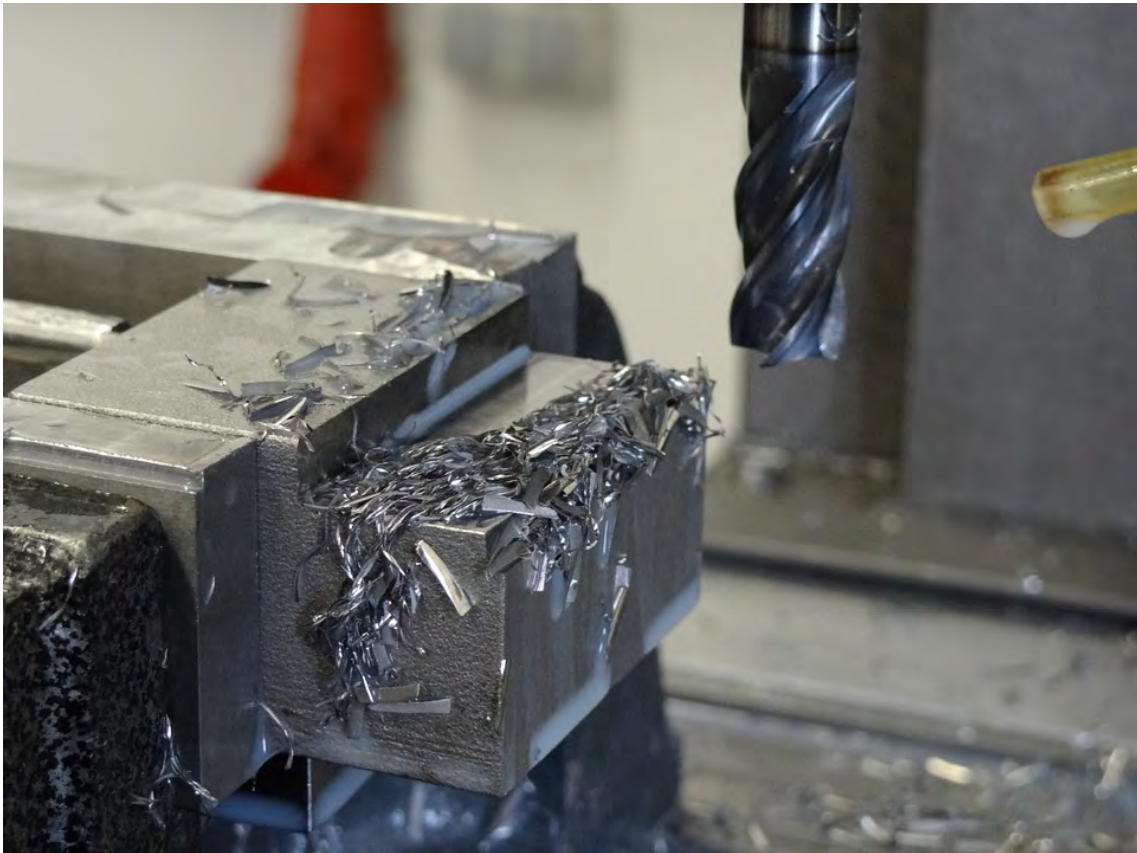
2

Teori

Avsnittet täcker grundläggande teori om CNC-fräsar samt andra fundamentala begrepp som krävs för att förstå resten av rapporten. Exempel på områden som behandlas är toleranser och olika komponenter i styrsystemet.

2.1 Fräsmaskin

En fräsmaskin, eller bara fräs, är en verkstadsmaskin för skärande bearbetning av solida material som exempelvis trä, metall och plast. Önskad form på arbetsstycket framställs genom avverkning av material från utgångsämnet, se figur 2.1. Fräsmaskiner och fräsverktyg kan ha många olika utformningar. Men signifikant för en fräs är att det skärande verktyget, ofta benämnt med samma namn, roteras. Detta till skillnad från en svarv där arbetsstycket roteras medans verktyget hålls stilla. Fräsverktyget kan i förhållande till arbetsstycket förflyttas radiellt, axiellt eller en kombination av de båda. (Nationalencyklopedin, 2017a)



Figur 2.1: Exempel på fräsning, material har avverkats från ett arbetsstycke med en pinnfräs. (Schumacher, D., 2013)

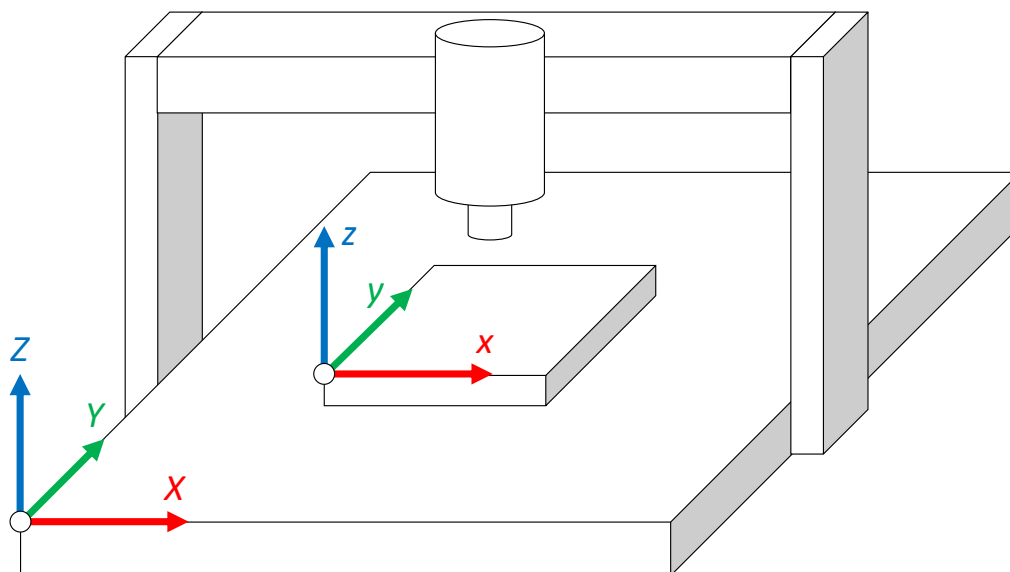
2.2 Computer Numerical Control

Computer Numerical Control (CNC) kallas tekniken att automatisera tillverkningsmaskiner genom användning av datorer för att utföra förprogrammerade sekvenser av maskinkommandon. Maskinrörelserna utförs av motorer som styrs av en dator, till skillnad från manuellt styrda maskiner där rörelser uppnås genom att exempelvis vrida på rattar eller dra i spakar. Tekniken används idag i många olika typer av tillverkningsmaskiner, som 3D-skrivare, laserskärare, svarvar och fräsar. Den möjliggör att tillverka komplexa geometrier med god repeterbarhet på kort tid. (Wikipedia, 2017a)

2.2.1 Globala och lokala koordinatsystem

I CNC-styrda maskiner anges den position maskinen befinner sig i som koordinater i kartesiska koordinatsystem. I treaxliga maskiner, som behandlas i denna rapport, är maskinens olika frihetsgrader parallella med koordinataxlarna. Vanligen används ett globalt koordinatsystem samt ett eller flera lokala koordinatsystem, se figur 2.2.

Det globala koordinatsystemet anges från någon referenspunkt på maskinen och ändras normalt aldrig, medans ett lokalt koordinatsystem oftast är kopplat till det arbetsstycke som skall bearbetas och dess nollpunkt är i allmänhet inte densamma varje gång maskinen används. Den lokala nollpunkten anges genom vilken koordinat den har i det globala koordinatsystemet. Vid programmering i G-kod, beskrivet i avsnitt 2.2.3 och 2.7.2, används det lokala koordinatsystemet för att programmeringen ska vara oberoende av var arbetsstycket placeras i förhållande till det globala koordinatsystemet.



Figur 2.2: Illustration av en fräs med kartesiska koordinatsystem för globala och lokala koordinater.

2.2.2 Referenskörning och inmätning av arbetsstycke

De flesta CNC-maskiner måste referensköras för att styrsystemet skall veta vart maskinen är positionerad. Normalt görs detta direkt vid uppstart av maskinen genom att köra till en viss bestämd referensposition som styrsystemet kan registrera att maskinen kommit fram till. Registreringen kan exempelvis ske med hjälp av sensorer placerade på maskinens olika axlar men kan också göras manuellt. Denna position har styrsystemet sedan som referens för placering av det globala koordinatsystemet.

Vart arbetsstyckets lokala koordinatsystem placeras i förhållande till det globala måste också anges för styrsystemet. Även det görs ofta genom att köra maskinen till den position som önskas vara arbetsstyckets nollpunkt. I mjukvaran noteras sedan den lokala nollpunktens position i det globala koordinatsystemet.

2.2.3 G-kod

Det vanligaste programmeringsspråket som används för att ge CNC-styrda maskiner kommandon kallas för G-kod och har liknande uppbyggnad för de flesta CNC-styrda maskiner. Kommandona talar om för maskinen exempelvis vart den ska röra sig, hur fort den ska röra sig och längs vilken bana. Program med G-kod kan programmeras manuellt kommando för kommando. Men idag är vanligast att använda så kallad CAM-programvara som, med hjälp av en CAD-modell av detaljen som skall tillverkas, kan generera G-kod. (Wikipedia, 2017b)

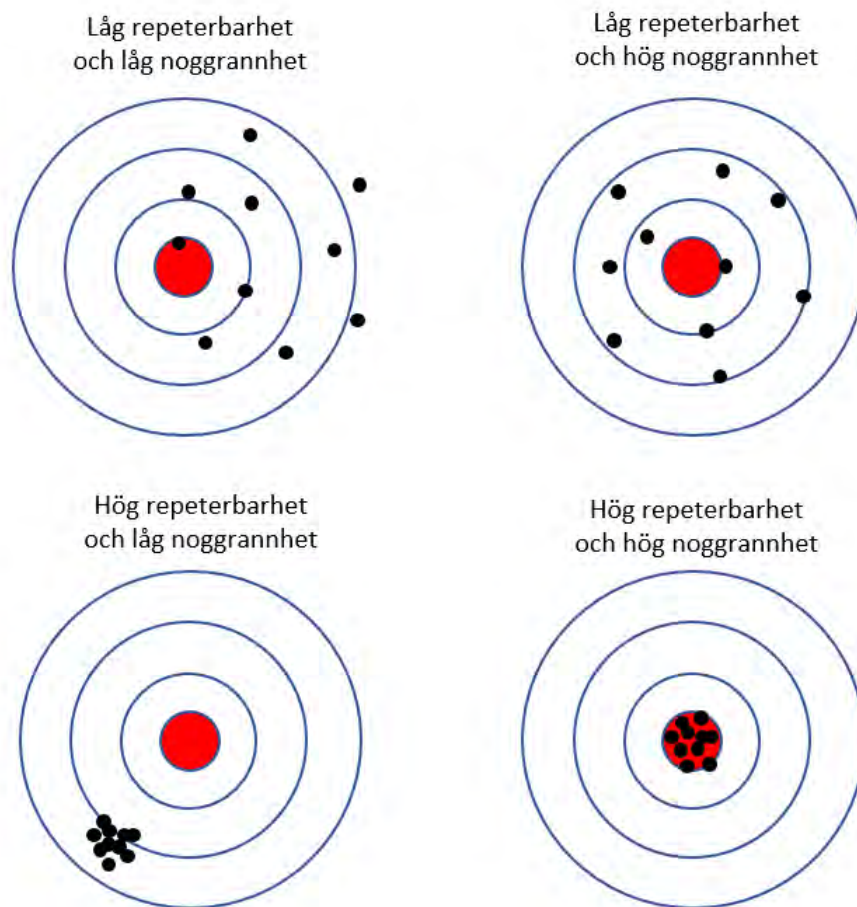
2.3 Toleranser

En tolerans anger för ett objekt de gränsvärden för godkända eller icke godkända dimensioner (Lilja, Olsson, Wickström, 1996). Toleranserna kan sättas på exempelvis planhet, vinkelräthet och längdmått. För att tillverka detaljer inom angivna toleranserna krävs en viss noggrannhet och repeterbarhet, vilka är prestandamått hos den tillverkande maskinen. Dessa uttryck och ett antal viktiga toleransmått presenteras nedan.

2.3.1 Noggrannhet och repeterbarhet

Noggrannheten hos en maskin är avvikelserna av uppnått mätvärde från önskat målvärde. För en serie av mätningar med oförändrade förhållanden kan noggrannheten anges som avvikelsen av mätvärdenas genomsnitt från önskat målvärde. Låg noggrannhet manifesterar sig som upprepande fel i samma riktning och kan oftast, om repeterbarheten inte är allt för låg, åtgärdas genom kompensering i styrsystemet eller justering av konstruktionen.

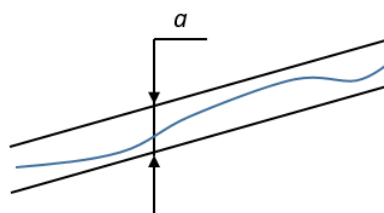
Repeterbarhet beskriver den inbördes överensstämmelsen mellan en serie mätvärden, för en tillverkningsmaskin innebär det förmågan att upprepa ett producerat resultat vid oförändrade förhållanden. Repeterbarhet visar sig som slumpmässiga fel och beror till stor del på styvheten hos konstruktionen. Låg repeterbarhet är svårt att kompensera för utan är ett resultat av maskinens konstruktion. Figur 2.3 visar skillnaden mellan repeterbarhet och noggrannhet. (Rago, J., 2011)



Figur 2.3: Illustration som visar skillnaden mellan repeterbarhet och noggrannhet. De röda cirkelarna är målvärdet, de svart punkterna representerar fyra olika serier av mätningar.

2.3.2 Rakhet

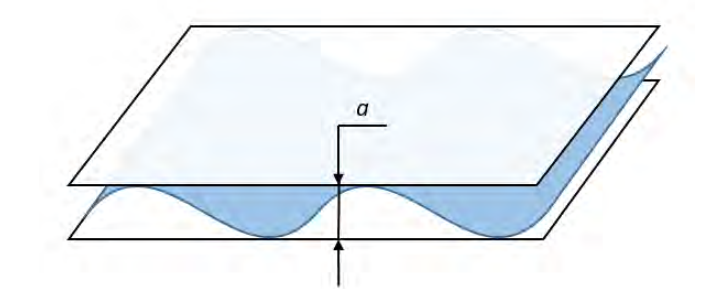
Definitionen av raketstolerans är att varje generatris på den toleranssatta ytan av en detalj skall ligga mellan två parallella linjer med inbördes avstånd enligt toleransen (Lilja, Olsson, Wickström, 1996).



Figur 2.4: Rakhet för en generatris, blå, inom toleransvidden a .

2.3.3 Planhet

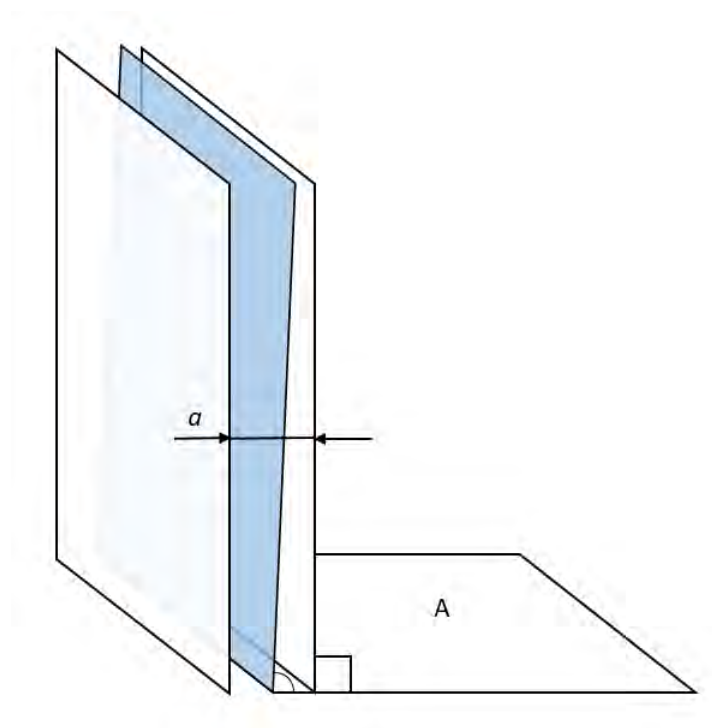
Definitionen av planhetstolerans är att den toleranssatta ytan på en detalj skall ligga mellan två parallella plan med inbördes avstånd enligt toleransen (Lilja, Olsson, Wickström, 1996).



Figur 2.5: Planhet för en yta, blå, inom toleransvidden a .

2.3.4 Vinkelräthet

Definitionen av vinkelräthetstolerans är att den toleranssatta ytan på en detalj skall ligga mellan två parallella plan, vinkelräta mot referensytan, med inbördes avstånd enligt toleransen (Lilja, Olsson, Wickström, 1996).



Figur 2.6: Vinkelräthet för ytan, blå, i förhållande till referansytan, A, inom toleransvidden a .

2.4 Kablar

Vid dimensionering och val av kablar för denna typen av applikation finns det i huvudsak tre aspekter att ta hänsyn till.

Tvärsnittsarea

Kablars tvärsnittsarea dimensioneras efter den ström ledarna skall bära för att överdriven värmeutveckling inte ska ske. Vid längre kabellängder ökar den totala resistansen i ledarna och då bör även spänningsfallet tas i åtanke.

Skärmning

Ledare till kraftelektronik med höga växlingsfrekvenser sänder ut elektromagnetiska störningar som kan störa omgivande utrustning. Det är därför viktigt att skärma dessa komponenter. Skärmning innebär att ett jordat hölje avskiljer ledare från varandra och avleder elektromagnetiska störningar. Skärmning kan alltså innebära att en ledande kabelstrumpa används på kablar, eller att kraftelektronik avskiljs med jordade paneler.

Kardelstorlek och antal

Beroende på vilken sorts installation som tillämpas bör kardelerna i kabeln dimensioneras efter finhet och antal för att anpassa kabeln till omständigheterna med avseende på yttre påverkan. Till exempel ska en kabel som utsätts för upprepad rörelse vara finkardelig för att undvika kabelbrott.

Projektet följer svensk elstandard SS 424 17 02, se till exempel (Wikipedia, 2015).

2.5 Stegmotorer

En stegmotor är en mekatronisk enhet som omvandlar elektroniska pulser till diskreta mekaniska rörelser. Rotationsriktningen som axeln på stegmotorn rör sig i beror på sekvensen av de elektroniska pulserna. Detta till skillnad från rotationshastigheten som helt beror på frekvensen av pulserna medan antalet pulser bestämmer rotationslängden. Motorernas upplösning avgörs av steglängden, och steglängden beror på hur många inkrement motoraxeln är uppdelad i. (Solarbotics, 2016)

Så länge stegmotorerna inte tappar steg är styrsystemet medvetet om stegmotorernas position i koordinatsystemet utan återkoppling under en så kallad open-loop-operation. Detta innebär att styrsystemet är medvetet om hur många steg det beordrat motorerna att ta, och besitter på så sätt ett börvärde för motorernas position. (Solarbotics, 2016)

2.6 Sensorer

Induktiva närhetssensorer är en typ av sensorer som kan användas för att identifiera metalliska föremål utan att kontakt uppstår. Konstruktionen bygger på att sensorn genererar ett högfrekvent magnetfält (Sensotronik, 2013). När ett metalliskt föremål interfererar med det genererade magnetfältet försvagas detta. Oscillatorns amplitud minskar vid denna interferens, och ett gränsvärde för denna amplitudminskning sätts för att motsvara det avstånd sensorn är avsedd för att registrera. (Menke, H., 2014)

En annan typ av sensor är mekaniska brytare som registrerar ett föremål via kontakt. Dessa brytare består av en knapp eller vipa som på grund av en applicerad kraft mekaniskt bryter eller sluter en elektrisk krets. När kontakten mellan föremålet och sensorn bryts så återgår brytaren till sitt ursprungsläge. (MachineDesign, 2002)

2.7 Styrsystem

Begreppet styrsystem syftar i denna rapport på de innefattande komponenter vars syfte är att hantera styrningen av det sammanställda mekatroniska systemet.

2.7.1 Styrkrets

En styrkrets används för att hantera kommunikation med en dator och styra systemet för att realisera de operationsinstruktioner som datorn förmedlar. Denna komponent hanterar styrning av stegmotorer, referenssökning av maskinen, input från sensorer och brytare, samt nödstopp och utgör alltså den centrala delen i det mekatroniska systemet.

Många styrkretsar av denna karaktär använder instruktioner som i en dator omvandlats från G-kod till rörelseinstruktioner. G-kod är ett numeriskt programmeringsspråk som idag används för många halvautomatiserade verkstadsmaskiner såsom vatten- och laserskärare, CNC-fräsar, och 3D-skrivare.

2.7.2 Mjukvara

För att upprätthålla kommunikation mellan dator och styrsystem används mjukvaran Mach3 (Newfangled Solutions, 2017) på datorn som sammanbinder dessa. I denna miljö kan samtliga maskinparametrar konfigureras, och systemet är såpass modulärt och konfigurerbart att egna script kan introduceras för införande av egna funktioner. Denna miljö läser in G-kod och kommunicerar vanligtvis med systemet via en parallellport, men det går även att använda sig av ethernetkommunikation. (Fenerty, A. & Prentice, J., 2003)

2.8 Signalkonvertering

Dagens datorer är sällan utrustade med så kallad parallellport för parallell kommunikation, därför kan man använda en extern enhet för signalkonvertering. Ett exempel på en sådan enhet är en Smoothstepper som omvandlar ethernetkommunikation till parallell kommunikation. (Warp9 Tech Design, 2017)

2.9 Spindel

De arbetande maskinelementen för roterande rörelse i maskiner kallas spindel. I verktygsmaskiner sätts fästanordningar för verktyg eller arbetsstycken i spindeln (Nationalencyklopedin, 2017b). I denna rapport avser ordet spindel en enhet innehållande en drivande motor, en driven roterande axel med lagring samt infästningsanordning för skärande verktyg.

2.10 Variable Frequency Drive

En variable frequency drive, VFD, är en frekvensomriktande drivkrets som används inom många mekatroniska applikationer. Frekvensomriktaren omvandlar växelspanning av en viss frekvens till en växelspanning av en annan. Denna krets styr motorers hastighet genom varierande inputfrekvens och spänning. (Wikipedia, 2017c)

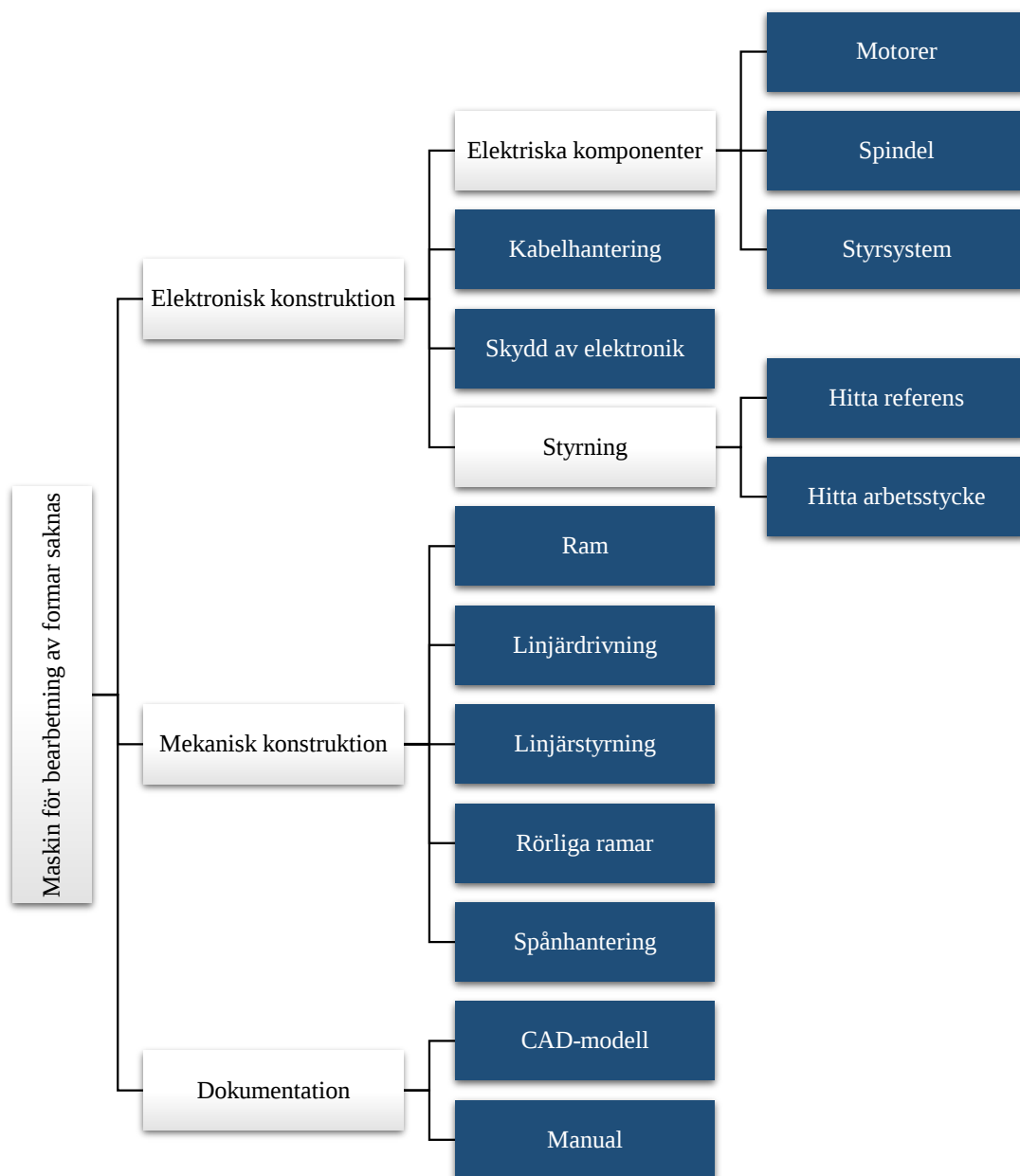
3

Problemöversikt och säkerhetsrisker

I kapitlet ges en överskådlig bild av problemet och vilka risker som finns kopplade till det. Problemöversikten och säkerhetsanalysen utgör grunden för vidare arbete med kravspecifikation och konceptgenerering.

3.1 Problemöversikt

Projektets huvudproblem är komplext och svårt att angripa som helhet och bryts därför ner i mindre delproblem. Lösningar till delproblemen kan sedan tillsammans utgöra en lösning för huvudproblemet. För att visualisera hur problemet bryts ned används ett problemträd där huvudproblemet bryts ner i ett antal nivåer enligt figur 3.1. Längst ut i varje gren, blå rutor, finns de delproblemen som blir grunden till den konceptgenerering som senare skall utföras. Exempel på dessa delproblem är kabelhantering, hitta referens, linjärdrivning och spånhantering.



Figur 3.1: Problemöversikt visualiserad i ett problemträd.

3.2 Säkerhetsrisker

Det finns många säkerhetsrisker att ta hänsyn till vid utformning av en CNC-fräs, både för elektroniken och för det mekaniska systemet. Här sammanfattas person- och maskinsäkerhetsrisker som vi behöver ta hänsyn till under drift och vid tillverkning.

3.2.1 Säkerhet vid drift

Risker vid användning av maskinen kan uppstå både som ett resultat av hur maskinen är konstruerad men även om användaren inte har tillräcklig kunskap om maskinen. Problem som kan uppkomma vid användning är exempelvis att användaren fastnar eller klämmer sig i maskinen. Snabbt flygande delar kan också vara en fara om någonting går sönder. Detta är främst en risk om maskinen används på fel sätt eller vid krock där överbelastning kan uppstå. För att säkerställa att en kollision inte uppstår måste maskinen vara medveten om sina ändlägen och arbetsstyckets position.

Det sammanställda mekatroniska systemet innefattar många rörliga kablar. Dessa kablar utgör en säkerhetsaspekt att undersöka eftersom det finns risk för att kablar nöts, kläms eller fastnar i maskinen. Därför är det viktigt att grundlig kabelhantering tillämpas. Utöver detta krävs det att alla rörliga kablar är tillverkade för att klara upprepade rörelser. Kablar kommer i möjligaste mån dras på ett sätt där de inte är utsatta för yttre påverkan eller rörelse av CNC-fräsens komponenter.

För högströmskomponenter måste hänsyn tas till kablarnas tvärsnittsarea för att undvika stora spänningsfall eller stor värmeutveckling. Ett för stort spänningsfall över en ledare begränsar komponentens prestanda och för stor värmeutveckling utgör en säkerhetsrisk som kan orsaka brand och/eller skada på komponenter. Vid överhettning kan även kabelhöljet smälta vilket kan orsaka kortslutning av ledarna med varandra eller ramen.

En bedömning över hur väl samtliga komponenter är jordade måste även utföras då stora potentialskillnader i kombination med dålig jordning eller avsaknad av gemensam skyddsjord kan medföra att mekaniska delar blir strömbelagda. Innan någon form av koppling får äga rum måste systemets parametrar även konfigureras efter de innefattande komponenterna för att undvika att dessa kommer till skada.

Vid bearbetning av material kommer dammpartiklar att spridas till omgivningen vilka sedan kan andas in. Detta kan vara problematiskt i längden, särskilt vid bearbetning av material som avger farliga partiklar.

CNC-fräsen kommer att användas av många personer med varierande kunskapsnivå, därmed är det mycket viktigt att operatörerna är väl informerade om maskinens begränsningar och användningsområden. Informationen kan förmedlas via varningsskyltar och informationsskyltar på maskinen eller i en användarmanual.

3.2.2 Tillverknings- och monteringssäkerhet

Tillverkning av delar till maskinen, som mestadels är tänkt att utföras i Chalmers prototypplabb, är förenat med vissa risker, till exempel om verktyg går sönder eller felaktigt handhavande av maskiner. Dessa risker anses omhändertagna genom att prototypplabbets regler och säkerhetsföreskrifter efterföljs.

Under installation av maskinen är de största riskerna kopplade till elsäkerhet. Där starkström kopplas skall kopplingarna ses över av behörig personal på Chalmers innan komponenterna spänningssätts. Med starkström avses ström av styrka, spänning eller frekvens som kan vara farlig för person eller egendom (Nationalencyklopedin, 2017c).

4

Kravspecifikation

En kravspecifikation formulerades där krav och önskemål redovisas med tillhörande måttetal som genom verifieringsmetoder kan kontrolleras för att granska om de uppnåtts. Kravspecifikationen användes under hela produktutvecklingsfasen för att säkerställa att arbetet fortskred i rätt riktning och att den färdiga fräsen uppnår de krav som finns på den.

4.1 Metod

Kravspecifikationen utgörs av bland annat dimensionskrav, toleranskrav och säkerhetskrav som har upprättats av kunden. Eftersom produkten är tänkt att användas av Chalmers Formula Student- och Eco Marathon-teamen utgjorde dessa användares preferenser en god grund för vilka krav som skulle ställas på produkten. Arbetsmiljöverket (Arbetsmiljöverket, 2017a) är en annan viktig aktör att ta hänsyn till och deras hemsida har fungerat som en bra källa till vilka arbetsmiljömässiga krav som måste sättas på maskinen.

För att få fram kravvärden som inte är direkt givna, gjordes antaganden och överslagsberäkningar tillsammans med uppskattningar efter att ämnet undersökts genom en informationsinsamling. Här var liknande maskiner till stor nytta för att få kunskap om vad en CNC-fräs bör klara av för att prestera på en rimlig nivå. En del krav har även tagits fram utifrån projektgruppens egna erfarenheter av liknande arbeten. Det är viktigt att det finns en verifieringsmetod till respektive krav för att möjliggöra omfattande kontroll av produkten.

4.2 Resultat

Utifrån ovanstående metoder har projektgruppen kommit fram till vad som kan anses som rimliga krav på exempelvis prestanda som vinkelräthet, precision och matningshastighet. Det finns även ett stort antal önskemål för produkten som projektet skall jobba mot att uppfylla, men som inte nödvändigtvis måste realiseras. De framtagna kraven och önskemålen har delats in i huvudområden som exempelvis prestanda, storlek och säkerhet.

Prestandakraven är det största kravområdet, här finns främst krav ställda från Chalmers Formula Student och krav som projektgruppen själva har kommit fram till. Exempelvis har CFS ställt krav på att fräsen skall kunna förflytta sig över ett område på 650 mm × 1250 mm × 320 mm. Detta på grund av storleken på de största formarna som de vill kunna fräsa till CFS-bilen, ett exempel på det är formen till framvingen vilken visas i figur 4.1. Projektgruppen har kommit fram till rimliga krav på

bland annat matningshastigheter, vinkelräthet och precision. Kravet för transportmatning är satt till 5080 mm/min och kravet för arbetsmatning till 1000 mm/min. 5080 mm/min är omvandlat från 200 tum/min som är en vanlig hastighet hos andra liknande maskiner. Vinkelrätheten mellan X -axeln och Y -axeln skall hålla sig inom en tolerans på 0,52 mm per 1000 mm och repeterbarheten skall vara inom en tolerans på 0,02 mm.



Figur 4.1: Framvinge på Chalmers Formula Students tävlingsbil 2016.

Storlekskraven på maskinen kommer från Chalmers lokaler och de utrymmen där maskinen kommer att placeras och transporteras. Yttermåttarna har med anledning av detta ett krav på 2000 mm $\times$ 2500 mm $\times$ 2200 mm. Projektgruppen har sedan kommit fram till att maskinen inte får väga mer än 1000 kg för att den skall kunna flyttas någorlunda lätt. Ett annat krav är att arbetshöjden skall ligga mellan 850 mm och 950 mm för att bli ergonomisk lämplig att använda.

Säkerhetsmässigt ska det finnas ett nödstopp och varningar på maskinen där det finns en risk att en olycka inträffar. Dessa krav är ställda av Arbetsmiljöverket som även har ett krav på att ljudnivån inte får överstiga 115 dB (Arbetsmiljöverket, 2017b). Det får inte heller finnas någon risk att kablar och andra delar trasslar ihop sig eller fastnar i någonting under drift.

Chalmers och Arbetsmiljöverket har också ställt krav på dokumentation. Det skall finnas en användarmanual till maskinen för att säkerställa att fräsen används på rätt sätt. Chalmers har dessutom uttryckt att fräsen skall levereras tillsammans med en komplett CAD-modell för att underlätta ett eventuellt vidareutvecklingsprojekt.

Ovanstående är ett utdrag av alla de krav som finns uppsatta i kravspecifikationen. Det finns dock många fler krav som inte kan redovisas här. Den fullständiga kravspecifikationen återfinns i bilaga A.

5

Konceptgenerering och konceptval

I det här kapitlet redovisas metoderna och resultatet för hela konceptgenereringen och konceptvalsfasen. Konceptgenerering och konceptval har haft lite olika upplägg för olika delar i systemet. För det mekaniska systemet användes en allmän metod med olika matriser för konceptgenerering och konceptval. För det elektriska systemet fanns ett framtaget förslag på grundläggande komponenter som behövde utvärderas och eventuellt kompletteras. Därför behandlades detta på ett annorlunda sätt.

5.1 Metod

De olika metoderna för konceptgenerering och konceptval som har använts i projektet presenteras nedan. Först för det elektroniska systemet och sedan för det mekaniska systemet.

För det elektriska systemet analyserades de föreslagna komponenterna utifrån en informationsinsamling. Dessa komponenter sattes inte ihop i olika koncept utan alla framtagna koncept innehåller samma elektriska system, de skiljer sig således bara åt på de mekaniska delarna. Anledningen till detta tillvägagångssätt är att dessa komponenter snabbt skulle beställas på grund av lång leveranstid. De skulle därmed inte hinna genomgå hela den konceptgenereringsfas som användes för det mekaniska systemet. Vid ett byte eller tillägg av komponent kontrollerades om den enskilda detaljen är kompatibel med det övriga systemet.

För att generera koncept utarbetades lösningar till de delproblem som definierats i problemträdet, se figur 3.1. Dellösningarna togs dels fram med hjälp av en faktain-samling där olika befintliga lösningar studerades men även genom brainstorming. Brainstorming är en metod där nya lösningar som inte etablerats på marknaden kan skapas. Genom att kombinera dessa dellösningar i en morfologisk matris skapas koncept som löser samtliga delproblem och därmed även huvudproblemet, att bearbeta trä och polymera material. Koncepten utvecklades därefter till en tillräckligt detaljerad nivå för att en grundlig och rättvis bedömning skulle kunna göras med avseende på hur de uppfyller de krav och önskemål som ställts. Denna utvecklingsfas innefattade exempelvis grundläggande hållfasthetsberäkningar och överskådliga designval.

För att välja ut det bästa konceptet tillämpas en systematisk matrismetod där de sämre koncepten hela tiden skall elimineras. Anledningen till att eliminera de sämre koncepten är att det blir svårt att skapa en tillräcklig överblick över alla koncept för att direkt kunna välja ut det bästa. Vid iterering skapas också en möjlighet att kombinera olika koncept för att hitta en ännu bättre lösning. För att genomföra detta används en elimineringsmatris och Pughs konceptvalsmatris som beskrivs i avsnitt 5.1.2 respektive 5.1.3.

En del av problemen som tidigare ställts upp i problemträdet är oberoende av övriga delar i konstruktionen och plockades därför bort innan den morfologiska matrisen. Exempel på detta är kabelhantering och infästning i arbetsbord. Lösningar till dessa problem kunde istället lösas enskilt då detta inte påverkade vilka övriga lösningar som valdes.

5.1.1 Morfologisk matris

För att kombinera ihop olika koncept användes för det mekaniska systemet en morfologisk matris. I matrisen finns alla delproblem med tillhörande dellösningar som tagits fram. Kombinationen skedde sedan genom att en lösning till varje delproblem valdes och på så sätt skapades ett koncept som skall kunna lösa samtliga problem. Genom att kombinera dellösningar på detta sätt kunde många olika koncept genereras. Det viktiga är att försöka identifiera vilka lösningar som fungerar bäst i kombination med varandra. En del kombinationer är inte alls möjliga att kombinera medans andra fungerar tillsammans. (Center for Creative Learning, 2005)

5.1.2 Elimineringsmatris

En elimineringsmatris användes för att eliminera alla koncept som inte klarar kraven. Alla koncept bedömdes utifrån kraven i kravspecifikationen om de uppfyllts eller inte. Om ett kravområde inte uppfyllts förkastas konceptet direkt eftersom alla uppsatta krav måste vara uppfyllda för att konceptet i slutändan skall kunna väljas.

5.1.3 Pughs konceptvalsmatris

De koncept som passerat elimineringsmatrisen jämfördes sedan utifrån hur väl de uppfyller olika önskemål. I varje matris utgår jämförelsen från ett valt referenskoncept. Resterande koncept bedömdes sedan om de uppfyller varje specifikt önskemål bättre, sämre eller lika bra som referensen. Bedömdes konceptet som bättre än referensen markerades detta med ett plus och om det bedömdes som sämre markerades detta med ett minus. När alla jämförelser var gjorda summerades antalet plus och minus för att generera en siffra på hur väl konceptet står sig mot referenskonceptet. (Burge, S., 2009)

Pughs konceptvalsmatris måste repeteras ett antal gånger eftersom resultatet kan bli annorlunda med en annan referens. Koncept som presterar sämre med stor marginal tas successivt bort tills ett eller några få koncept återstår. Får fler koncept liknande

resultat, görs en bedömning av hur viktiga de olika önskemålen i matrisen är för att kunna avgöra om skillnaden är större eller mindre än de genererade summorna. Om det fortfarande finns oklarheter om vilket koncept som är bäst, bör koncepten utvecklas ytterligare och de skillnader som finns mellan dem förtydligas.

5.2 Resultat

Efter att ha genomfört de metoder som beskrivits så kunde ett koncept med hög potential tillslut väljas. Resultatet från konceptgenerering och konceptval redovisar vilket utslag de olika matrismetoderna gav vid generering och val av det mekaniska systemet och vilka grundläggande elektriska komponenter som har valts i konceptet. Slutligen ges en fullständig beskrivning av det valda konceptet.

5.2.1 Konceptgenerering

Utifrån de problem som tidigare ställts upp i problemanalysen genererades ett antal olika dellösningar som ställts upp i en morfologisk matris, se figur 5.1. De genererade lösningarna för de olika områdena beskrivs i det här avsnittet.

		Dellösningar			
Delfunktion		1	2	3	4
Linjärlagring x- och y-led	A	Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärlagring z-led	B	Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärdrivning x- och y-led	C	Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
Linjärdrivning z-led	D	Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
X-ram	E	Portal	Travers		
Y-ram	F	Självbärande	Understödd	Ingen	
Basram	G	Ben	Stödjande ram		

Figur 5.1: Delproblem med tillhörande lösningar färdiga att kombineras i en morfologisk matris.

Linjärlagring

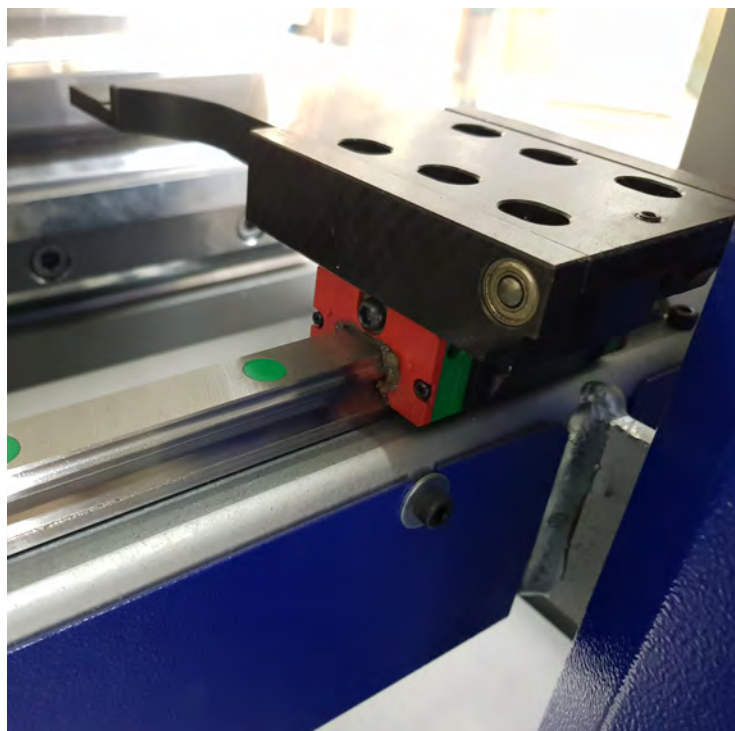
Tre olika typer av lagringar som kan användas är stångstyrning, skenstyrning eller egenkonstruerade vagnar med lagrade hjul som rullar på en skena.

Stångstyrning, som visas i figur 5.2, är en form av kullager där kulbussningen rör sig längs en härdad axel. Den här varianten ger relativt hög precision till ett bra pris jämfört med exempelvis skenstyrning som är betydligt dyrare. Om maskinen skulle snedställas påverkas stångstyrningen ganska mycket av detta och friktionen i lagrena ökar rätt snabbt av en liten snedställning. (Thomson Industries, 2016b)



Figur 5.2: Stångstyrning med tillhörande kulbussning.

Skenstyrning fungerar på liknande sätt som stångstyrning men där skenan som kulbussningen rör sig på har en mer fyrkantsliknande profil, se figur 5.3. Detta leder till en hög precision eftersom profilen är väldigt styv men också till att priset blir högt. Skenstyrningen tar upp moment och klarar av snedställningar på ett bra sätt. Friktionen i lagrena ökar relativt lite jämfört med stångstyrning om en liten snedställning uppstår. (Thomson Industries, 2016b)



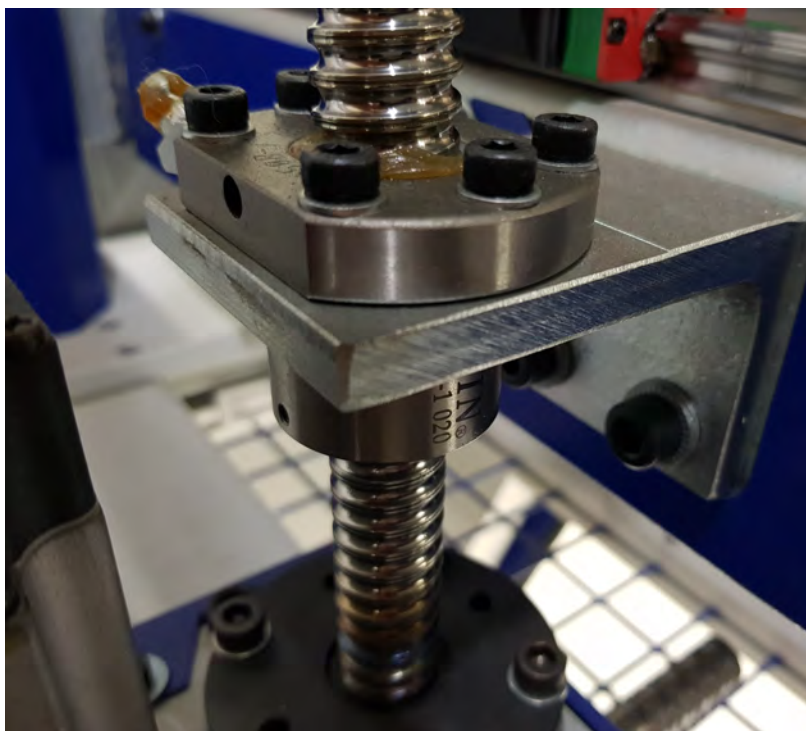
Figur 5.3: Skenstyrning med tillhörande kulbussning.

Egentillverkade lagrade vagnar som rullar på en typ av skena är ett billigt alternativ som dock inte uppnår särskilt noggranna toleranser. Det är dessutom en tidsödande process att tillverka den här typen av lagring. (Goran, S., 2010)

Linjärdrivning

När det gäller linjärdrivning av maskinen finns det flera olika alternativ som kan användas. Kulskruv, trapetsskruv, kuggstång och kuggrem var de alternativ som undersöktes.

En kulskruv som visas i figur 5.4 består av en skruv, upplagd i ändarna på vanliga kullager, och en mutter som är ett lagerhus innehållande kulor som rör sig i olika spår. Skruvarnas gängor är anpassade för att kulorna ska kunna rulla i dem vilket skapar låg friktion vid drivning av maskinen. Kulskruvar klarar också att köras i höga matningshastigheter men priset blir istället ganska högt. Andra fördelar med kulskruv är att den har lång livslängd, litet drivningsglapp mellan mutter och skruv samt att precisionen blir hög. (Thomson Industries, 2016a)



Figur 5.4: Kulskruv med tillhörande kulmutter.

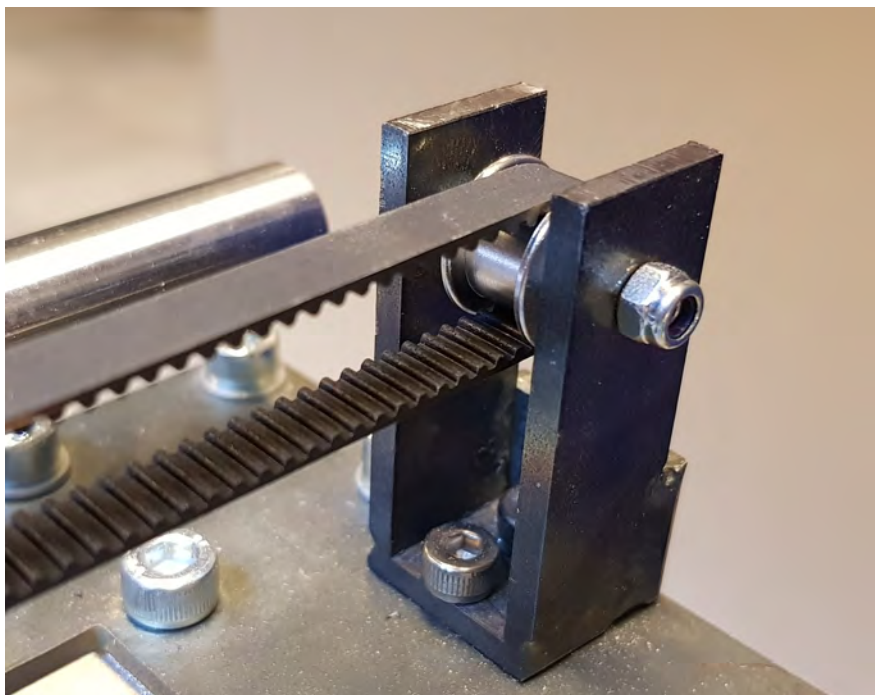
Trapetsskruven har till skillnad från kulskruven inga kulor i lagerhuset vilket leder till att friktionen blir högre. En fördel med hög friktion är dock att risken för självdrivning minskar vilket framförallt är viktigt när det gäller den vertikala Z-axeln. En annan fördel med trapetsskruvar jämfört med kulskruv är den lägre prisnivån. (Thomson Industries, 2016a)

Kuggstång som visas i figur 5.5 är en alternativ linjärdrivning som ger hög precision och klarar höga laster. Däremot kan självdrivning lätt uppstå vid användning av kuggstång och priset är högt. När det gäller smuts så är kuggstång ett av alternativen som klarar det bäst. (CNC Router Parts, 2017)



Figur 5.5: Kuggstång. (Pierce, E., 2003). Återgiven med tillstånd.

Kuggrem som visas i figur 5.6 är en drivning som också klarar smutsiga miljöer väldigt bra och har ett lågt pris. Den klarar av att ge mycket höga matningshastigheter men detta alternativ ger istället ett högt drivningsglapp. (Rawcnc Sweden AB, 2014)



Figur 5.6: Kuggrem.

X-ram

För förflyttning i Y -led är det två olika lösningar som tagits fram. Antingen byggs det upp fasta väggar längs med Y -riktningen och en bom placeras som en travers i X -led. Den andra lösningen är som en portal där sidorna också är rörliga och inte fasta väggar. Portallösningen är den vanligaste och har fördelen att det blir lättare att komma åt arbetsbordet från alla sidor. Nackdelen med en portal är att det blir fler rörliga delar och sämre stabilitet jämfört med en traverslösning.

Y-ram

Y -ramen är den del som är tänkt att bära linjärlagringen och linjärdrivningen i Y -led samt hålla upp arbetsbordet. Tre alternativ för detta har tagits fram. Det första är en självbärande överram som skall vara tillräckligt stabil för att inte behöva stöd underifrån av basramen. Den andra lösningen är att överramen skall vara understödd och därmed inte behöver vara självbärande för att ge stabilitet åt de komponenter som skall fästas i den. Ett tredje alternativ är att inte ha någon överram utan att linjärlagringen och arbetsbordet fästs direkt i basramen.

Basram

För basramen finns två alternativ på lösningar. Den första lösningen består enbart av ben för att få arbetsbordet i rätt höjd, detta ställer krav på en stabil överram. Alternativ två är att basramen ska ha en stödjande konstruktion så att en eventuell överram får bra stöd.

5.2.2 Eliminering av koncept

Konceptvalet börjar med en elimineringsmatris där tolv stycken koncept från den morfologiska matrisen utvärderas. Fyra stycken av koncepten kan direkt elimineras på grund av att de inte klarar de krav som ställts upp i kravspecifikationen. Koncepten med skenstyrning tas bort på grund av att de blir för dyra och inte klarar budgeten. Dessutom elimineras koncepten med lagrade hjul som linjärstyrning eftersom de är känsliga för smuts, kräver mycket underhåll samtidigt som de har sämre precision. Tillsammans med konstruktionen i övrigt gör detta att koncepten inte klarar prestandakraven.

Åtta av koncepten bedömdes kunna klara de uppsatta kraven och gick vidare till Pughs konceptvalsmatris. De åtta koncepten visas i figur 5.7 och elimineringsmatrisen återfinns i bilaga B.

5. Konceptgenerering och konceptval

Blå				
Delfunktion	Dellösningar			
	1	2	3	4
Linjärlagring x- och y-led	A Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärlagring z-led	B Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärdrivning x- och y-led	C Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
Linjärdrivning z-led	D Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
X-ram	E Portal	Travers		
Y-ram	F Självbärande	Understödd	Ingen	
Basram	G Ben	Stödande ram		

Grön				
Delfunktion	Dellösningar			
	1	2	3	4
Linjärlagring x- och y-led	A Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärlagring z-led	B Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärdrivning x- och y-led	C Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
Linjärdrivning z-led	D Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
X-ram	E Portal	Travers		
Y-ram	F Självbärande	Understödd	Ingen	
Basram	G Ben	Stödande ram		

Svart				
Delfunktion	Dellösningar			
	1	2	3	4
Linjärlagring x- och y-led	A Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärlagring z-led	B Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärdrivning x- och y-led	C Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
Linjärdrivning z-led	D Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
X-ram	E Portal	Travers		
Y-ram	F Självbärande	Understödd	Ingen	
Basram	G Ben	Stödande ram		

Brun				
Delfunktion	Dellösningar			
	1	2	3	4
Linjärlagring x- och y-led	A Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärlagring z-led	B Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärdrivning x- och y-led	C Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
Linjärdrivning z-led	D Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
X-ram	E Portal	Travers		
Y-ram	F Självbärande	Understödd	Ingen	
Basram	G Ben	Stödande ram		

Orange				
Delfunktion	Dellösningar			
	1	2	3	4
Linjärlagring x- och y-led	A Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärlagring z-led	B Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärdrivning x- och y-led	C Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
Linjärdrivning z-led	D Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
X-ram	E Portal	Travers		
Y-ram	F Självbärande	Understödd	Ingen	
Basram	G Ben	Stödande ram		

Turkos				
Delfunktion	Dellösningar			
	1	2	3	4
Linjärlagring x- och y-led	A Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärlagring z-led	B Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärdrivning x- och y-led	C Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
Linjärdrivning z-led	D Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
X-ram	E Portal	Travers		
Y-ram	F Självbärande	Understödd	Ingen	
Basram	G Ben	Stödande ram		

Rosa				
Delfunktion	Dellösningar			
	1	2	3	4
Linjärlagring x- och y-led	A Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärlagring z-led	B Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärdrivning x- och y-led	C Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
Linjärdrivning z-led	D Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
X-ram	E Portal	Travers		
Y-ram	F Självbärande	Understödd	Ingen	
Basram	G Ben	Stödande ram		

Lime				
Delfunktion	Dellösningar			
	1	2	3	4
Linjärlagring x- och y-led	A Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärlagring z-led	B Skenstyrning	Stångstyrning	Lagrade hjul	
Linjärdrivning x- och y-led	C Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
Linjärdrivning z-led	D Kulskruv	Kuggstång	Kuggrem	Trapetsskruv
X-ram	E Portal	Travers		
Y-ram	F Självbärande	Understödd	Ingen	
Basram	G Ben	Stödande ram		

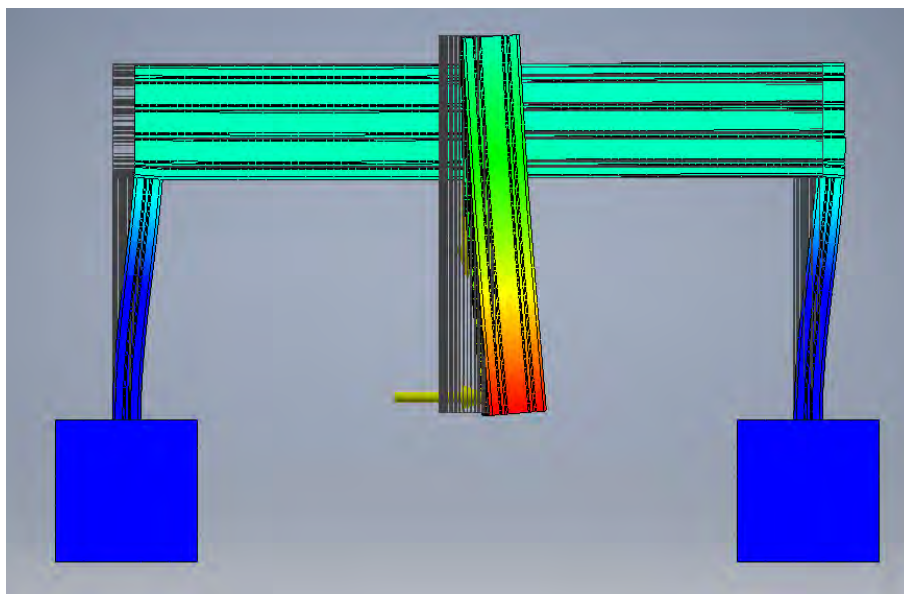
Figur 5.7: Kvarvarande koncept efter elimineringsmatrisen.

5.2.3 Konceptval

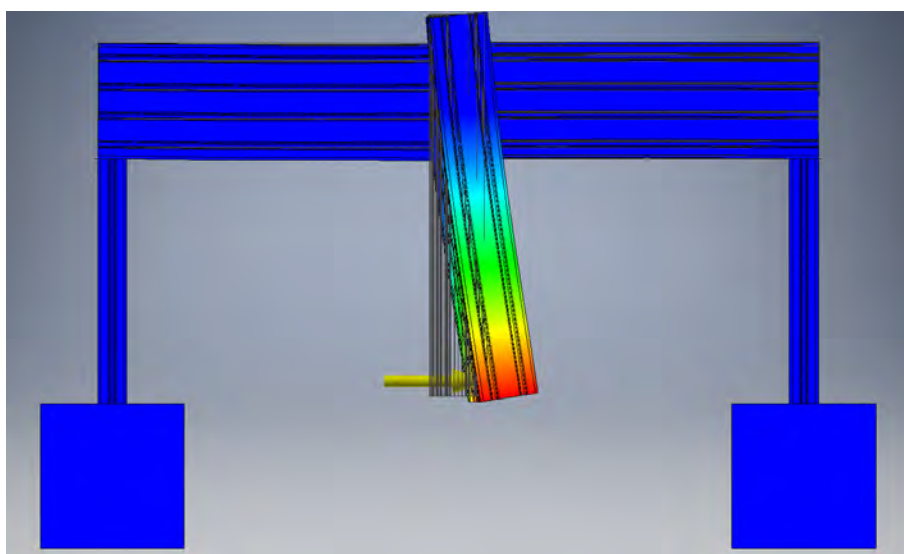
I Pughs konceptvalsmatris jämfördes de åtta koncept som skulle kunna uppfylla kraven. Kvalitéer som jämfördes var önskemål inom sex stycken huvudområden, kostnads- och komplexitetsdrivare, kundvärde, funktionalitet, robusthet, risker samt interna och externa önskemål. Huvudområdena bröts därefter ned i mindre delar, exempelvis bröts kundvärdet ned i förflyttning, upplösning, precision med mera. Kravspecifikationen ligger till grund för vilka önskemål som jämförts.

Som stöd till jämförelsen mellan användningen av portal och travers som X-ram görs belastningsfall i Autodesk Inventor (Autodesk, 2017). En enklare modell skapas för att kunna jämföra de två dellösningarna. I fallet med travers låses ytorna där X-bommen fästs medan det i fallet för portalen endast låses i underkant av portal-sidorna. Det här är en förenkling som inte helt stämmer överens med verkligheten men eftersom en eventuell traverslösning är tänkt att ha riktigt stabila väggar så kan den ändå göras i den här jämförelsen.

En maximal kraft beräknas utifrån motorns maxmoment till 3000 N, se bilaga F.1. Kraften läggs på både i Y-led och X-led där resultatet för X-led är mest intressant. Det är där resultatet skiljer sig mellan lösningarna. Belastningsfallen visas i figur 5.8 och 5.9. I X-led var skillnaden nästan det dubbla, till traversens fördel, medan det i Y-led var minimal skillnad. Bedömningen är dock att portalen kan förstärkas ganska mycket och därmed minska skillnaden mellan alternativen.



Figur 5.8: Figuren visar uppskalad deformation på en portalkonstruktion som belastas i X -led. Färgskalan går från 0 till 0,4474 mm, så den största deformationen är 0,4474 mm vid z-assemblens nedre del.



Figur 5.9: Figuren visar uppskalad deformation på en traverskonstruktion som belastas i X -led. Färgskalan går från 0 till 0,2308 mm, så den största deformationen är 0,2308 mm vid z-assemblens nedre del.

I den första Pugh-matrisen kan fyra koncept tydligt elimineras då de har mycket lägre poäng än de övriga koncepten. Eftersom de kvarvarande koncepten i grunden är väldigt lika varandra blir skillnaderna små även i den andra Pugh-matrisen, se figur 5.10. Härifrån kan dock även det bruna konceptet elimineras då det presterar märkbart sämre. Den första Pugh-matrisen återfinns i bilaga C.

Pughs konceptsvalsmatris		Koncept			
Kostnads/ komplexitetsdrivare	Antal komponenter (fler = sämre)	REFERENS	-	-	0
	Materialmängd		-	-	0
	Produktionstid		0	0	0
	Reparationskomplexitet		+	+	0
Kundvärdet	Förflyttning (xyz)		0	0	0
	Upplösning		-	0	0
	Precision		-	0	0
	Vinkelräthet (xyz)		+	+	0
	Transportmatningshastighet		0	0	0
	Maximalt arbetsstycke		0	0	0
	Yttermått		0	0	0
	Åtkomst arbetsbord		0	0	0
Funktionalitet	Förflyttningsbar		0	0	0
	Yta arbetsbord		0	0	0
	Antal interaktioner mellan funktioner/komponenter		0	0	0
Robusthet	Drifttimmar mellan större underhåll		0	0	0
	Styvhet		-	0	0
	Livslängd		0	0	0
	Antal toleranser som krävs på ingående komponenter		0	0	0
Risker	Tekniska risker i konstruktionsutmaningar		0	0	0
	Säkerhet för användaren		0	0	0
	Ekonomisk risk		0	0	0
	Innovationsnivå, beprövad teknik		0	0	0
Interna/externa krav	Utnyttjande av existerande resurser		-	-	0
	Svårighetsgrad att utveckla konceptet		0	0	0
	Möjlighet att vidareutveckla		0	0	-
Resultat	Antal "+"		2	2	0
	Antal "0"				
	Antal "-"		6	3	1
	Total		-4	-1	-1

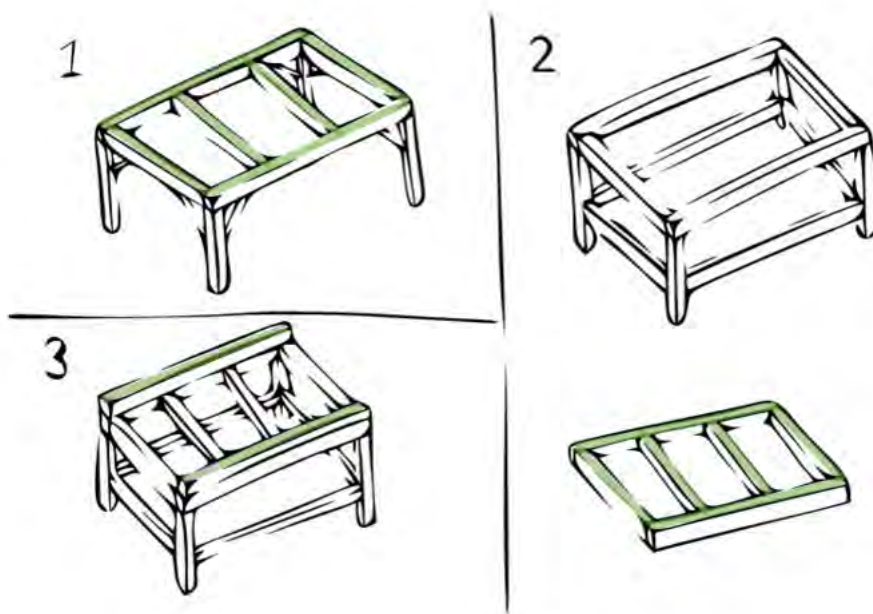
Figur 5.10: Den andra Pugh-matrisen där de kvarstående koncepten jämförs utifrån samma önskemål som i första matrisen men med en ny referens.

Resultatet från Pugh-matrisen ger alltså tre olika koncept som potentiella vinnare. Det som skiljer dessa åt är utformningen av basramen och Y-ramen som ska bära upp de resterande delarna av CNC-maskinen. De tidigare använda metoderna analyserade inte skillnaderna på basramen och Y-ramen tillräckligt ingående, således genomförs en mer ingående analys och diskussion.

5.2.4 Val av basram och Y-ram

Utifrån den morfologiska matrisen kan fyra olika lösningar på basram och Y-ram kombineras. De fyra lösningarna beskrivs nedan och nu har även materialval tagits med i beslutet. Skisser på de framtagna lösningarna visas i figur 5.11.

1. Det första alternativet är en överram byggd av aluminiumprofiler som är självbärande. Den ska alltså vara tillräckligt hållfast för att endast behöva understödjas på ett fåtal punkter. Konstruktionen bärs upp av en basram i stål som endast består av ben vilket sätter högre krav på överramen.
2. Alternativ två är en stödjande basram i stål som med hjälp av balkar mellan benen tar upp laster på ett effektivt och tillförlitligt sätt. Ovanpå basramen placeras aluminiumprofiler som en självbärande överram, tvärgående profiler ger stöd för arbetsbord och det finns således ingen svag punkt i konstruktionen.
3. Det tredje alternativet ser ungefär ut som föregående alternativ. Det har en stödjande basram i stål med skillnaden att de tvärgående balkarna är av stål och ingår i basramen istället för överramen. Därav blir basramen viktigare för hållfastheten. Två längsgående aluminiumprofiler som utgör överram är fästa på basramen.
4. Slutligen bygger alternativ fyra vidare på alternativ tre. Det som ändrats är att hela konstruktionen inklusive överramen är i stål.



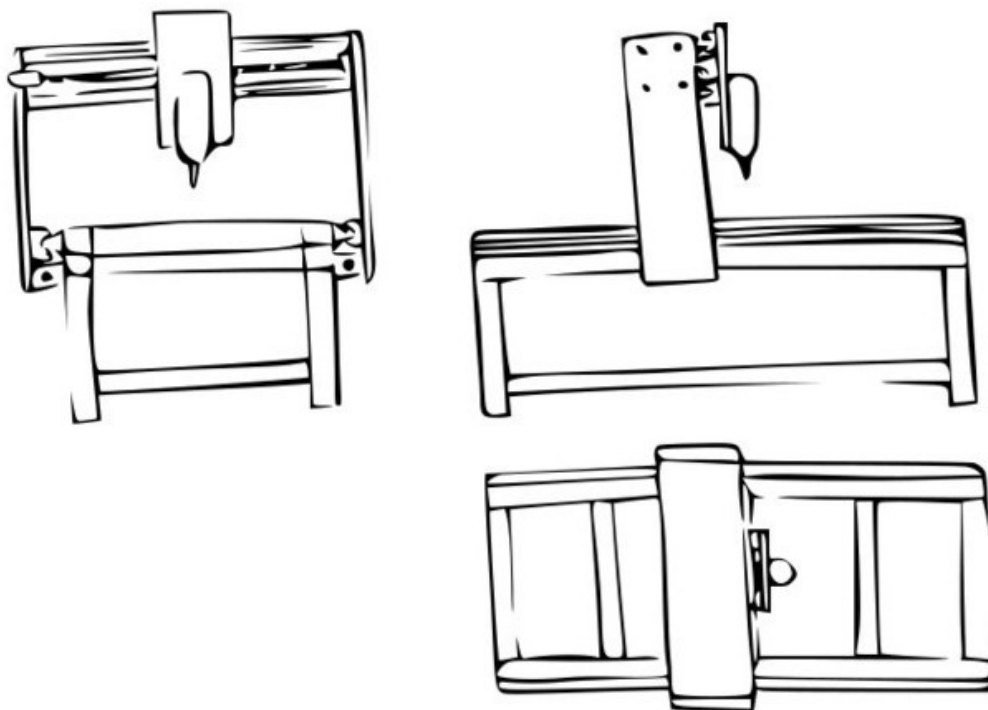
Figur 5.11: De olika delkoncepten på ramverk. Allt som skall vara i aluminium markeras i grönt, resterande material är i stål.

Valet blir att gå vidare med alternativ två. Kombinationen med en basram i stål och en överram av aluminiumprofiler har ett antal avgörande fördelar. Basramen blir en stabil grund som även motverkar vibrationer i och med sin tyngd. Stålramen i detta alternativ lämpar sig också bättre för att kunna använda pallyft vid transport av CNC-fräsen.

Aluminiumprofiler är väldigt raka då de extruderas fram vid tillverkningen vilket gör att arbetsbordet som ska fästas på överramen blir planare än vid användning av stål. Dessutom ska linjärlagringar monteras på överramen och det är ytterst viktigt att dessa har ett plant underlag. Aluminiumprofiler finns även med T-spår där T-muttrar enkelt kan monteras utan ingrepp och verktyg, vilket underlättar installation av övriga komponenter. Montering av aluminiumprofilerna är väldigt flexibel och justerbar vilket är ytterst viktigt för en maskin där precision är i fokus.

5.2.5 Beskrivning av valt koncept

Det koncept som väljs har stångstyrning med linjärdrivning i form av kulkruvar på alla tre axlar. X-ramen består av en rörlig portal som rör sig på en självbärande aluminiumram med tvärgående balkar som är understödd av en stabil basram i stål. En enkel skiss på konceptet visas i figur 5.12.



Figur 5.12: Skiss av det valda konceptet sett ur tre perspektiv.

5.2.6 Val av elkomponenter

För att utforma den mekatroniska sammanbindningen mellan elektronik och mekanisk konstruktion tas beslut angående de grundläggande elkomponenter som krävs för detta.

Motorer

För framdrivning av maskinen utvärderas olika motortyper, till exempel olika typer av stegmotorer och servomotorer. Fyra stegmotorer väljs då dessa är mest lämpade för maskiner av denna karaktär. Anledningen är att stegmotorernas steg kan räknas och används som referens för positionering för alla axlar vid operation. Att fyra motorer väljs beror på att två motorer är fördelaktigt på Y -axeln för att en vinkelräthet mellan X - och Y -axlarna skall upprätthållas. Detta fås genom en rätthetskalibrering vid påbörjan av ny en operation. Dessutom ska motorerna på Y -axeln flytta den största rörliga massan på maskinen.

Referenspunktssökning

För att maskinen skall kunna hitta och förhålla sig till det stadgade referenssystemet behöver ett system för referenskörning utformas, se avsnitt 2.2.2 och 2.2.1.

För denna referenspunktssökning beslutas det att använda induktiva närhetssensorer i ena ändarna av axlarna för att realisera denna funktion, se avsnitt 2.6. Utöver dessa givare väljs mekaniska mikrobrytare att användas i motsatt ände på samtliga axlar för att stoppa maskinen när den når ett ändläge.

Spindel

Vid valet av spindel undersöks flera utföranden av spindlar med avseende på dimensioneringen för denna applikation. Vi beslutar att använda en luftkyld spindel då denna inte kräver en extern vattenpump som motsvarande vattenkylda spindlar kräver. Den valda spindeln är en trefas asynkronmaskin och behöver därför en VFD för att kunna variera varvtalet, se avsnitt 2.10. En luftkyld spindel har normalt en högre ljudnivå än en vattenkyld men den valda spindeln anses klara ljudnivåkraven.

6

Detaljkonstruktion

Detaljkonstruktionen innefattar framtagning av en noggrant utvecklad CAD-modell med tillhörande tillverkningsritningar över konstruktionen och dess delkomponenter. De komponenter som konceptet bygger på dimensionerades och valdes slutgiltigt i den här fasen. Det gäller även en del mindre komponenter som inte finns med i konceptfasen då de inte påverkar övriga konstruktionen eller helt enkelt ligger på detaljnivå. Exempel på detta är nödstopp, brytare, kablar och fästen av olika slag. I detaljkonstruktionen gjordes även val av tillverkningsmetoder. Efter detaljkonstruktionen var produkten helt färdigutvecklad och redo att tillverkas.

6.1 Metod

För detaljkonstruktionen utfördes ytterligare informationsinsamling. Målet var att hitta detaljlösningar som passar det valda konceptet och kompletterar det med nödvändiga delar för att skapa en komplett maskin. Liknande maskiner på alla nivåer undersöktes; från enklaste amatörprojekten till kommersiella maskiner som kunde tänkas vara användbara för projektets utveckling. Ett studiebesök på Cliff Models AB genomfördes för att få en inblick i hur professionella fräsmaskiner är utrustade och fungerar.

En komponentlista togs fram för att på ett samlat ställe få en överblick av de olika komponenterna. Chalmers Tekniska Högskola har avtalsleverantörer som projektet tog hänsyn till när inköpsställe valdes.

6.1.1 Delsystemuppdelning

CNC-fräsen delades upp i ett antal moduler som skapar egna delsystem. Modulerna byggs upp av delar som antingen har konstruerats och modellerats eller köpekomponenter som har hämtats från tillverkarens hemsidor. Under hela processen lades stor vikt på att säkerställa att delarna är tillverkningsbara med de resurser som finns att tillgå på Chalmers.

Antalet delar bör hållas så lågt som möjligt, komponenter som uppfyller fler funktioner minskar mängden material och komplexitet samt sparar tid. Placering och utformning av komponenter ska underlätta monteringsprocessen och underhåll av maskinen. Under detaljkonstruktionen gjordes materialval, hållfasthetssimuleringar och andra beräkningar av olika slag som vägts in i designvalet när det gäller dimensionering av alla olika komponenter, både elektroniskt och mekaniskt.

6.1.2 Användning av programvaror

CATIA V5 (Dassault Systemes, 2017) är den programvara som använts för att konstruera 3D-visualiseringar av solidmodeller. CAD-programvaran har olika arbetsbänkar som tillsammans används för att skapa en komplett modell. För att göra enskilda delar användes framförallt den vanliga arbetsbänken i CATIA, men för tunna plåtar används en arbetsbänk som är till för design av metalliska skivmaterial. Fördelen med den arbetsbänken är att modellen skapas med de begränsningar som finns vid tillverkning. Önskad geometri och radie uppnås därmed vid bockning genom att inmatning av tillverkningsgenskaperna tillämpas i CATIA. För att skapa ritningar på solidmodellerna användes ytterligare en arbetsbänk där måttsatta ritningar skapas.

Slutligen användes en arbetsbänk kallad monteringsdesign. I monteringsdesign sätts restriktioner och villkor mellan delarnas förhållande till varandra. På detta vis skapas en komplett modell som består av flera delar. För att göra modellen mer överskådlig och lättarbetat gjordes flera olika monteringar som tillsammans skapar den kompletta monteringen av modellen. Vid detta stadiet genomfördes förflyttningar av de rörliga delarna för att säkerställa att inget krockade och att delarna kunde förflyttas så långt som krävs för att uppfylla kraven på bearbetningsvolym.

ANSYS (ANSYS, Inc., 2017) har använts för att utföra hållfasthetsberäkningar på den framtagna konstruktionen. I ANSYS importeras den CAD-modell som har skapats i CATIA V5 och kontakter mellan olika delar definieras för att de skall kunna röra sig som planerat. För att en simulering inte ska bli för beräkningstung, förenklas CAD-modellen innan den importeras. Detaljer som inte påverkar den totala styvheten hos konstruktionen, detaljer som inte är lastbärande och detaljer som inte behöver redovisas i resultatet tas därmed bort. Därefter knyts de valda materialen till varje del så att konstruktionens styvhet blir den önskade. Randvillkor och laster som kopplar samman den framtagna modellen och dess omgivning införs. Innan simuleringen genomförs skapas ett beräkningsnät där modellen delas in i finita element. Nätet måste anpassas för att ge ett bra resultat samtidigt som simuleringen inte får bli för beräkningstung. Det resultat som simuleringen skulle beräkna valdes till deformation och effektivspänning enligt von Mises för att kunna kontrollera mot materialets flyt- och brottspänning.

6.2 Resultat

Resultatet från detaljkonstruktionen utgörs av CAD-modellen som visar hur delar har utformats och placerats för att kunna tillverkas och monteras tillsammans. Resultatet från de simuleringar som gjorts i ANSYS och övriga beräkningar som använts vid dimensionering redovisas som motivering till olika val i konstruktionen. Innan dess beskrivs resultatet på detaljval av elektronikkomponenter och hur de är dimensionerade. Hänsyn har tagit till att elektronikkomponenterna ska samverka med varandra och skapa ett komplett styrsystem till maskinen.

6.2.1 Dimensionering och val av elkomponenter

Vid utformning av styrsystemet måste hänsyn tas med avseende på de krav som satts för maskinen vid dimensionering av samtliga komponenter. Nedan presenteras de val som gjorts när det kommer till dessa komponenter och hur det valda konceptet ser ut elektroniskt.

Styrkrets

Den centrala komponenten i det mekatroniska systemet är styrkretsen, därmed speglar dess karakteristik mycket stor roll och anpassas väl till de funktioner som kravs satts på CNC-fräsen. Det styrkort som är bäst anpassat till CNC-fräsens behov är Geckodrive G540 (Geckodrive Motor Controls, 2017). Styrkretsen är utrustad med fyra utgångar för motorer som tillåter fyraxlig drift. I detta fall används den fjärde utgången för en andra motor på *Y*-axeln, denna konfigureras då som en slav-motor till den primära motorn på *Y*-axeln. Detta styrkort är även kompatibelt med mjukvaran Mach3 som används för styrning av systemet.

Signalkonverterare

För signalkonvertering väljs en Smoothstepper-krets som upprättar kommunikation mellan datorn och CNC-utrustningen via ethernetkommunikation. Kretsen simulerar tre parallellportar varav en används för kommunikation med styrkretsen och resterande öppnar för expansionsmöjligheter. Den främsta fördelen med kretsen är att den förbättrar signalkvalitet och robusthet med avseende på störningar. Därmed ökar systemets pålitlighet då bland annat risken för stegbortfall från motorerna minskas.

Spindel och VFD

Spindeln som väljs är luftkyld, har en effekt på 2,2 kW och drar vid maxlast 11 A ström. Med en spindel med effekten 2,2 kW finns möjligheter för bearbetning av mer krävande material. Framförallt blir spindeln slitstark och större verktyg kan användas eftersom den använder ER20-hylsor vilket innebär att verktyg upp till 13 mm i skaftet kan användas. Vid fräsning av de flesta geometrier till formar är det stora mängder material som fräses bort. En starkare spindel med större verktyg kan då avverka mer material på kortare tid än en mindre, vilket enligt intervju med operatör på Cliff Models (14 februari, 2017) gör stor skillnad på den totala bearbetningstiden per detalj. Detta är grunden till valet av en mer robust spindel då kostnadsskillnaden var relativt liten. Till spindeln finns en VFD, variable frequency drive, som ger strömförsörjning till spindeln och styr dess hastighet genom att variera frekvensen på spänningen.

Stegmotorer

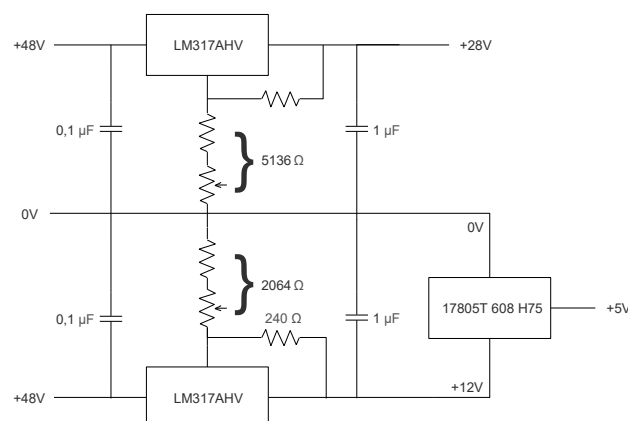
Fyra stegmotorer av storlekstypen Nema 23 valdes för framdrivning längs maskinens tre axlar. Två för Y -axeln, en för X -axeln och en för Z -axeln. Dessa stegmotorer har en steglängd på $1,8^\circ$, alltså 200 steg per varv. Motorerna arbetar med en spänning på 48 V och förbrukar 3,5 A vid maxlast. Eftersom stigningen på kulskruvorna är 5 mm/varv, se avsnitt 6.2.2, ger detta en steglängd för maskinens förflyttning på 25 μm . Styrkretsen G540 tillåter microstepping upp till 10 gånger vilket medför att minimal steglängd för maskinen är 2,5 μm .

Strömförsörjning

Samtliga komponenter i systemet, utöver spindeln och VFD-enheten, kräver likström. Därför används två så kallade switchande nätaggregat som förser systemet med 48 V och 7,5 A vardera. Som tidigare nämnt drar stegmotorerna 3,5 A vid maxlast vardera. Strömförsörjningen dimensioneras med hänsyn till största möjliga belastning och stegmotorerna kan i detta fall maximalt konsumera 14 A tillsammans vid 48 V. Detta medför att nätaggregaten parallellkopplas för en total strömförsörjning på 15 A. Att två nätaggregat köps är av kostnadsskäl, och dessa två aggregat följer tillsammans, vid parallellkoppling, samma karakteristik som ett traditionellt transformatornätaggregat dimensionerat efter omständigheterna.

Spänningsomvandlare

Flera komponenter i systemet kräver en lägre spänning än 48 V, därmed konstrueras en spänningsomvandlarkrets för att förse detta behov. Dessa komponenter innefattar de induktiva närhetssensorerna som förses med en spänning på 28 V, apparatlådans fläkt som drivs med 12 V och signalkonverteraren som kräver en spänning på 5 V. Kretsen realiseras med hjälp av två reglerbara spänningsomvandlare och en fast spänningsomvandlare till signalkonverteraren då denna är känsligare och kräver en jämnare spänning. Den framtagna kretsen visas i figur 6.1.



Figur 6.1: Kopplingsschema av spänningsomvandlarkretsen.

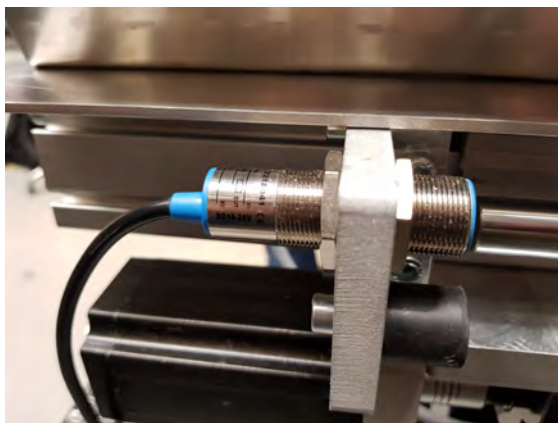
Kablage

Skärmskydd används i kablarna till de störningskänsliga närhetssensorerna och stegmotorerna. Spindelkabelns höga spänning och frekvens riskerar att inducera störningar i omgivande ledare, därför har denna också skärmats för att vidare begränsa störningar.

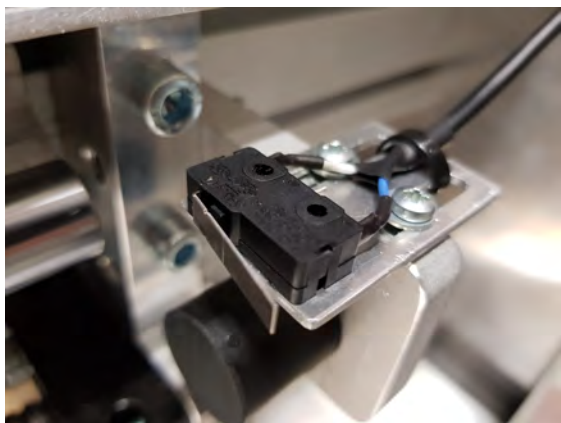
Sensorer

I ena ändan av samtliga axlar i maskinen monteras induktiva närhetssensorer, se figur 6.2. Den position maskinen står i när en sensor aktiveras agerar som referens för att ange det globala koordinatsystemets nollpunkt. Därmed vet styrsystemet var i koordinatsystemet maskinen är och kan sedan fortsätta hålla reda på positionen genom att räkna steg på stegmotorerna. Dessa sensorer är mycket exakta vilket möjliggör att fortsätta fräsa på ett redan påbörjat arbetsstycke efter att maskinen varit avstängd eller av någon annan anledning tappat referensen. Genom att placera ytterligare en induktiv närhetssensor vid Y -axelns slavmotor korrigeras portalens vinkelräthet genom att nollställa båda sidor av Y -axeln.

På motstående sida av de induktiva närhetssensorernas placering på axlarna, placeras mekaniska mikrobrytare, se figur 6.3. Dessa tillsammans med de induktiva närhetssensorerna agerar som ändlägesbrytare och är därmed ett extra skydd utöver de arbetsgränser som konfigureras i mjukvaran. Både de induktiva närhetssensorerna och de mekaniska brytarna är normalt slutna, NC, vilket innebär att dessa sänder en hög signal så länge brytaren inte aktiveras. Detta medför att maskinen stannar om en sensor går sönder eller om kopplingen av någon anledning bryts.



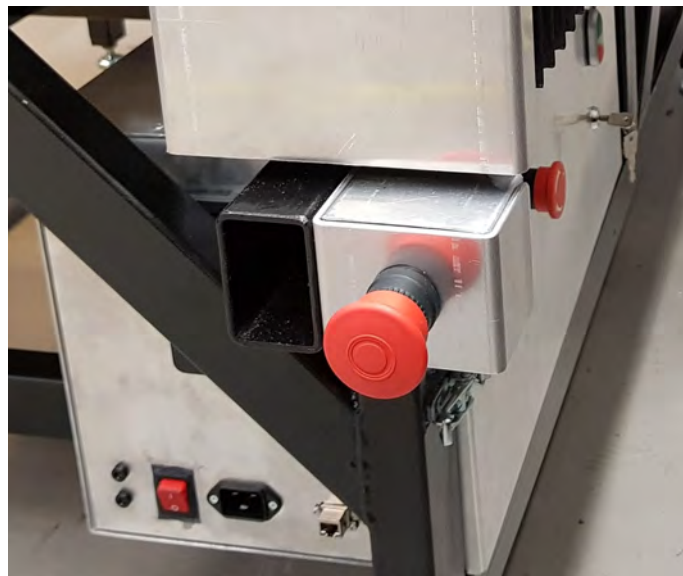
Figur 6.2: Induktiv närhetssensor monterad på maskinen.



Figur 6.3: Mikrobrytare monterad på maskinen.

Nödstopp

På grund av säkerhet och maskinens storlek så utrustas CNC-fräsen med ett flertal nödstopp. Ett nödstopp placeras på vardera kortsida samt ett tredje på apparatlådan för att de skall vara lättillgängliga, detta visas i figur 6.4. Nödstoppens brytare är av NC-typ, vilket innebär att styrkretsen aktiverar nödstopp om kontakten med dessa bryts. Detta medför att hantering av nödstopp skall vara utformad enligt AND-logik med avseende på signalen. Det vill säga att signalen i kretsen endast är hög, och därav aktiv, om alla nödstoppsbrytare är inaktiverade.



Figur 6.4: Nödstopp monterat på maskinen.

Kopplingsschema

Ett kopplingsschema tas fram för att redogöra för hur styrsystemet skall sammankopplas, se bilaga D, och utgör därmed ett bra underlag vid installation av styrelektroniken. I tillägg till detta fyller kopplingsschemat syftet att underlätta vid underhåll, felsökning och vidareutveckling.

6.2.2 Dimensionering av kulskruv

Utifrån den budget som projektet har och vad andra liknande projekt använt sig av, ansågs en kulskruv med diameter 16 mm med gängstigning 5 mm vara lämplig. Kulskruven kontrolleras mot knäckning enligt Eulers tredje belastningsfall (Alfredsson, 2014), eftersom randvillkoren stämmer överens med kulskruvens uppläggning med en ände fast inspänd och en fritt upplagd. Detta påvisade en säkerhetsfaktor mot knäckning på 1,8. Beräkningarna är gjorda med avseende på krocklast, skruvens innerdiameter 14 mm och en sträcka på 1,2 m vilket är den längsta sträcka som kan tänkas utsättas för krocklast. Att använda gängans innerdiameter är ett konservativt val som underskattar skruvens styvhet ty även gängan hjälper till att styva upp. Utförliga beräkningar på knäckning finns redovisade i bilaga F.2. Krocklasten beräknas med avseende på de valda motorernas maxmoment och kulskruvens stigning till 3000 N. Utförliga beräkningar på detta finns i bilaga F.1.

Kulskruven kontrolleras också mot självsvängning där utförliga beräkningar finns i bilaga F.3. Den lägsta egenfrekvens som kan uppstå för kulskruvarna beräknas till 28,44 Hz. Detta kan ske på Y -axeln när maskinen, i detta fall portalen, befinner sig i sitt ändläge. För X - och Z -axeln blir egenfrekvenserna högre på grund av att det är en kortare frigående sträcka på skruvarna. Den maximala frekvens som kan åstadkommas med stegmotorerna ligger på 21,67 Hz. Däremot kommer det maximala varvtalet på 1300 rpm aldrig att kunna köras i maskinens ändlägen och rotationsfrekvensen kommer därmed aldrig vara nära den beräknade egenfrekvensen. Det krav som är satt på maximal matningshastighet ligger på 5080 mm/min vilket motsvarar 1000 rpm. Denna matningshastighet skulle ge en maximal frekvens på 16,7 Hz.

På Y -axeln används två kulskruvar, en för varje motor med en längd på 1500 mm. X -axeln har en kulskruv som är 1000 mm lång. I Z -led består linjärdrivningen av en kulskruv med längden 500 mm.

6.2.3 Linjärstyrning

Linjärstyrningen består av totalt sex stycken understödda linjärstänger, två för varje axel, med en diameter på 16 mm för den härdade stängen. Användandet av två linjärstänger per axel samt två kulbussningar per linjärstång ger axlarna endast en bestämd frihetsgrad. De andra komponenterna som linjärstyrningen består av är tillhörande kulbussningar med kulor som cirkulerar i bussningen. Kulbussningarna är justerbara i hur snäv kontakten är mellan kulbussningen och stängen är för att minimera glapp.

Längden på linjärstängerna matchar det för kulskruvarna, se avsnitt 6.2.2. Eftersom två kulbussningar används per linjärstång blir den möjliga förflyttningen i lederna lika med linjärstångens längd minus yttermåttet mellan kulbussningarna. Detta ger exempelvis en förflyttning i Y -led på mer än 1250 mm vid ett yttermått mellan kulbussningarna på mindre än 250 mm eftersom den totala längden är 1500 mm.

6.2.4 Basram

Basramen skall bära mycket vikt, i skedet då dess konstruktion fastställdes uppskattades den totala vikten som kan belasta den till uppemot 600 kg, varav cirka 300 kg är vikten för den maximala storleken på polyuretanblock som skall kunna bearbetas i maskinen (Ciba Specialty Chemicals, 1998). Baserat på erfarenhet väljs som första iteration fyrkantsprofiler av stål i dimension $60\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ med 3 mm i godstjocklek som konstruktionsmaterial. För att underlätta materialbeställning, tillverkning samt för att ge ramen ett enhetligt utseende väljs denna profildimension för hela ramen. Stålprofilerna skall sammanfogas genom svetsning.

Eftersom stålkonstruktioner lätt slår sig vid svetsning och för att vi inte har tillräckliga möjligheter att rikta hela basramen så placeras distansblock ovanpå basramen som ska utgöra ett plan för överramen att vila på. Tio stödpunkter ansågs rimligt, fyra på varje långsida och en på mitten av varje kortsida. Detta ger förhållandevis korta spann mellan de punkter som den övre ramen är understödd av. Stödpunkterna måste vid tillverkning vägas av så att de ligger i samma plan inom rimlig tolerans. Basramen konstrueras för att utgöra en styv grund för dessa stödpunkter. Den anpassas också för att bära upp inneslutningen av maskinen samt dess apparatskåp.

En fackverksliknande konstruktion med de tio stödpunkterna samt plats för apparatlåda modelleras i CATIA, se figur 6.5. Då det anses viktigt att tidigt börja med tillverkningen av basramen var det under konstruktionen av denna inte fastställt hur inneslutningen av maskinen skulle se ut eller fästas i basramen. Men den valda konstruktionen möjliggjorde många alternativ till infästning tack vare svetsbarheten samt att den är relativt okänslig för ytterligare last på grund av de grövre dimensionerna.



Figur 6.5: Konstruktion av basramen med stöd för överramen, stöd för inneslutningen och justerbara maskinfötter.

Utvärdering av den första iterationen av basram görs genom simulering i ANSYS. För att kontrollera den generella styvheten sätts tre av benen till fixerade medan det fjärde helt utan stöd, detta med pålagd last motsvarande vikten av maskinen och material som ska bearbetas. Deformationen var liten och stödpunkternas förskjutning var i storleksordningen hundradels millimeter. Största förskjutningen var 0,02 mm vilket ansågs tillräckligt litet för att inte påverka maskinens prestanda. Dessa resultat är tillfredsställande och det beslutas att stå fast vid denna första konstruktion.

6.2.5 Överram

Den överram som ska placeras ovanpå basramen utgörs av aluminiumprofiler som skall bära upp arbetsbordet. Profilerna ska monteras ihop med vinkeljärn som fästs i profilernas T-spår. Aluminiumprofilerna väljs till 60 mm × 60 mm och 60 mm × 30 mm bland annat för att T-spåren skall passa med linjärlagringens hålbild. I samma analys där basramen belastas, är överramen med i testet där det visar sig att dimensionerna är tillräckliga för ändamålet. Antalet tvärbalkar av aluminiumprofiler mellan de två aluminiumprofilerna i Y-led är sex stycken. Det ger ett centrum-centrum avstånd på 282 mm mellan varje tvärbalk, vilket ger ett bra understöd till arbetsbordet samt många fästpunkter.

Linjärlagringarna och kulskruvarna i Y -led placeras på utsidan av överramen för att ge maximal arbetssträcka i X -led men samtidigt hålla maskinens totala yttermått nere. Efter ett beslut om att fräsen skall inneslutas helt konstrueras bockade plåtar runt hela ramen. Dessa plåtar motverkar att damm läcker ut under maskinen. Plåtarna på långsidans ovansida fungerar som en styrkanal till de bälgar som används för att skydda linjärstyrningen och linjärdrivningen. Även ändplåtar på de profiler som är riktade i Y -led konstrueras för att möjliggöra infästning av bälgar. Den färdiga detaljkonstruktionen av överramen visas i figur 6.6.



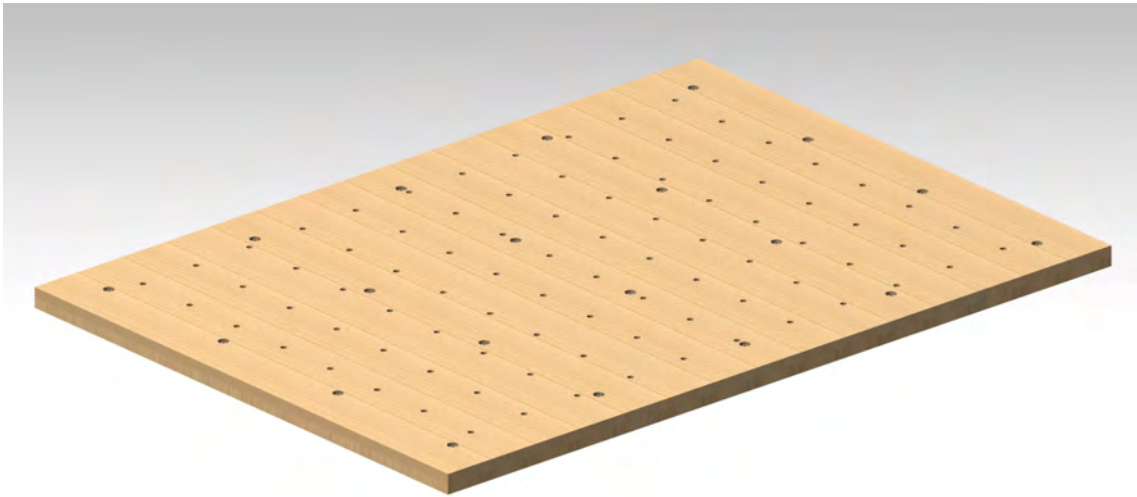
Figur 6.6: Detaljkonstruktion av överramen.

6.2.6 Arbetsbord

Designen av arbetsbordet var ett fristående moment och fanns inte med i konceptgenereringen eftersom den inte var beroende av utformningen på de övriga delarna av CNC-fräsen.

Arbetsbordet görs i MDF, ett material som är styvt och har en plan yta. Två MDF-skivor på 19 mm styck används ihopmonterade på varandra. Den understa skivan fästs i överramen med skruv i planförsänkta hål. Den övre MDF-skivan placeras ovanpå och monteras i den undre skivan, även den med skruv i planförsänkta hål. Dessa hål är tillräckligt djupa för att den övre skivan ska kunna användas som offerskiva. Offerskiva är användbart när behovet finns att fräsa djupare än arbetstyckets undersida. Den undre skivan har 24 stycken fästpunkter och är fäst i alla sex aluminiumtvärbalkar i överramen. Offerskivan är i sin tur fäst på 20 ställen utspritt symmetriskt på MDF-skivan för att kontakten mellan skivorna ska vara så bra som möjligt. Som namnet anspelar utformas offerskivan för att vara utbytbar när den slitits ut.

Arbetsstycken ska kunna spännas fast i arbetsbordet. För att lösa detta har arbetsbordet 88 stycken hål, med 120 mm mellanrum centrum-centrum i både *Y*-led och *X*-led vilket gör dem användbara som referenspunkter. Dessa infästningshål går genom båda skivorna och underifrån placeras inlagsmuttrar för att kunna spänna fast ett arbetsstycke mot arbetsbordet med hjälp av skruvar och olika tillbehör. Designen med de olika hålbilderna modelleras i CATIA, se figur 6.7.



Figur 6.7: Konstruktion av arbetsbord.

6.2.7 Portal

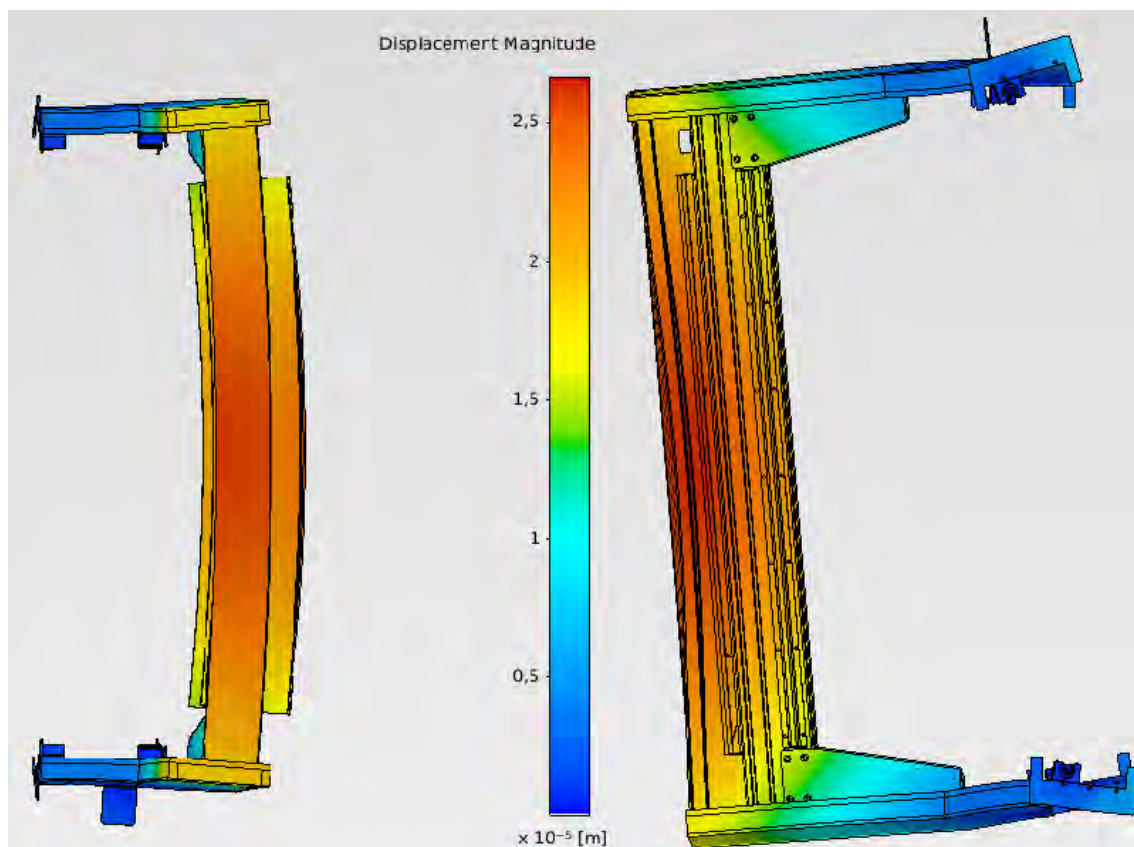
En av de viktigaste sakerna att ta hänsyn till vid dimensionering av portalen är att den skall klara de laster som uppkommer på grund av skärkrafter på verktyget. För att dimensionera mot detta används beräkningar som görs för skärkrafter och eventuell krock. Vid krock är det viktigt att konstruktionen inte plasticerar och blir skev medan det viktigaste vid normal drift är att utböjningen hålls ned så att toleranserna inte blir för stora.

Att alla delar i portalen konstruerades i aluminium beror främst på att det är lättbearbetat. I konstruktionen finns många detaljer som behöver bearbetas i form av gängning, bockning, planfräsning och så vidare. Bearbetbarhet blev därför en avgörande faktor. Aluminium ger också hög styvhet per viktenhet vilket är en klar fördel som leder till att den rörliga massan blir låg.

Dimensioneringen sker med hjälp av ANSYS där ett antal olika portalsidor testas med avseende på beräknade skärkrafter, se bilaga F.4 och F.5. Ett av materialen som skall bearbetas är polyuretan men då det finns dåligt med dokumentation på skärdata för polyuretan så användes ett överdimensionerande fall i form av hårda plaster. Dessa krafter beräknas vara 150 N för finbearbetning och 650 N för grovbearbetning. För trä som är ett annat material som skall kunna bearbetas beräknades skärkrafterna till 43 N för finbearbetning och 171 N vid grovbearbetning.

För krockfallet så appliceras den statiska maxlasten från stegmotorerna på 3000 N. Stegmotorernas maximala axialkraft finns i bilaga F.1. Krafterna placeras i ett första skede på portalens bom i X -led och Y -led.

De första varianterna av portalsidor som analyseras består av 20 mm aluminiumplåt och visar sig vara för svaga och förstärks med distansdelar som täcks med en tunnare plåt för att skapa en lådliknande form vilket ger större yttröghetsmoment med mindre material. Istället för 20 mm plåt används 10 mm på insidan av portalsidorna. Lådformen på portalsidorna slutar innan kulbussningarna skall fästas. Detta för att tvärsnittsmomentet går mot noll nere vid linjärlagringarna. För att förstärka ytterligare fästs aluminiumstöd mellan bommen och insidan av portalsidorna. Dessa stöd är bredast längst upp mot bommen där det största momentet uppstår och minskar sedan kontinuerligt längre ned mot basramen. Först med den här dimensioneringen nås en acceptabel utböjning på cirka 0,027 mm för fallet med hårda plaster. I figur 6.8 visas utböjningen då portalen belastas i Y -led, som slutligen blev den känsligaste riktningen. Observera även här att lägre skärkrafter kan förväntas vid normal drift.



Figur 6.8: Förstärkt utböjning då portalen belastas med skärkraften 150 N (finbearbetning) i Y-led. Sett ovanifrån och framifrån.

För att kunna utnyttja så mycket så möjligt av arbetsbordet i Y-led skapas bakåtlutande portalsidor. En annan fördel med detta är att bommen i X-led inklusive z-assemblens tyngdpunkt hamnar mellan kulbussningarna på linjärstyrningen i Y-led. När tyngdpunkten befinner sig mellan kulbussningarna uppstår ett mindre moment på dessa. Eftersom det finns rörliga delar i Z-led uppstår en del krafter vid accelerationer och dessa ger upphov till förhållandevis höga moment. Avståndet mellan kulbussningarna maximeras samtidigt som bearbetningssträckan i Y-led måste klara de krav som satts upp, dessa placeras därmed med ett ytteravstånd strax under 250 mm, se avsnitt 6.2.3.

Bommen i X-led konstrueras i en och samma del i form av en större aluminiumprofil. Detta för att de två linjärskenorna skall hamna så rakt och parallellt som möjligt genom att monteras i samma balk. Eftersom hela portalsidan kommer att ha en liten rotation runt linjärlagringen så är det viktigt att placera kulskraven nära dessa lagringar. En längre sträcka mellan linjärlagring och kulskruv ger en större utböjning på kulskraven vilket vill undvikas för att linjärdrivningen skall kunna ske med låg och jämn kraft och inte skada kulskraven.

Förutom ovan nämnda designaspekter tas även hänsyn till övriga delar i konstruktionen. För portalen är det främst placering av motorer samt infästningsmöjligheter för dammskydd av linjärdrivning och lagring som påverkar designen. Alla delar i

portalen är också designade med hänsyn till tillverkning och montering. Hål för kablar görs för att dessa ska dras smidigt och dolt i konstruktionen. Den slutliga detaljkonstruktionen av portalen visas i figur 6.9.



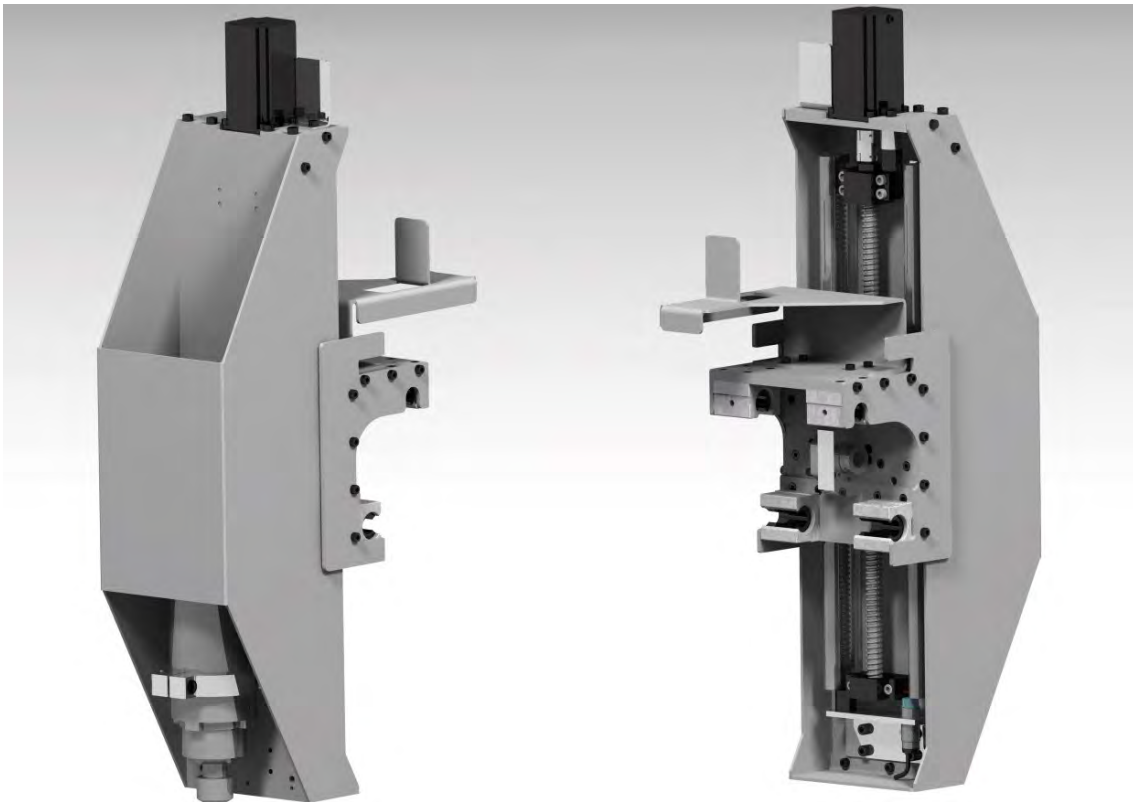
Figur 6.9: Detaljkonstruktion av portalen.

6.2.8 Z-assembly

Z-assembly kallar vi den modul av delar som rör sig i X -led tillsammans med det som rör sig i Z -led, inklusive spindeln. Z-assemblyn optimeras för låg vikt och hög styvhet eftersom det är en rörlig massa som ska ta upp last. Den konstrueras för att vara kompakt för att maximera slaglängderna med givna linjärelement. Samtidigt maximeras positiva hävarmar, till exempel avståndet mellan linjärstyrningen som förbättrar momentupptagningen, och negativa hävarmar minimeras, exempelvis spindelns utstick från portalens bom i Y -led så att skärkrafterna får liten hävarm till linjärstyrningarna. Alla delar i z-assemblyn som ska tillverkas är i aluminium för att det är lättbearbetat och har ett högt styvhet/densitet-förhållande.

Z-assemblyn består av två vertikala plattor, en mindre platta närmast portalens bom, mellanplattan, och en större platta som spindeln är infäst i, spindelplattan. På mellanplattan sitter sex av åtta kulbussningar som hör till z-assemblyns rörelse, på ena sidan horisontellt för X -axeln och på andra sidan vertikalt för Z -axeln. Även kulmuttrarna sitter placerade på mellanplattan. De två sista kulbussningarna för X -axeln sitter på en horisontell platta vinkelrät till mellanplattan eftersom den ena linjärstyrningen sitter på ovansidan av portalens bom. Kulbussningarnas placering på mellanplattan har konstruerats så att de inte är mitt emot varandra utan placeras förskjutet för de ska kunna monteras utan att blockera varandras infästning.

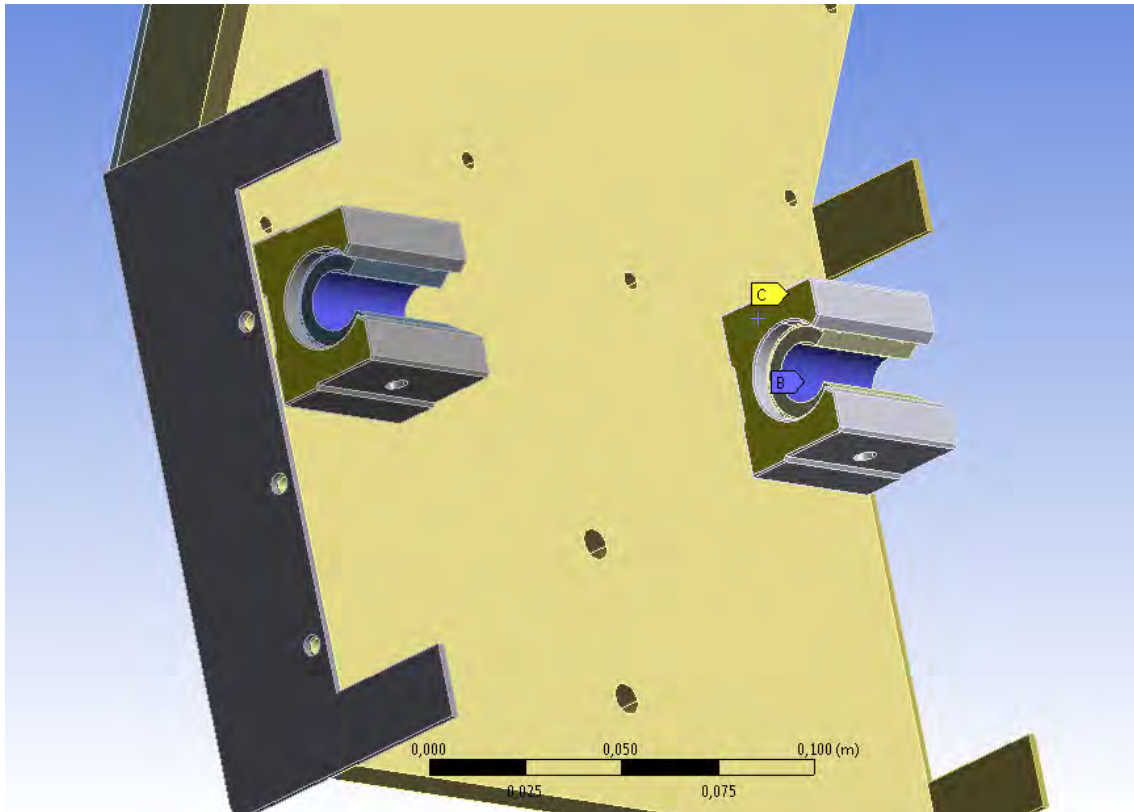
På spindelplattan sitter linjärstyrningarna för Z -axeln, kulsruven för Z -axeln och spindeln. Spindelplattan är extra lång för att bälgarna ska få plats både uppe och nere i båda ändlägena. På spindelplattans alla sidor sitter mindre plattor och plåtar som är hållare till stegmotor, bälgar och sensorer samt bidrar till konstruktionens styvhet. Plåten som är fäst i bägge långsidorna av spindelplattan sitter fast med skruvförband med tät hålbild. Detta möjliggör att vid behov kunna lossa nuvarande skruv och använda de tätt placerade hålen till att fästa tillbehör så som dammsko med tillhörande slang. Den fullständiga detaljkonstruktionen av Z -assemblyn visas i figur 6.10.



Figur 6.10: Detaljkonstruktion av Z -assemblyn, visad framifrån till vänster och bakifrån till höger.

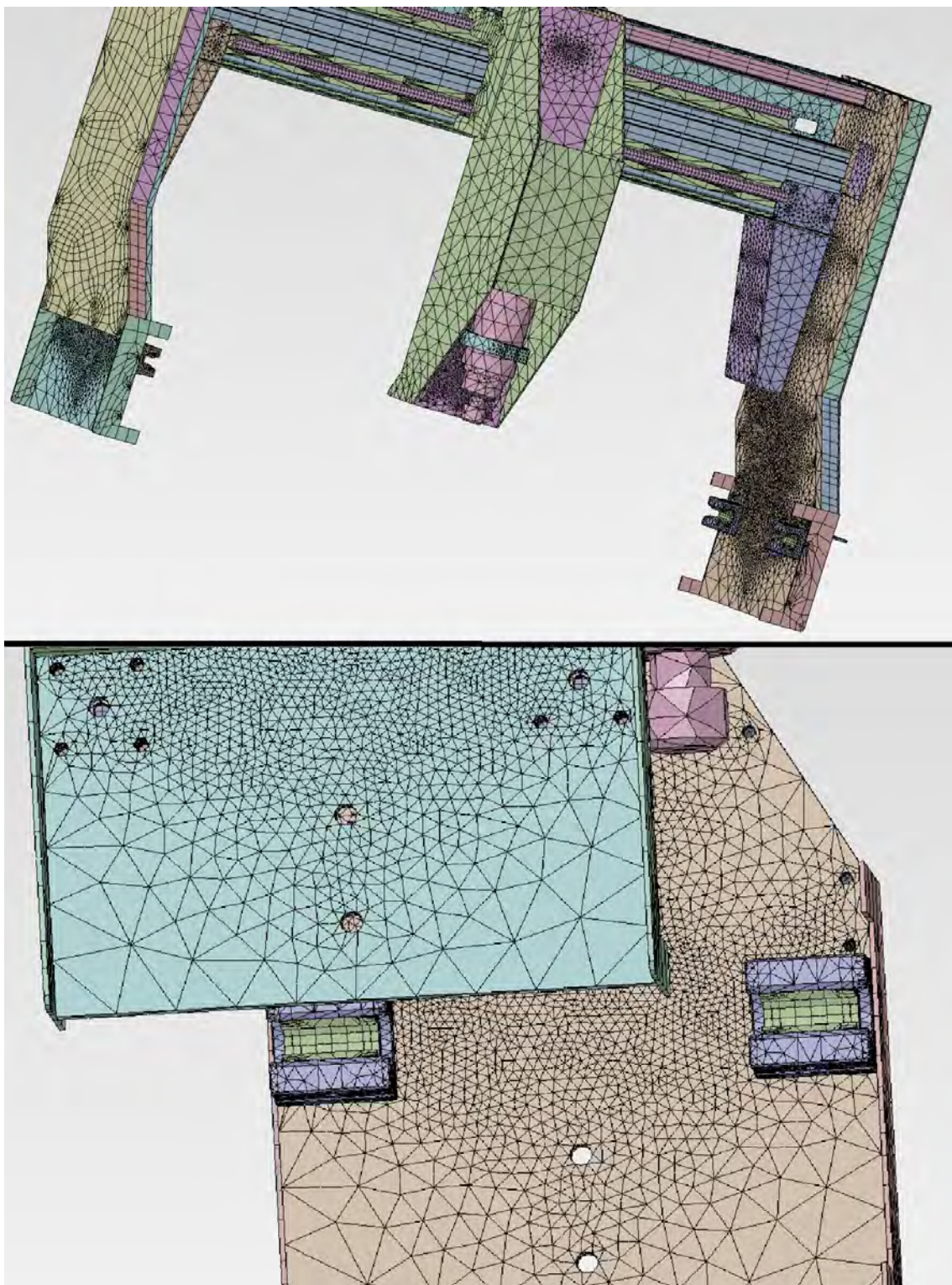
6.2.9 Belastningsfall portal och Z -assembly

För att få med utböjningen från både portal och z -assemblyn tillsammans i beräkningarna, görs ytterligare ett belastningsfall med båda monteringarna inkluderade. I det här fallet placeras lasten i Y -led på chucken till spindeln vilket gör att vridningen på bommen analyseras. För att få så verklighetsbaserade randvillkor som möjligt skapas en friktionsfri yta i lagrena mellan kulbussningarna och linjärstängerna i Y -led. Kulbussningarna låses också för translation i Y -led med ett deformationsvillkor på ena ytan av kulbussningarna. Figur 6.11 visar var de införda randvilkoren placeras.

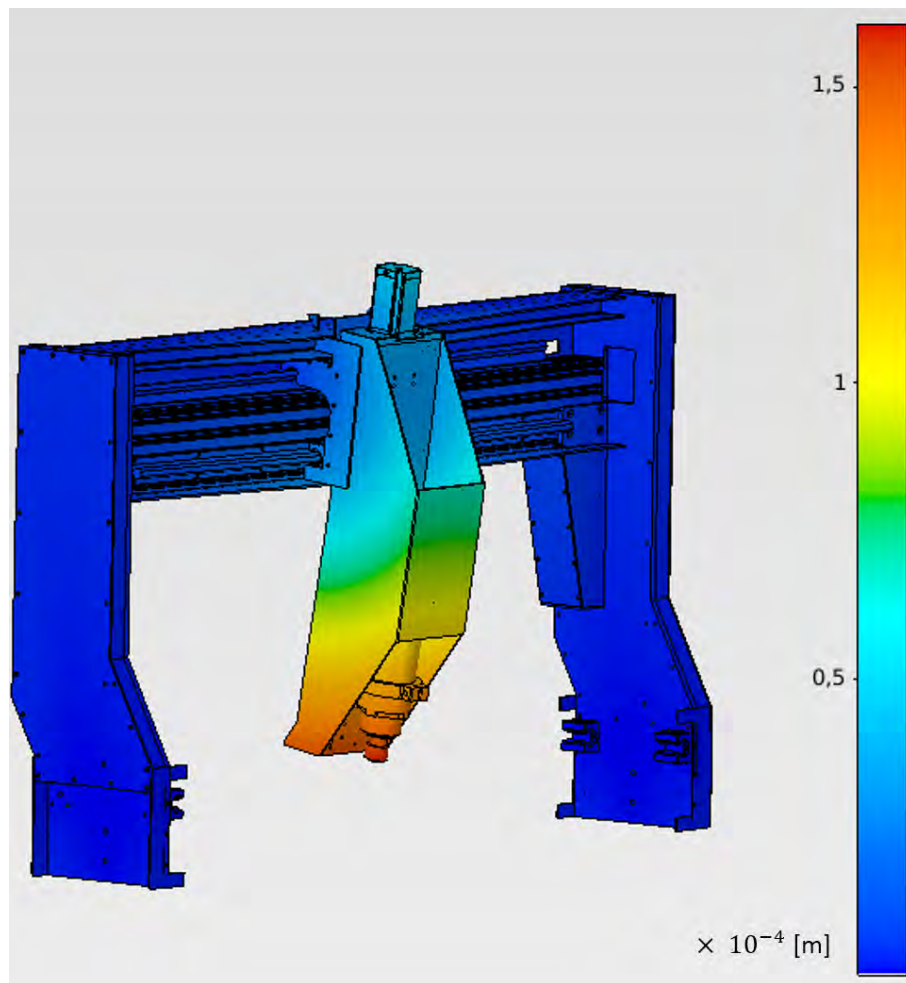


Figur 6.11: Infästningarna som användes vid simulering. Den blå ytan rör sig friktionsfritt och sidorna på lagerhusen är låsta för deformation i lagringens riktning.

För att generera beräkningsnätet i ANSYS så itererades med olika upplösningar tills ett tillräckligt fint nät tagits fram. Figur 6.12 visar det använda nätet vid simulering. Vid användning av ett finare nät blev simuleringen för beräkningstung medan ett grövre nät hade gett sämre resultat. Resultatet av simuleringen gav en maximal utböjning på 0,16 mm vid belastning med 150 N, vilket alltså är den beräknade skärkraften vid finbearbetning av hårda plaster. På samma sätt som tidigare kan skärkraften, och därmed utböjningen, antas vara lägre vid normal drift. Resultatet visas i figur 6.13. Eftersom vi arbetar med linjärt elastiska material samt att krafter och deformationer är små så kommer utböjningen vid bearbetning av trä att bli ungefär 0,046 mm. Detta då skärkrafterna är cirka 29 % av de för hårda plaster.



Figur 6.12: Det genererade beräkningsnätet som användes för simulering av utböjning.



Figur 6.13: Förstärkt utböjning då chucken på spindeln belastas med skärkraften 150 N (finbearbetning) i Y-led.

6.2.10 Apparatlåda

För att minimera riskerna med avseende på elsäkerhet placeras samtliga elkomponenter utöver spindel, stegmotorer och sensorer i en apparatlåda som monteras i basramen. Denna låda är lättillgänglig och samlar elkomponenterna på ett ställe. En aspekt som ligger till grund för utformningen av lådan är den potentiellt dammiga miljö som uppkommer runt CNC-fräsen vid drift. För att skydda apparatlådans innehåll från damm tätas hela lådan och ett kontrollerat luftflöde skapas med hjälp av en filtrerad fläkt för inlopp och ett filtrerat hål för utlopp. Detta medför att lådan blir renare och även att de komponenter som kräver luftkylning får ren och kall luft för att inte överhettas.

Alla kablar som går in och ut ur lådan passerar genom kontaktdon som monteras på apparatlådan, detta dels för att lådan skall vara tät men även för att det är en mer flexibel lösning som möjliggör att koppla loss lådan från maskinen om så önskas. Kretskorten placeras längst till vänster i apparatlådan på en egen hållare som ger åtkomst till bägge sidor av Geckodriven. VFD-enheten placeras i andra

delen av utrymmet för att elektromagnetiska störningarna från denna ska påverka styrelektroniken minimalt. I mitten av lådan sitter de två nätaggregaten. Detaljkonstruktionen av apparatlådan visas i figur 6.14.



Figur 6.14: Detaljkonstruktion av apparatlådan med placering av de komponenter som förvaras i den.

6.2.11 Dammskydd

Eftersom CNC-fräsen ska bearbeta material som dammar, krävs åtgärder för att skydda både maskinen och omgivningen. Dammet kan både täppa igen maskinelement och skada linjärstyrning som har fina yttoleranser, det utgör även en brandrisk om dammet sprids till fel ställen. För att motverka detta är både maskinen och dess känsligare komponenter inkapslade väl. Maskinens dammskydd delas upp i två områden; bälgar och inkapsling, där bälgar skyddar maskinens linjärdrivning och styrning, medan inkapslingen avser det skydd som skall hindra partiklar som skapas vid bearbetningen från att spridas till omgivningen.

Bälgar

Bälgar används för att skydda linjärstyrning och linjärdrivning samt sensorer från damm som skapas vid bearbetning med fräsen. Alla bälgar är U-formade för att täcka de känsliga komponenterna från tre sidor. Bälgarna placeras i par på vardera sida av de rörliga monteringarna. Vid rörelse komprimeras en av dem samman medan den andra sträcks ut för att hela tiden anpassa sig i längd och skyddar därmed oavsett rörelse. Vid kompression tar bälgen upp drygt 10 % av bälgens totala längd.

För att skapa en bana för styrning av bälgarna bockas plåtar som överlappar över och i underkant av bälgarna. Överlappet hindrar även damm från att ta sig in bakom bälgen och skapar därmed ett fullgott dammskydd.

Inneslutning

För att hindra damm från att spridas till omgivningen behöver maskinen kapslas in. Aspekter att ta hänsyn till vid framtagning av inkapslingen är bland annat hur väl man kommer åt att lasta i och ur samt spänna fast arbetsstycken i CNC-fräsen. För att maskinen ska kunna observeras vid drift används transparenta material för alla sidor. För att undvika resonans och vibrationsproblem konstrueras inneslutningen stadigt men samtidigt lätt för att vid behov enkelt kunna demonteras från CNC-fräsen.

Inneslutningen konstrueras av aluminiumprofiler med spår för skivor av akrylplast, alternativt polykarbonat. Hela inneslutningen är såpass hög att den rymmer portalen med Z -axeln i sitt högsta läge. Inneslutningens sidor delas in i två segment i höjddled. Det övre segmentet har fasta skivor medan skivorna i det nedre segmentet kan öppnas. På långsidorna öppnas inneslutningen genom att skjuta skivorna ner mot golvet. Detta ger full åtkomst utan att någonting sticker ut långt från maskinen. På kortsidorna öppnas inneslutningen med enkla dörrar som svängs utåt. Dörrarna är enklare att öppna och är placerade på kortsidorna för att det är bättre åtkomst till arbetsbordet från de sidorna. En rendering på inneslutningen visas i figur 6.15.



Figur 6.15: Rendering av CNC-fräsen med inneslutningen.

Inneslutningen är dammtät konstruktionsmässigt, men vid användning av en dammsugare för att hålla trycket inne i inneslutningen något lägre än i omgivningen, ska läckage av partiklar minimeras än mer. För att tätta de fasta panelerna används speciella tätningslister som är anpassade för spåren i aluminiumprofilerna och för dörrarna monteras tätningslister.

6.2.12 Sammanställning av komponenter

En komponentlista tas fram i samband med att detaljkonstruktionen slutförs. Komponentlistan resulterar i ett dokument som ger en tydlig överblick av de komponenter och material som används i konstruktionen av CNC-fräsen. Den ger även stöd vid vidareutveckling, felsökning och underhåll av maskinen. Komponentlistan är uppdelad i mekaniska komponenter och elektriska komponenter. Några av artiklarna har inget köpställe utan har varit tillgängligt material och ingår därmed inte i budgeten. I dessa fall har priset uppskattats. Den totala kostnaden av alla komponenter som används på maskinen är ungefär 35 200 SEK. Den fullständiga komponentlistan redovisas i bilaga E.

7

Tillverkning och montering

Under tillverkningen övergick konceptet till en fysisk produkt. Delkomponenterna tillverkades och monterades efter underlaget som detaljkonstruktionen utgör.

7.1 Metod

För att tillverkning av CNC-fräsen ska vara möjlig har en samling av tillverkningsmetoder tillämpats. Valet av tillverkningsmetoder för alla komponenter skedde under detaljkonstruktionen. Tillverkningen sker i Prototypplabbet på Chalmers och det är de maskiner och verktyg som finns att tillgå som använts.

7.1.1 Sammanfognings- och fästmetoder

Nio sammanfognings- och fästmetoder har använts vid tillverkningen av maskinen vilka beskrivs nedan.

1. Svetsförband är en ekonomisk sammanfogningsmetod som snabbt ger ett starkt förband. Kallformade konstruktionsrör kan slå sig vid svetsning på grund av inbyggda restspänningar (BE Group, 2017). För att motverka detta problemet kan materialet spännas fast på en plan yta vid svetsning. För att fästa delarna på rätt plats punktsvetsades de med TIG-svets. Själva svetsningen gjordes därefter på hela förbandet med MIG-svets.
2. Skruvförband sammanfogar effektivt delar med varandra samtidigt som det möjliggör enkel och upprepad montering och demontering av delar. Genom att ha ett frigående hål med större diameter än skruven ges ett glapp som kan användas som justeringsmån.
3. Nitning är en sammanfogningsmetod som framförallt är tid- och platseffektiv. Vid sammanfogning av plåtar där det inte finns något krav på justerbarhet eller demontering användes därför nitar. Så kallad blindnit, eller popnit, var det som användes för att det fanns tillgängligt och passade tillämpningen bra.
4. Vid fastsättning av kablar användes buntband på flera ställen. Detta är en snabb och enkel fästmetod som är lämplig när kablarna monteras mer permanent.
5. Kardborreband är ett förband som skapas mellan två textilband. Många små krokar av nylon är fästa på det ena bandet, medan det andra bandet har många små öglor. När banden pressas samman fastnar krokarna i öglorna och utgör förbandet.

6. Vissa små komponenter kunde fästas med lim. Fördelar med lim är att inga hål för skruvar eller liknande behöver göras och kan användas i trånga utrymmen med dålig åtkomst.
7. Kabelskor är en effektiv skarvmetsod för kablar. Kabelns isolering skalas av och en kabelsko kläms fast på ledaren med en tång. Kabelskor går snabbt att montera och finns i olika utföranden.
8. Vidare användes kontaktdon för att koppla samman två kablar i en konstruktion som kan delas vid behov utan verktyg. Kontaktdon finns i flera varianter, de som monteras i plåtar och de som används löst. Båda metoderna låter användaren enkelt sära på kabeln samtidigt som kontaktdonet har dragavlastning. Två kontaktdon får kontakt med varandra eftersom den ena är av typen hane och den andra av typen hona. Ett anslutet kontaktdon visas i figur 7.1.



Figur 7.1: Kontaktdon på kabeln till en av stegmotorerna.

9. Lödning är den nionde och sista metoden som användes. Lödning utförs på kablarnas ledare när dessa ska få kontakt med annan ledare eller lödben. Fördelar med lödning är att skarven tar väldigt liten plats och ger en relativt bra kontakt mellan de sammanfogade ledarna. De lödda skarvarna täcktes med krympslang för att skyddas.

7.1.2 Bearbetning

För att uppnå tillräckliga toleranser, önskad geometri och samtidigt få utskurna hål användes en vattenskarvningssmaskin. Vattenskarvning klarar både tunna och tjockare skivmaterial, för aluminium var begränsningarna upp emot 200 mm. Metoden ger ett icke önskvärt vinkelfel på den skurna ytan som yttrar sig i omkring 0,05–0,1 mm skillnad av slutmått på ovan- och undersidan av skivmaterialet. Hur stort felet blir beror bland annat på vilket material som skärs och dess tjocklek.

För att få ytor plana och vinkelräta, samt ta bort material för exempelvis spår användes en traditionell fräsmaskin. Planfräsning i en traditionell fräsmaskin möjliggör i normala fall toleranser på 0,01 mm.

De aluminiumplåtar som var tunnare än 4 mm kunde bockas för att få önskad form. För att bocka användes en manuell plåtbockningsmaskin som maximalt kunde bocka drygt 1000 mm breda plåtar.

De hål som inte skars i vattenskarvningen borrades i pelarborr för att utnyttja pelarborrens vinkelräthet. Vinkelrätheten var även kritisk vid gängning och därav gängades delvis eller hela hålet med gängtappen monterad i pelarborren direkt efter att hålet borrats.

7.1.3 Montering

Vattenskurna geometrier hade tillräcklig tolerans för att monteras direkt och uppnå önskad positionering. På övriga delar användes skjutmått och vid några tillfällen även linjal för att placera delarna i rätt positioner och vinklar. För att montera linjärstyrningen och andra komponenter som hade högre krav på parallellitet och vinkelräthet användes indikatorklocka.

Många av delarna på maskinen sitter nära varandra och på litet utrymme, därför har det i många fall varit viktigt att delar monteras i en viss ordning för att exempelvis komma åt skruvar med rätt verktyg.

I vissa fall användes styrbjörnar i brotschade hål tillsammans med skruvförband för att eliminera frihetsgraderna i förbandet. Hålen för styrbjörnarna borrades och upprymdes med brotsch i en traditionell fräsmaskin för att uppnå hög tolerans på hålets placering och storlek.

För att uppnå godkänd planhet vid montering och bearbetning användes ett stort riktbord. Planhetsskillnaden mellan riktbordet och det som riktas mättes med bladmått medan om en montering skulle bli plan, pressades alla delar mot riktbordet. Figur 7.4 visar riktbordet med överramen så som den monterades.

7.1.4 Installation av elkomponenter

Vid dragning av kablar testdrogs dessa först för att avgöra ungefärlig längd och minska svinn. Därefter klipptes kablarna till rätt längd och märktes upp var de skulle dras och till vad de skulle användas till. Vid installationen ska kablarna vara enligt korrekt färgkod. Kablar avsedda att leda likström skall vara svarta om de är kopplade till minuspolen och röda om de är kopplade till pluspolen. För de kablar som leder växelström gäller gulgrönt hölje för jord, brunt för fas och blått för noll förklarade Stefan Lundberg, tekniklektor i elektroteknik (5 maj, 2017).

Jordning är en central del inom elektroniken som måste utföras korrekt, både för användarsäkerhet och för att säkerställa att känsliga delar inte kommer till skada. Vid felaktig eller otillräcklig jordning kan det uppstå potentialskillnader mellan olika delar som medför att ström leds genom exempelvis linjärstyrningas kulbussningar, vilket kan medföra skador på linjärlagringarna. En metod för att undvika detta är att en jordkabel dras från den centrala jordpunkten i apparatlådan till varje delsystem som skiljs åt av linjärlagringar.

Ett omfattande kopplingsschema tas fram som innefattar samtliga komponenter i det mekatroniska systemet. Detta schema utgör ett referensunderlag som används vid installation av komponenterna, se bilaga D

Flera kopplingsmetoder tillämpades under installationen av elkomponenter, varav två av huvudmetoderna som användes är parallellkoppling och seriekoppling. Seriekoppling leder till spänningsdelning och parallellkoppling leder till strömdelning.

Det ihopkopplade styrsystemet kontrolleras genom att inledningsvis gå igenom varje elektrisk komponent separat och testa att de fungerar som den ska. Kopplade kablar i komponenterna mäts med multimeter för att kontrollera att alla kopplingar är korrekta. Därefter spänningssätts och aktiveras de enskilda komponenterna för att kontrollera att de fungerar. De komponenter som kräver anpassning av parametrar, konfigureras till systemet.

7.2 Resultat

I detta avsnitt beskrivs hur delarna tillverkades, vilka problem som uppstod under tillverkningen och hur resultatet av bearbetning och monteringen blev. Själva körningen av maskinen beskrivs i nästa avsnitt; 8 Tester och utvärdering.

7.2.1 Basram

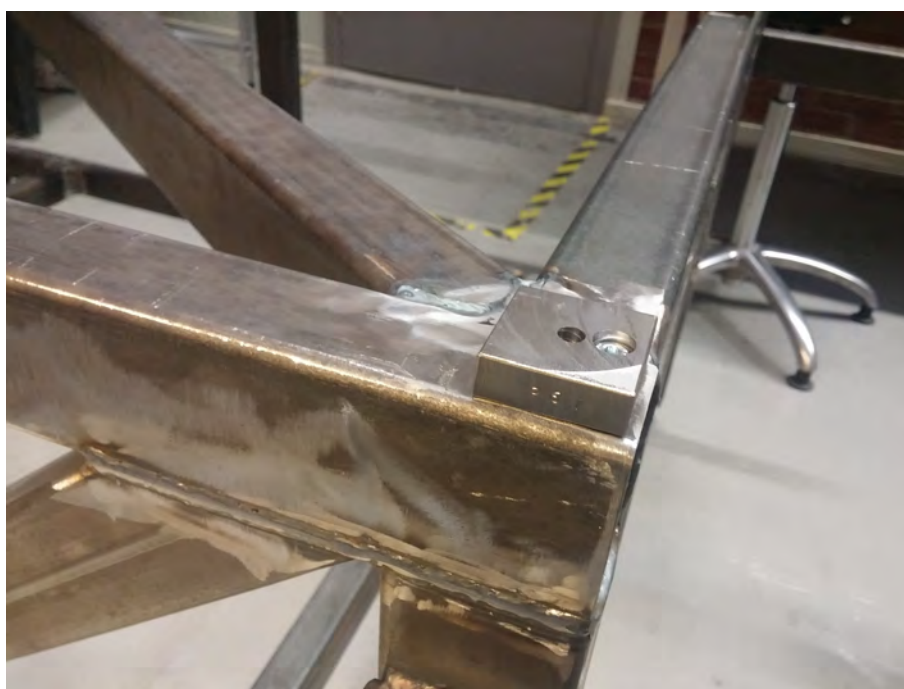
Fyrkantsstålrören som utgör basramen är sammanfogade med svetsförband, se figur 7.2. Plattor med gängade hål är svetsade i ändarna av benen där gummiklädda fötter som är justerbara i höjd monterats. På ovansidan är stålplattorna som agerar stödpunkter för överramen monterade, se figur 7.3.

Planheten på planet som stålplattorna skapar på ovansidan ligger inom 0,5 mm, vilket åstadkommits genom riktning, riktbordet ses i figur 7.4. Stödplattorna är sedan individuellt planfrästa och återmonterade för att ytan de spänner upp skulle bli så plan som möjligt.

Hela basramen, utom kontaktytorna mot överramen, är målade med svart hammarlack. Basramen väger ungefär 100 kg.



Figur 7.2: TIG-svetsning av basramen.



Figur 7.3: En av de tio stålplattorna som agerar stöd för överramen, här monterad på basramen.

7.2.2 Överram

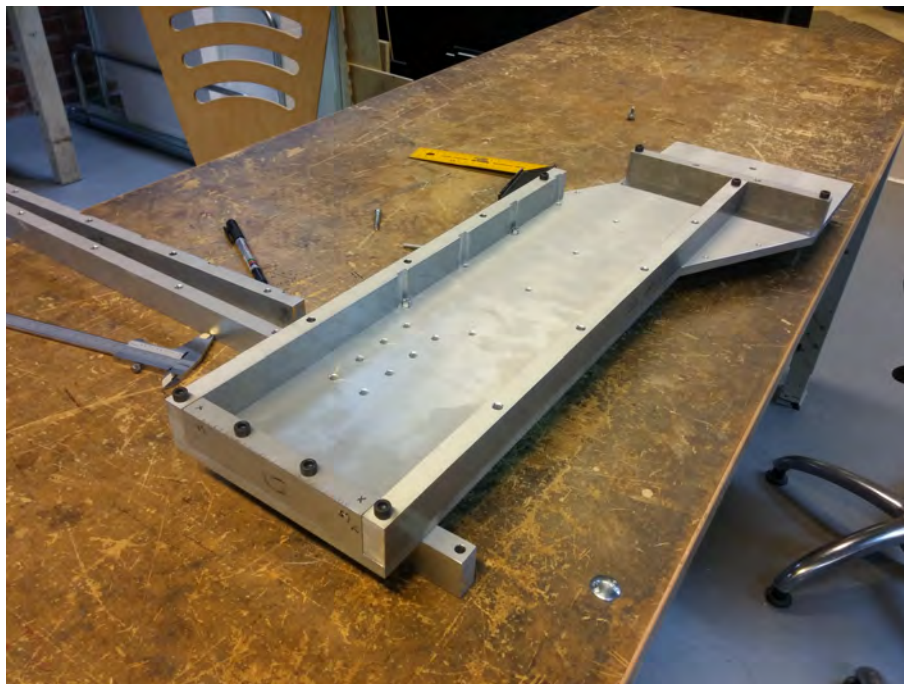
Överramens färdigkapade aluminiumprofiler monteras ihop med vinkeljärn som tillverkas genom att såga och borra U-profiler i aluminium. Överramens delar skruvas ihop liggandes på ett riktbord för att få ramen plan när skruvarna dras åt i vinkeljärnen, se figur 7.4. Linjärstyrningarna för *Y*-axeln monteras på överramens sidor och överramen monteras i sin tur på basramen.



Figur 7.4: Montering och riktning av överramen mot ett riktbord.

7.2.3 Portal

Portalsidornas delar är skurna i vattenskararen och efterbearbetas genom fräsning och gängning. Hål som inte ligger i samma plan som de vattenskurna hålen borrar och gängas i efterhand. Några delar fräses i vinklar för att passa resten av konstruktionen. Allt eftersom delarna blir klara monteras de ihop tillsammans med aluminiumprofilen som utgör bommen. I figur 7.5 ses ett av momenten vid monteringen.



Figur 7.5: Montering av delar på en portalsida

7.2.4 Z-assembly

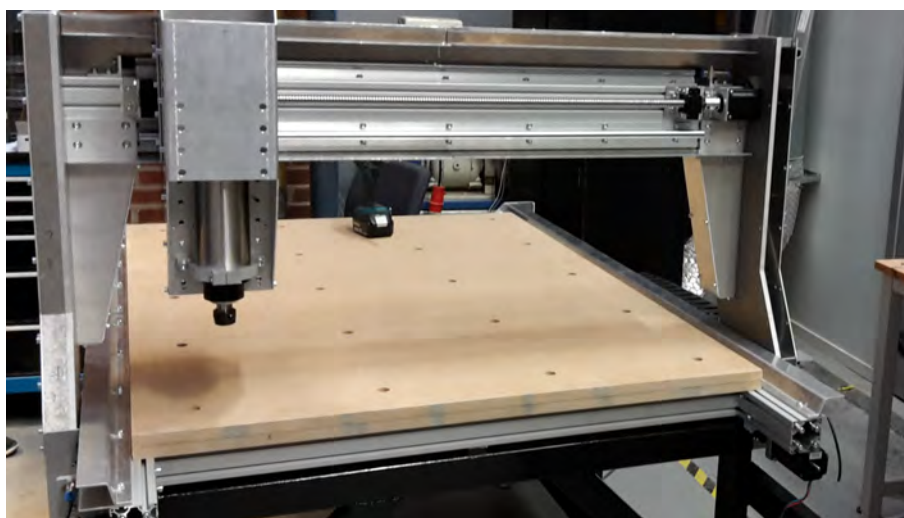
Z-assemblyn är den montering som är mest komplex och kräver mest bearbetning av delarna. Mellanplattan planfräses på båda sidor, ett spår har frästs på ena sidan och de flesta hålen har planförsänkts. Även monteringen av z-assemblyn är kritisk eftersom delarna måste monteras och justeras i en viss ordning. De flesta delarna vattenskärs innan de efterbearbetas och monteras. På grund av vinkelfelet och toleransosäkerheten i vattenskararen behöver insidan av spindelhallarna arborras, se figur 7.6, för att uppnå en diameter som passar spindelkroppen. Arborring är en bearbetningsmetod, i det här fallet med ett ställbart verktyg, för hål med stor diameter. Hela monteringen använder skruvförband och kan därmed demonteras vid behov.



Figur 7.6: Arborning av ena spindelhållaren.

7.2.5 Arbetsbordet

Arbetsbordets två MDF-skivor sågas upp till rätt dimensioner med bordsåg. Hålen för att fästa skivorna i maskinen planförsänks och borraras med handhållen bormaskin och egentillverkade jiggas. Skivornas kanter och hörn slipas till innan skivorna monterades på överramen med skruv och T-spårsmutter.



Figur 7.7: Arbetsbordet monterat på maskinen.

7.2.6 Apparatlåda

Apparatlådan byggs genom att vattenskära aluminiumplåt som bockas och nitas med blindnit. Vid vattenskarningen görs hål i plåten för knappar, dioder, fläktar och kontaktdon. Apparatlådan tätas sedan mot damm med hjälp av byggfog och tätningslist. En lucka till apparatlådan monteras med gångjärn samt ett excenterlås. Apparatlådans utsida visas i figurerna 7.8 och 7.9 med samtliga knappar och kontaktdon monterade.



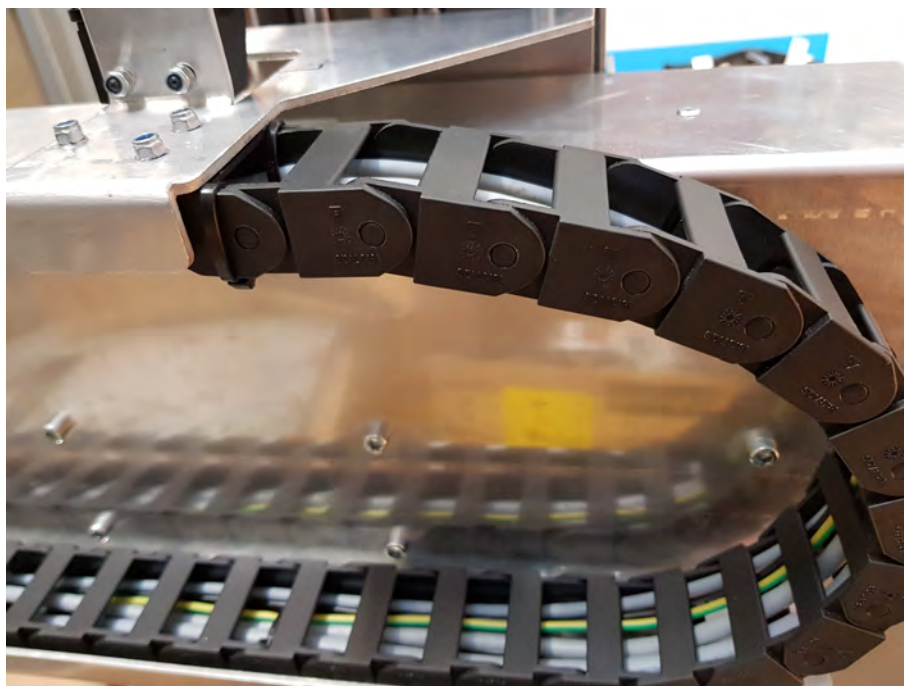
Figur 7.8: Apparatlåda och knappar visat från vänster vy.



Figur 7.9: Apparatlåda och kontaktdon visat från höger vy.

7.2.7 Kabeldragning

Strukturerad kabelhantering tillämpas på samtliga kablar. Kablar fästs, avlastas och buntas ihop med hjälp av buntband. Kablar dras även genom kabelkedjor för att samla, skydda och ge kablarna ett specifikt rörelsemönster, se figur 7.10. Kablar fästes i varje ände av kabelkedjorna och ligger sedan löst däremellan för att motverka påtvingad rörelse som sliter på kablarna vid förflyttning. I kabelkedjorna delas högspännings- och lågspänningskablar upp på olika sidor för att minska signalstörningar.



Figur 7.10: Kabelkedja på X-axeln som följer portalens baksida.

Samtliga kablar på utsidan av apparatlådan löds samman med kontaktdon. Krympslang används för att skydda lödningen i kontaktdonen och motverka kortslutning. De kablar som är skärmade jordas via skärminningshöljet till den centrala jordpunkten i apparatlådan. Kablar till komponenter placerade på insidan av apparatlådan dras i regel genom kopplingsplintar för flexiblere kabelhantering och bättre struktur. Kablar dras strukturerat för att underlätta underhåll, felsökning och luftflöde i apparatlådan.

För att jorda mekaniska delar av maskinen, dras en flexibel jordkabel som kopplas till utvalda punkter på maskinen med hjälp av kabelsko, taggbricka och skruv. Utgångspunkten för jordkabeln är den centrala jordpunkten i apparatlådan, kabeln dras därifrån till utvalda delar med en sista fästpunkt i spindelplattan. Genom denna metod säkerställs att jordkabeln är lättaste vägen för strömmen att gå om de mekaniska delarna strömsätts, maskinen utgör därmed ej risk för personskador vid elektronikhaveri. Om jordkabeln kopplas som en sluten krets cirkulerar strömmen i kretsen istället för att ledas ut genom jordpunkten, vilket utgör en stor säkerhetsrisk då maskinen blir strömförande. Därför är det viktigt att endast koppla en jordkabel från varje utvald mekanisk del av maskinen.

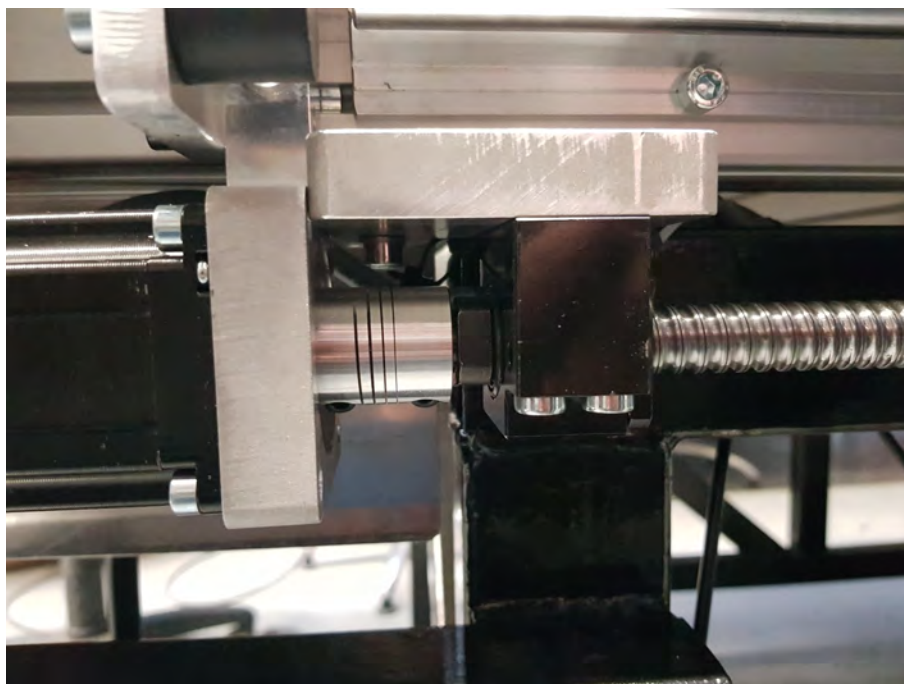
7.2.8 Elkomponenter

På apparatlådans hölje monteras tryckknappar, dioder, fläkt med tillhörande filter och nödstopp. I apparatlådan monteras VFD-enheten, nätaggregat, styrkrets, spänningsomvandlare och signalkonverterare. Nätaggregaten skall vara parallellkopplade och kopplas till styrkretsen samt spänningsomvandlarkretsen, en bild på elkomponenterna installerade i apparatlådan visas i figur 7.11. Resterande komponenter i systemet monteras enligt kopplingschemat, se bilaga D.



Figur 7.11: Apparatlådan med elkomponenter under installationsfasen

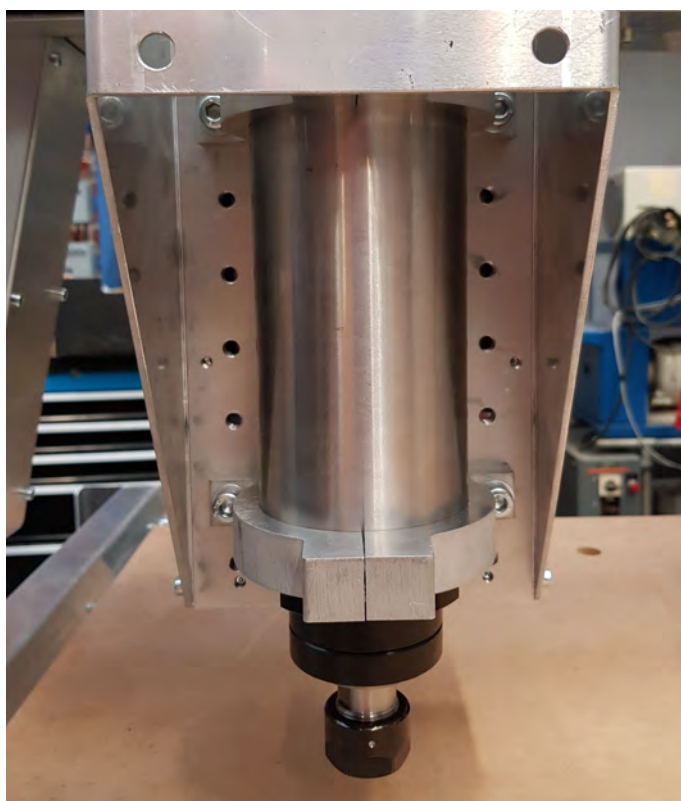
Stegmotorerna monteras på maskinen och kopplas samman med kulskruvarna. Vid ihopkopplingen används flexibla kopplingar, se figur 7.12 mellan kulskruvarna och motorernas axlar vilka har två syften. Det första är att kopplingarna är flexibla, vilket gör att eventuella vinkelfel och att axlarna inte är helt i linje hanteras. Dessutom har axlarna på kulskruvarna och stegmotorerna olika diametrar, vilket kopplingarna löser.



Figur 7.12: Monterad stegmotor på kulskruv med hjälp av en flexibel koppling.

De mekaniska brytarna limmas mot en platta som monteras fast med rätt avstånd till de rörliga delarna för vardera axel. De induktiva närhetssensorerna monteras och justeras med hjälp av två muttrar tills de har önskad position. Dessa monteras enligt det globala koordinatsystemets nollpunkt.

Spindelklämmorna fästs först löst på spindelplattan i valfri flexibel höjd och därefter förs spindeln in i spindelklämmorna och skruvarna dras åt. Monteringsordningen är viktig för att klämmorna ska hamna centrerat runt spindeln. Spindelns vinkel mot Z-axeln i XZ-planet måste justeras med indikatorklocka. Figur 7.13 visar den monterade spindeln.



Figur 7.13: Spindel monterad på spindelplattan i spindelklämmorna.

Installation av elkomponenter utförs enligt bestämd metod, alla kablar ses inledningsvis över med multimeter för att säkerställa att de är korrekt kopplade enligt kopplingsschemat, se bilaga D. Därefter spänningssätts och konfigureras varje komponent separat så att de fungerar som de ska. VFD-enheten spänningssätts med växelström och dess parametervärden konfigureras och anpassas till spindel och elnät, därefter kopplas spindel till VFD-enheten och spänningssätts för att testköras vid olika varvtal.

Vidare testas nätaggregaten genom att först spänningssätts separat och sedan parallellkopplas. När de är kontrollerade nyttjas likströmmen på 48 V från dessa till att testa resterande delar av systemet. Spänningsomvald-larkretsen kopplas till likström

och kontrolleras att den ger ut önskade spänningar. Därefter spänningssätts signalkonverteraren med 5 V, induktiva närhetssensorerna med 12 V och slutligen apparatlådans fläkt med 12 V från spänningsomvandlarkretsen. Styrkretsen spänningssätts från nätaggregat för att därefter sammankopplas med signalkonverteraren.

En dator kopplas till signalkonverteraren och komponenterna konfigureras i mjukvaran Mach3. Nödstoppen kopplas till styrkretsen och alla sensorer och nödstoppsignaltestas sedan i mjukvaran. Slutligen kopplas stegmotorerna till styrkretsen och testregleras till olika varvtal via mjukvaran i datorn.

7.2.9 Monterad maskin

Som ett sista moment i tillverkningen kombinerades de mekaniska delarna med elkomponenterna vilket resulterar i en färdigmonterad maskin. I figurerna 7.14 och 7.15 visas maskinen ur två olika vyer, framifrån respektive bakifrån. Den monterade apparatlådan och det främre nödstoppet visas i figur 7.14. Medan de monterade kabelkedjorna i X-led och Z-led samt det bakre nödstoppet visas i figur 7.15. Fler figurer på den monterade maskinen visas i bilaga G, figurer G.1 – G.6.



Figur 7.14: Maskinen monterad, framifrån.



Figur 7.15: Monterad maskin, bakifrån.

8

Testplan

En testplan har tagits fram för att kunna kontrollera hur väl maskinen uppfyller de krav som har ställts i kravspecifikationen. Inga tester har genomförts då det inte rymdes inom tidsramen men testplanen finns som grund vid fortsatt arbete. Parallellt med testningen skall finjusteringar och utvärdering av konstruktionen utföras. Finjusteringen innefattar kalibrering och justering av hårdvara samt mjukvara där referensmått och referensvariabler justeras för att öka noggrannheten på maskinen.

Beroende på vilken kravtyp som ska testas, utförs testerna på olika sätt men toleranskraven testas bland annat med avseende på repeterbarhet och noggrannhet. Nedan listas de krav från kravspecifikationen som skall utvärderas genom tester och vilken metod som skall användas för varje specifikt test.

8.1 Vinkelräthet

Vinkelrätheten skall kontrolleras i X -led mot Y -led genom att en vinkelhylla placeras på arbetsbordet. Ena sidan av vinkelhyllan placeras parallellt med X -axeln med hjälp av en indikatorklocka fäst på spindelplattan. Därefter skall två punkter mätas med hjälp av samma indikatorklocka längs vinkelhyllans andra sida vilken utgör Y -led. Eventuell skillnad mellan de två mätpunkterna avgör vinkelfelet. Detta test skall utföras på två skilda ställen på arbetsbordet för att undvika eventuella lokala ojämnheter i arbetsbordet.

Vinkelrätheten skall också kontrolleras i Z -led mot XY -planet. Genom att mäta med en indikatorklocka på två ställen i Z -led mot en vinkelhylla som placeras på arbetsbordet, kontrolleras vinkelrätheten. Kontrollen skall genomföras i två test, ett där XZ -planet jämförs mot XY -planet samt ett där YZ -planet testas mot XY -planet. Även detta test skall utföras på två skilda ställen på arbetsbordet.

8.2 Utböjning

Maskinens utböjning skall testas genom att en kraft, motsvarande den uträknade skärkraften på 150 N för finbearbetning och 650 N för grovbearbetning placeras på ett verktyg monterat i spindelns chuck. Utböjningen på chucken i kraftens riktning relativt en fast punkt på arbetsbordet mäts med indikatorklocka.

8.3 Planhet arbetsbord

Ett krav är ställt på arbetsbordets planhet men det är svårt att mäta med den utrustning som finns tillgänglig. Istället skall arbetsbordets avvikelse från maskinens XY -plan mätas. Detta mått innefattar både parallellitet mellan planen och deras relativa planhet, men det går inte att skilja dem åt utan ytterligare mätningar. Avvikelsen mäts genom att en indikatorklocka fästs på spindeln som flyttas till bestämda punkter där mätvärden läses av. Punkterna skall ligga i ett jämnt fördelat rutnät med 4×4 punkter på XY -planet.

8.4 Transportmatningshastighet

För att kontrollera om kraven på transportmatningshastigheterna har uppnåtts skall motorerna köras på maximalt varvtal. Linjärdrivningen för de tre axlarna körs uppdelat i tre omgångar, en för varje axel. Dessa tester ger ett underlag för att bedöma maskinens maximala transportmatningshastighet.

8.5 Acceleration

Accelerationen skall testas genom att prova om det går att fräsa en cirkel med radien $R = 0,28 \text{ mm}$ under en konstant arbetsmatning på $v = 1000 \text{ mm/min}$. Att cirkelradien, R , väljs till precis $0,28 \text{ mm}$ beror på att normalaccelerationen a_n vid cirkelrörelsen med konstant fart, v , alltid är riktad in mot cirkelns centrum med en storlek enligt ekvation 8.1. Med en given acceleration och matningshastighet från kravspecifikationen kan radien beräknas. Genom att fräsa ett helt varv i cirkeln täcks alla riktningar som kan uppkomma på accelerationen. Radien på det frästa hålet mäts och subtraheras med verktygets radie för att kontrollera om testet lyckats.

$$a_n = \frac{v^2}{R} \quad (8.1)$$

8.6 Vibrationer

Vibrationer som uppstår vid drift får inte ha en amplitud som är större än $0,1 \text{ mm}$ enligt kravspecifikationen. Detta skall kontrolleras genom att en indikatorklocka placeras $0,05 \text{ mm}$ från olika delar på fräsen. Om indikatorn ger utslag så kan vibration noteras. Det viktiga är att indikatorklockan placeras på ett vibrationsfritt underlag för att inte påverkas av de vibrationer som maskinen ger upphov till.

8.7 Drivningsglapp

För att testa drivningsglappet mellan kulmuttrar och kuls kruvar ska skillnaden mellan spindelns position vid stopp från drivning i respektive riktning på vardera axel mätas. I praktiken görs detta genom att köra i en riktning, stanna och mäta, fortsätta i samma riktning, stanna, gå tillbaka till samma steg på motorn och till sist mäta igen. Mätningen utförs med en indikator klocka mot en vinkelhylla som placeras på arbetsbordet. Sträckan som spindeln skall köras är det antal steg på motorn som teoretiskt motsvarar 100 mm förflyttning längs med axeln. Mätningen skall göras på samma sätt för X - och Y -axeln. Z -axeln går inte att mäta på detta sätt på grund av gravitationen. Ett drivningsglapp visar sig i form av att avståndet till vinkelhyllan har ökat. Detta drivningsglapp får inte överstiga 0,005 mm för samtliga axlar. För att inte trögheten hos de rörliga delarna skall påverka testet måste körningen ske med väldigt låga accelerationer. I Mach3 finns det inställningar för att kompensera för drivningsglapp, därför är dessa mätningar viktiga att utföra.

8.8 Kompensation i programvara

Drivningsglappet kan till viss utsträckning kompenseras för via styrsystemets mjukvara. Funktionen som ska användas kallas drivningsglappskompensation och konfigureras genom att förse mjukvaran med axlarnas uppmätta drivningsglapp. Denna funktion tillåter maskinen att ta hänsyn till detta och reglera stegmotorernas framdrivning av maskinen. Denna kompensation används även för att bibehålla en vinkelrät arbetsyta genom att reglera Y -axelns båda stegmotorer med hänsyn till drivningsglappet.

9

Reflektion

Reflektionen har delats upp i tre olika avsnitt. Det första avsnittet diskuterar det tillvägagångssätt som användes under projektet. I det andra avsnittet diskuteras det framtagna resultatet och i den sista delen potentiell vidareutveckling av CNC-fräsen.

9.1 Genomförande

Projektet har varit brett, det har inneburit konceptframtagning, detaljkonstruering, inköp, tillverkning och montering av ett stort antal detaljer. Tiden har därför ibland inte räckt till för att gå in på djupet så mycket som önskats i en del faser. Detaljkonstruktionen i CAD och hållfashetssimuleringarna i ANSYS tog längre tid än beräknat och borde påbörjats tidigare för att utnyttja tiden optimalt. Produkten var mer komplex än vad som förväntats och det tog tid att finna en fungerande lösning som rymdes inom budget där alla delar kunde samverka med varandra och samtidigt vara tillräckligt styva.

Arbetet med elektroniken hamnade efter under detaljkonstruktionen. För att undvika detta borde det i ett tidigare skede ha beslutats om att ytterligare en person arbetat med styrsystemet. Här borde det också ha konsulterats med expertis inom området i ett tidigare skede i projektet för att undvika onödiga fel och sena ändringar.

Samtidigt har mycket tid lagts på arbetet och för att kunna påbörja detaljkonstruktionen tidigare skulle konceptfasen behövt vara mer effektiv. Detta kanske hade varit möjligt men samtidigt hade det blivit en risk att viktiga detaljer och kunskap om maskinen missats.

9.2 Resultat

Det slutliga resultatet är den tillverkade fräsen. Inga fysiska tester har genomförts men hur väl fräsen presterar vad gäller styvhet anses verifierat genom de simuleringar som gjorts. Den monterade maskinen verkar stabil och konstruktionen ger ett bra intryck, denna subjektiva bedömning skall dock inga större slutsatser dras från. Det finns ett antal områden, som tas upp nedan, där möjliga felkällor som kan påverka maskinens verkliga prestanda både positivt och negativt.

9.2.1 Skärkrafter

Skärkrafterna från fräsen uppskattades i ett tidigt stadie av konstruktionen med hjälp av handberäkningar baserade på skärdata från verktygstillverkaren Dormer. Det var svårt att finna lämplig skärdata för trä- och polymermaterial. Vid tidpunkten beräkningarna gjordes var Dormers kataloger det alternativ som ansågs vara bäst att nyttja. Katalogerna betecknade en materialgrupp som ”hårda plaster” vilket bedömdes vara ett överdimensionerande antagande till vårt belastningsfall. Med detta som grund beräknades skärkrafterna bli 650 N för grovbearbetning och 150 N för finbearbetning.

Informationssökandet fortsatte sedan för att finna mer klarhet i problemet och det dröjde till ett sent stadie i projektet innan en artikel med ytterligare data hittades. I denna artikel fanns resultat från tester av skärdata vid bearbetning av trä i en CNC-fräs. Med dessa som grund kunde de faktiska skärkrafterna för det avsedda användningsområdet beräknas. Dessa blev ungefär 170 N för grovbearbetning och 40 N för finbearbetning.

Det som i huvudsak skiljer de nya beräkningarna från de gamla är att den specifika skärkraften går från att ha värden över 3000 N/mm² till att ha ett värde strax över 100 N/mm², värden för axiellt skärdjup och tandmatning justerades även till vad som ansågs vara rimliga värden. Resultaten för trä redovisar betydligt lägre värden för skärkraft än de som tagits fram för hårda plaster som bearbetningsmaterial. Detta är dock inget problem då det medför att maskinen är överdimensionerad och bör klara av de verkliga krafterna den utsätts för utan problem och kanske rentav kan bearbeta hårdare material än den är avsedd för.

9.2.2 Simuleringar

Utböjningen som beräknades med ANSYS kan ha påverkats av ett antal felkällor. Först och främst när det kommer till kontakter mellan olika delar i fräsen. I ANSYS tas ingen hänsyn till eventuella glapp i lager eller skruvförband. Detta bör leda till att utböjningen på den färdiga fräsen blir något större än det beräknade värdet.

9.2.3 Tillverkning och montering

Under tillverkningsprocessen var CAD-modellen till mycket stor hjälp då vi enkelt kunde följa exakta ritningar. Tack vare tidigare erfarenheter i tillverkning, vilka tillämpades redan under skapandet av CAD-modellen, lyckades vi designa nästan alla delar så att de var tillverkningsbara i Prototyplabbet. Endast vid ett ytterst fåtal tillfällen behövde vi ändra utformningen på delar för att de skulle vara möjliga att tillverka.

Tillgången till en vattenskärningsmaskin har varit vitalt vid tillverkning av många delar. Metoden sparade bearbetningstid eftersom hål och uttag i materialet gjordes i samband med skärningen. Dessutom kunde mer komplexa geometrier användas vilket gav stor frihet vid detaljkonstruktionen. Toleranserna på de utskurna delarna var också mycket bra, liknande resultat med andra metoder hade varit svårt att uppnå.

Monterbarhet var något som togs i åtanke under hela detaljkonstruktionen och fungerade i praktiken väl. Alla delar gick att montera med några få undantag där mindre ingrepp utfördes för att göra dem monterbara. Valet att använda en överram och bom av aluminiumprofiler var ett väldigt bra val sett ut monterbarhetsperspektivet. T-muttrarna var enkla att montera i T-spåren på profilerna och uppskattades därmed mycket, inte minst på grund av den stora justerbarheten.

9.2.4 Installation av elkomponenter

Elinstallationen var den del av tillverkningen som vi hade minst erfarenhet av sedan tidigare. Ingen av oss hade kopplat ett så stort elsystem innan. Därför hade vi underskattat tidsåtgången och missat att köpa en del nödvändigt material.

Vid installationen av nätaggregaten upptäcktes det att jordfelsbrytaren bröt strömmen när nätaggregaten var fastskruvarde i apparatlådan. Detta berodde på en felkonstruktion vid fabrikstillverkningen av nätaggregatet som gjorde att nätaggregatets nollpol sammankopplades med jorden då för långa skruvar monterades i fästhålen. Detta utgjorde en stor säkerhetsrisk då dessa komponenter blir strömförande. Detta hanterades genom att istället spänna fast nätaggregaten med en bygel av plåt.

Mellan elkomponenterna drogs kablar som under installationens gång märktes upp. Detta var mycket behjälpligt för att urskilja kabelns ursprung, dess funktion och var den skulle kopplas in. Alla kontaktdon till apparatlådan märktes upp för att man enkelt skulle se vilken kabel som skulle monteras var. Detta underlättade vid kabeldragningen och lödningen av kablarna. Kopplingschema användes som riktlinje vid inkopplingen, dock var det vissa detaljer som ändrades under installationen.

9.3 Vidareutveckling

Det finns flera möjligheter till vidareutvecklingsprojekt på den tillverkade CNC-fräsen för att förbättra dess användarvänlighet och prestanda.

9.3.1 Inneslutning

CNC-fräsen har som beskrivits i rapporten konstruerats med en inneslutning som skall hindra dammspridning till omgivningen. Tillverkning och montering av denna rymdes dock inte inom projektets budget och tidsram. Det beslutades vid ett tidigt skede att detta istället får ses som ett framtida vidareutvecklingsprojekt. Den framtagna CAD-modellen kommer då att ge bra stöd och beskriva hur inneslutningen skall vara konstruerad för att passa på den tillverkade CNC-fräsen.

9.3.2 Omfattande testning och inkörning

En annan del som får ses som vidareutveckling blir att utföra testerna som tagits fram i testplanen. Fräsen skall också köras in och mjukvaran konfigureras efter testresultaten. Det är också viktigt för användarna att ha kunskap om fräsens prestanda, exempelvis vilka toleranser de kan få på den detalj som skall bearbetas.

9.3.3 Inmätning av arbetstyckets position

För att öka användarvänligheten kan ett potentiellt vidareutvecklingsprojekt vara att konstruera en mekatronisk inmätning av arbetstyckets position längs med de tre axlarna. Om fräsen med hjälp av sensorsignaler kan identifiera arbetsstyckets position och storlek så ökar användarvänligheten då de manuella inmätningarna elimineras. Det har förberetts i apparatlådan med två ingångar för banankontakter som i sin tur är kopplade till styrkretsen. Dessa kan användas vid inmätningen genom att en av dem är kopplade till en registreringsplatta som placeras på arbetsstycket. Den andra kontakten kopplas till en klämma som fästs på spindelns chuck. Styrkretsen registrerar när spindelns verktyg får kontakt med registreringsplattan och arbetsstyckets position registreras.

10

Slutsats

Syftet med kandidatarbetet var att leverera en CNC-fräs som kan bearbeta trä och polymermaterial, som komplement till maskinen skulle även en CAD-modell över konstruktionen skapas. Projektet har lyckats leverera en färdigställd maskin med tillhörande CAD-modell och kopplingsschema. Utöver det har även en testplan för vidare utvärdering av maskinens prestanda tagits fram. Den färdigställda maskinen öppnar upp för möjlighet till tillverkning av former för komposittillverkning på Chalmers som inte tidigare funnits.

Resultatet av konstruktionen och tillverkningen, samt simuleringar som gjorts under projektets gång, visar på att kraven som ställts är uppfyllda. Genom att följa den testplan som skapats kan även det verkliga resultatet utvärderas och jämföras mot simuleringar. De simuleringar och beräkningar som genomförts styrker trovärdigheten i att konstruktionen lever upp till de krav som definierats.

Tillverkning och montering av den utvecklade inneslutningen kommer att göra det möjligt att använda maskinen till att bearbeta större mängder av material som dammar, exempelvis polyuretan.

I och med projektets bredd har gruppen tränats i att binda samman tidigare kunskaper från flera olika ämnesområden för att lösa olika delmoment i projektet. För att konstruera och tillverka CNC-fräsen har främst kunskaper inom maskinelement, tillverkningsteknik, hållfasthetslära, mekatronik och produktutveckling kombinerats. Den främsta kunskapsfördjupningen har skett genom att ta en teoretisk modell till verklig produkt. Att tillverka konstruktionen har ställt högre krav på många arbetsmoment än tidigare i utbildningen.

Litteraturförteckning

- Alfredsson, B. (2014). *Handbok och formelsamling i hållfasthetslära*. Institutionen för hållfasthetslära, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm. 11:e omarbetade upplagan.
- ANSYS, Inc. (2017). *ANSYS*. Hämtad 2017-05-20 från <http://www.ansys.com/>.
- Arbetsmiljöverket (2017a). *Arbetsmiljöverket*. Hämtad 2017-05-19 från <https://www.av.se/>.
- Arbetsmiljöverket (2017b). *Maskiner (som släppts ut på marknaden efter 29 dec 2009) (AFS 2008:3), föreskrift*. Hämtad 2017-05-19 från <https://www.av.se/arbetsmiljoarbete-och-inspektioner/publikationer/foreskrifter/maskiner-som-slappts-ut-pa-marknaden-efter-29-dec-2009-afs-20083-foreskrift/>.
- Autodesk (2017). *Autodesk Inventor*. Hämtad 2017-05-19 från <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>.
- BE Group (2017). *Byggstålshandboken*. Hämtat 2017-05-10 från: http://www.begroup.com/upload/Sweden/Broschyrrer/BE%20Byggst%C3%A5lhandbok_webb_101021.pdf.
- Boström, A. (2001). *Fundamental Structural Dynamics*. Department of Mechanics, Chalmers University of Technology. Chapter 5.
- Burge, S. (2009). *The Systems Engineering Tool Box*. Hämtat 2017-05-11 från: <https://www.burgehugheswalsh.co.uk/uploaded/1/documents/pugh-matrix-v1.1.pdf>.
- Center for Creative Learning (2005). *Morphological Matrix*. Hämtat 2017-05-11 från: <https://creativethinktank.wikispaces.com/file/view/GenTool-Morph.pdf>.
- Ciba Specialty Chemicals (1998). *Polyurethane Range Ureol® 6414*. Hämtat 2017-05-10 från: <http://www.lindberg-lund.fi/files/Tekniske%20datablad/VAN-UR6414-TD.pdf>.
- CNC Router Parts (2017). *Which is better, a screw or rack and pinion drive?* Hämtat 2017-03-25 från: <http://www.cncrouterparts.com/which-is-better-a-screw-or-rack-and-pinion-drive-p-99.html>.
- Dassault Systemes (2017). *CATIA*. Hämtad 2017-05-19 från <https://www.3ds.com/products-services/catia/>.

- Dormer (2015a). *Katalog 2015*. Halmstad: Dormer Tools.
- Dormer (2015b). *Teknisk Handbok*. Halmstad: Dormer Tools.
- Fenerty, A. & Prentice, J. (2003). *Using Mach3Mill*. Hämtat 2017-05-10 från: http://www.machsupport.com/wp-content/uploads/2013/02/Mach3Mill_1.84.pdf.
- Geckodrive Motor Controls (2017). *Geckodrive G540*. Hämtad 2017-05-30 från <http://www.geckodrive.com/geckodrive-step-motor-drives/g540.html>.
- Goran, S. (2010). *Pouplar-HiFi, CNC Fräsmaskin*. Hämtat 2017-03-22 från: http://www.popular-hifi.com/projects/cnc_maskin/.
- Hågeryd, L., Björklund, S., & Lenner, M. (2002). *Modern produktionsteknik 1*. Solna: Liber.
- Lilja, Olsson, Wickström (1996). *Ritteknik: Faktabok*. Göteborg: Chalmers Repro-service.
- MachineDesign (2002). *Mechanical Switches*. Hämtat 2017-05-10 från: <http://www.machinedesign.com/basics-design/mechanical-switches>.
- Menke, H. (2014). *Basic Operationg Principle of an Inductive Proximity Sensor*. Hämtat 2017-05-10 från: <https://sensortech.wordpress.com/2014/03/05/basic-operating-principle-of-an-inductive-proximity-sensor/>.
- Nationalencyklopedin (2017a). *Fräsning*. Hämtad 2017-05-12 från <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/fräsning>.
- Nationalencyklopedin (2017b). *Spindel*. Hämtad 2017-05-11 från <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/spindel>.
- Nationalencyklopedin (2017c). *Starkström*. Hämtad 2017-05-12 från <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/starkström>.
- Newfangled Solutions (2017). *Mach3*. Hämtad 2017-05-19 från <http://www.machsupport.com/software/mach3/>.
- Palmqvist, J. (2003). *Parallel and normal cutting forces in peripheral milling of wood*. Hämtat 2017-05-16 från: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-003-0427-0>.
- Pierce, E. (2003). *Rack and pinion*. [Elektronisk bild] Hämtat 2017-05-15 från: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rack_and_pinion.png. Återgiven med tillstånd.
- Rago, J. (2011). *Accuracy, Repeatability and Resolution – What's the Difference?* Hämtat 2017-05-16 från: <http://www.heidenhain.us/resources-and-news/accuracy-repeatability-and-resolution-whats-the-difference/>.
- Rawcnc Sweden AB (2014). *Bygga egna maskiner*. Hämtat 2017-03-23 från: http://cncmaskiner.org/bygga_egna_maskiner/.

- Schumacher, D. (2013). *Ingen titel*. [Elektronisk bild] Hämtad från: <https://pixabay.com/sv/borrning-detaljgranskning-malning-84851/>. Återgiven med tillstånd.
- Sensotronik (2013). *Induktiva givare - beskrivning*. Hämtat 2017-05-10 från: http://www.sensotronik.se/dok/beskriv/beskriv_ind.htm.
- Solarbotics (2016). *Stepper Motor Basics*. Hämtad 2017-02-10 från <http://solarbotics.net/library/pdf/lib/pdf/motorbas.pdf>.
- Svedensten, P. and Evertsson, C. M. (2005). *Maskinelement - Övningar*. Studentlitteratur. Sida 330.
- Thomson Industries (2016a). *Ball Screws*. Hämtat 2017-03-27 från: http://www.thomsonlinear.com/website/com/eng/products/ball_screws_and_lead_screws/ball_screws.php.
- Thomson Industries (2016b). *Profile Rail Linear Guides*. Hämtat 2017-03-28 från: http://www.thomsonlinear.com/website/com/eng/products/linear_guides/profilerrail.php.
- Warp9 Tech Design (2017). *Ethernet SmoothStepper (ESS) Documentation Page*. Hämtat 2017-05-10 från: <https://warp9td.com/index.php/documentation/doc-ess#Description>.
- Wikipedia (2015). *Elkabel*. Hämtat 2017-05-12 från: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Elkabel>.
- Wikipedia (2017a). *Computer Numerical Control*. Hämtad 2017-05-11 från https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_control.
- Wikipedia (2017b). *G-code*. Hämtat 2017-05-10 från wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/G-code>.
- Wikipedia (2017c). *Variable-frequency drive*. Hämtat 2017-05-12 från: https://en.wikipedia.org/wiki/Variable-frequency_drive.

Bilagor

A Kravspecifikation

Kravspecifikation						
	Kriterier	Målvärde	K/Ö	Vikt	Verifieringsmetod	Kravställare
Funktion	En CNC-fräs som ska bearbeta trä och polymermaterial					
1	Prestanda					
1.1	Spindelvarvtal	6000 - 24 000 rpm	K		Specifikation från leverantör	Skärdata
1.2	Spindel effekt	2,2 kW	K		Specifikation från levernatör	Projektgruppen
1.3	Arbetsmatningshastighet	1000 mm/min	K		Tidtagning	Projektgruppen
1.4	Transportmatningshastighet z	1700 mm/min	K		Tidtagning	Projektgruppen
1.5	Transportmatningshastighet (xy)	5080 mm/min	K		Tidtagning	Projektgruppen
1.6	Transportmatningshastighet (xy)	7000 mm/min	Ö	2	Tidtagning	Projektgruppen
1.7	Förflyttning x-led	650 mm	K		Mätning	CFS
1.8	Förflyttning x-led	900 mm	Ö	5	Mätning	Projektgruppen
1.9	Förflyttning y-led	1250 mm	K		Mätning	CFS
1.10	Förflyttning y-led	1300 mm	Ö	5	Mätning	Projektgruppen
1.11	Förflyttning z-led	320 mm	K		Mätning	CFS
1.12	Förflyttning z-led	350 mm	Ö	3	Mätning	Projektgruppen
1.13	Steglängd	< 0,0025 mm	Ö	2	Beräkning	Projektgruppen
1.14	Steglängd	< 0,01 mm	K		Beräkning	Projektgruppen
1.15	Repeterbarhet	< 0.02 mm	K		Test och mätning	Projektgruppen
1.16	Linjeavvikelse	< 0.08mm på sträckan 100mm längs med vardera axel	K		Test och mätning	Projektgruppen
1.17	Linjeavvikelse	< 0.05mm på sträckan 100mm längs med vardera axel	Ö	4	Test och mätning	Projektgruppen
1.18	Drivningsglapp	< 0.005 mm för vadera axel	K		Test och mätning	Projektgruppen
1.19	Rörelse	I tre leder	K		Test och visuell inspektion	Chalmers
1.20	Chuck	Verktygssstorlek >=10mm	K		Specifikation från leverantör	Projektgruppen
1.21	Fästmöjlighet	Över hela arbetsytan	Ö	4	Test	Projektgruppen
1.22	Planhet arbetsyta	0.1mm	K		Mätning	Projektgruppen
1.23	Omgivningstemperatur	Ej överhettning T_omg < 30°C	K		Specifikation från leverantör och test	Chalmers
1.24	Uppsugning av spån vid plan fräsning	70%	K		Test	Chalmers
1.25	Uppsugning av spån vid plan fräsning	95%	Ö	3	Test	Chalmers
1.26	Strömförsörjning från nätaggregat	>14 Ampere	K		Specifikation från leverantör	Projektgruppen
1.27	Vibrationer	Amplitud < 0,1 mm, frekvens	K		Mätklocka	Projektgruppen
1.28	Vinkelräthet x-led mot y-led	0.52mm/1000mm (0.03°)	K		Mätning	Projektgruppen
1.29	Vinkelräthet x-led mot y-led	0.175mm/1000mm (0.01°)	Ö	2	Mätning	Projektgruppen
1.30	Vinkelräthet z-led mot xy-planet	0.52mm/1000mm (0.03°)	K		Mätklocka	Projektgruppen
1.31	Vinkelräthet z-led mot xy-planet	0.175mm/1000mm (0.01°)	Ö	2	Mätklocka	Projektgruppen
1.32	Elektronik placering	Anpassad placering på maskinen	K		Kontroll av konstruktion	Projektgruppen
1.33	Acceleration (xyz)	1 m/s^2	K		Test	Projektgruppen
1.34	Acceleration (xyz)	2 m/s^2	Ö	2	Test	Projektgruppen
1.35	Styvhet med skärkraft 43 N (finbearbetning)	Utböjning <= 0.1 mm	K		Simulering och beräkning	Projektgruppen
1.36	Styvhet med skärkraft 171 N (grovbearbetning)	Utböjning <= 0.5 mm	K		Simulering och beräkningar	Projektgruppen
1.37	Dimensionering för maxmoment vid kollision	Säkerhetsfaktor 2	K		Beräkningar	Projektgruppen
1.38	Referenspunkt	I tre leder	K		Test/kontroll	Projektgruppen
2	Miljö					
2.1	Dammnivån i lokalen hålls på en rimlig nivå	<5 % höjning av dammpartiklar i lokalen	K		Mätning	Chalmers
2.2	Skadliga partiklar från kompositbearbetning	Hindra partiklar att nå omgivning	Ö	4	Mätning	Chalmers
3	Livslängd					
3.1	Antal körningar	> 500 st	Ö	4	Kontroll	Projektgruppen
3.2	Antal timmar	> 2000 h	Ö	4	Kontroll	Projektgruppen
4	Kostnader					
4.1	Elektriska komponenter	< 12000kr	K		Budget	Chalmers
4.2	Material och övriga komponenter	< 13000kr	K		Budget	Chalmers
4.3	Material från prototypplabbet	< 2000kr	K		Budget	Chalmers
5	Storlek					
5.1	Maximalt arbetsstycke (xyz)	650x1250x320 mm	K		Mätning	CFS
5.2	Maximalt arbetsstycke (xyz)	900x1400x350 mm	Ö	5	Mätning	Projektgruppen
5.3	Yta arbetsbord (xy)	750x1400 mm	K		Mätning	Projektgruppen
5.4	Yta arbetsbord (xy)	1000x1500 mm	Ö	5	Mätning	Projektgruppen
5.5	Yttermått (xyz)	2000x2500x2200 mm	K		Mätning	Projektgruppen/Chalmers
5.6	Yttermått (xyz)	1400x1900x2000 mm	Ö	2	Mätning	Projektgruppen/Chalmers
6	Vikt					
6.1	Maxvikt totalt	< 1000 kg	K		Mätning	Projektgruppen
6.2	Maxvikt totalt	< 200 kg	Ö	2	Mätning	Projektgruppen
6.3	Maxvikt per modul	< 50 kg, gäller ej ramen	K		Mätning	Projektgruppen
7	Material					
7.1	Korrosionsskydd	Korrosion ska inte påverka prestandan under maskinens livslängd i inomhusmiljö	K		Materialval	Chalmers
8	Ergonomi					
8.1	Verktogsbyte	Smidigt byte med <= 3 verktyg	K		Test	Chalmers
8.2	Infästning av arbetsstycke	Smidigt och med <= 3 verktyg	K		Test	Chalmers
8.3	Arbetshöjd	900 ± 50 mm	K		Mätning	Projektgruppen
8.4	Åtkomst arbetsbord	Två sidor	K		Test/kontroll	Projektgruppen
8.5	Åtkomst arbetsbord	Fyra sidor	Ö	3	Test/kontroll	Projektgruppen
9	Underhåll					
9.1	Smörjning	Enkel åtkomst utan avancerad demontering	K		Test/kontroll	Projektgruppen
9.2	Byte av slitdelar	Möjligt utan destruktiv demontering	K		Test/kontroll	Projektgruppen
9.3	Kalibrering	> 1 år mellan varje tillfälle	Ö	4	Mätning	Projektgruppen
9.4	Drifttimmar mellan större underhåll	> 100 h	Ö	4	Kontroll	Projektgruppen
10	Säkerhet					
10.1	Stänga av vid fara	Nödstopp och överbelastningsskydd	K		Test	Arbetsmiljöverket
10.2	Ljudnivå	< 115 dB med kortvariga ljud (impuls ljud) < 135 dB	K		Mätning	Arbetsmiljöverket
10.3	Ljudnivå	< 80 dB	Ö	2	Mätning	Arbetsmiljöverket
10.4	Elektronik	Inkapslad	K		Kontroll	Chalmers
10.5	Problematik för rörliga delar	Hindra trassel och sammanstötning av komponenter	K		Testkörning	Projektgruppen
10.6	Spån- och dammskydd	IP5X utan cerifiering	K		Kontroll	Chalmers
10.7	Varna användaren om risker	Markering på maskinen	K		Kontroll	Arbetsmiljöverket
10.8	Teknisk tillverkningsdokumentation	Dokument som skall finnas tillgänglig i 10 år	K		Kontroll	Arbetsmiljöverket
10.9	EG-försäkr	Dokument på svenska som försäkrar att maskindirektivet uppfylls	K		Kontroll	Arbetsmiljöverket
10.10	CE-märkning	Märkning på maskinen	Ö	2	Kontroll	Arbetsmiljöverket
10.11	CE-märkning	Enligt märkningens krav	K		Kontroll	Arbetsmiljöverket
10.12	Inga vassa kanter på komponenter	Avrundade kanter	K		Test	Projektgruppen
11	Utseende					
11.1	Estetsikt tilltalande	Likvärdig motsvarande maskiner	Ö	2	Jämförelse	Projektgruppen
11.2	Färgsättning	Neutral	K		Jämförelse	Projektgruppen
11.3	Passa in i verkstadsmiljö	Likvärdig motsvarande maskiner	Ö	3	Jämförelse	Projektgruppen
12	Dokumentation					
12.1	CAD-modell	Komplett modell i välkänt format	K		Kontroll	Chalmers
12.2	Manual/instruktioner för användning, underhåll och säkerhet	Förståeligt för studenter på Chalmers, språk svenska	K		Kontroll	Chalmers/Arbetsmiljöverket
12.3	Manual/instruktioner för användning, underhåll och säkerhet	Förståeligt för studenter på Chalmers, språk engelska	K		Kontroll	Chalmers/Arbetsmiljöverket
13	Tillverkning					
13.1	Montering	Montering möjlig med de verktyg som finns i prototypplabbet	K		Kontroll	Projektgruppen
13.2	Demontering	Demontera för skrotning på 8 h	K		Beräkning utifrån montering	Projektgruppen
13.3	Modulär	Moduler som kan bytas ut vid behov av uppgradering	K		Kontroll	Projektgruppen
13.4	Fästelement	Preferens 1	K		Kontroll	Projektgruppen
13.5	Vidareutveckling	Lätt att addera funktioner	Ö	5	Kontroll av konstruktion	Chalmers
14	Transport					
14.1	Förflyttningsbar	Läglyftande pallyft	Ö	4	Test	Projektgruppen
14.2	Modulär	Enskilda delar ska kunna lyftas av två personer	K		Kontroll	Projektgruppen

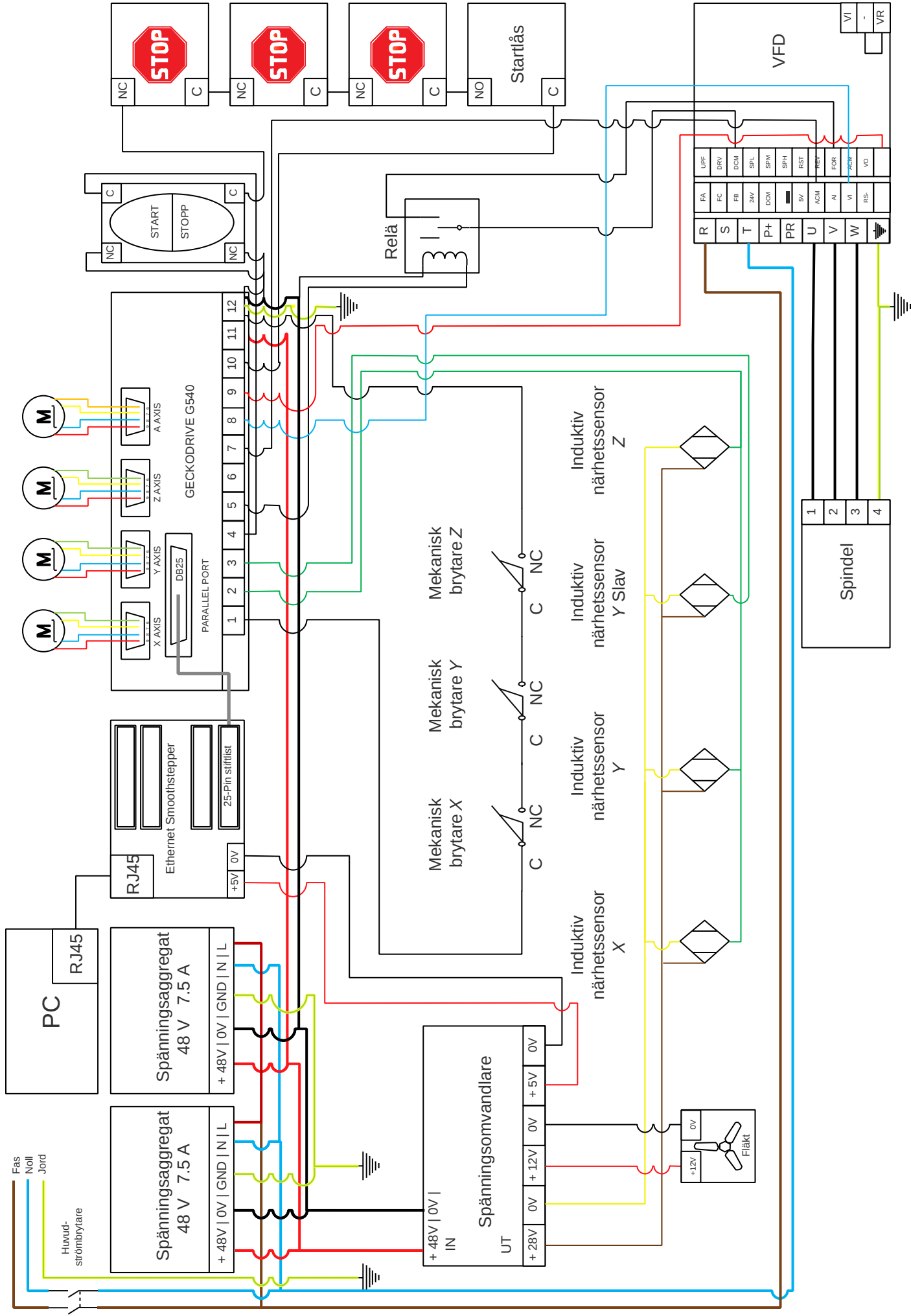
B Elimineringsmatris

Koncept	1. Prestanda														Kommentar	Beslut
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Röd	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	Skenstyrning	Eliminerad
Blå	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		Godkänd
Grön	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		Godkänd
Svart	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		Godkänd
Gul	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	Lagrade hjul	Eliminerad
Brun	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		Godkänd
Grå	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	Lagrade hjul	Eliminerad
Lila	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	Skenstyrning	Eliminerad
Orange	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		Godkänd
Turkos	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		Godkänd
Rosa	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		Godkänd
Lime	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		Godkänd

C Pughs konceptvalsmatris

Pughs konceptvalsmatris		Koncept						
		REFERENS						
Kostnads/ komplexitetsdrivare	Antal komponenter (fler = sämre)		0	0	0	+	+	+
	Materialmängd		0	0	0	+	+	-
	Produktionstid		-	-	0	0	-	0
	Reparationskomplexitet		0	-	0	-	-	0
Kundvärdet	Förflyttning (xyz)		0	-	0	0	0	-
	Upplösning		-	-	-	0	-	0
	Precision		-	-	-	0	-	0
	Vinkelräthet (xyz)		0	-	0	-	-	-
	Transportmatningshastighet		+	+	+	0	+	0
	Maximalt arbetsstycke		0	-	0	0	0	-
	Yttermått		0	-	0	0	0	-
	Åtkomst arbetsbord		0	-	0	0	0	-
Funktionalitet	Förflyttningsbar		0	-	0	0	0	-
	Yta arbetsbord		0	-	0	0	0	-
	Antal interaktioner mellan funktioner/komponenter		-	+	0	0	-	0
Robusthet	Drifttimmar mellan större underhåll		-	+	0	0	-	0
	Styvhet		0	-	-	0	0	+
	Livslängd		+	0	0	0	+	0
	Antal toleranser som krävs på ingående komponenter		0	+	0	0	0	0
Risker	Tekniska risker i konstruktionsutmaningar		-	0	0	0	-	0
	Säkerhet för användaren		-	+	0	0	-	+
	Ekonomisk risk		0	+	0	0	0	0
	Innovationsnivå, beprövad teknik		0	-	0	0	0	-
Interna/externa krav	Utnyttjande av existerande resurser		0	+	0	+	+	0
	Svårighetsgrad att utveckla konceptet		-	0	0	0	-	0
	Möjlighet att vidareutveckla		0	-	0	0	0	-
Resultat	Antal "+"		2	7	1	3	5	3
	Antal "0"							
	Antal "-"		8	14	3	2	10	10
	Total		-6	-7	-2	1	-5	-7

D Kopplingsschema



E Komponentlista

Mekaniska komponenter

Artikel	[st] alt. [m]	Totalpris [kr]	Inköpsställe
Kulskruv RM1605-C7 500mm	1	5 050 kr	eBay Inc.
Kulskruv RM1605-C7 1000mm	1		eBay Inc.
Kulskruv RM1605-C7 1500mm	2		eBay Inc.
Lagersäte BK12	4		eBay Inc.
Lagersäte BF12	4		eBay Inc.
Kulskruvsmutter	4		eBay Inc.
Flexibel koppling 6.35mm till 10mm	4		eBay Inc.
Linjärstång SBR16 500mm	2		eBay Inc.
Linjärstång SBR16 1000mm	2		eBay Inc.
Linjärstång SBR16 1500mm	2		eBay Inc.
Kulbussning SBR16UU	12		eBay Inc.
Aluminiumprofil 60x60x1800mm	2	4 470 kr	Motedis GmbH
Aluminiumprofil 60x30x1000mm	6		Motedis GmbH
Aluminiumprofil 120x60x1210mm	1		Motedis GmbH
Fjädrad T-mutter	300		Motedis GmbH
MDF 19x2400x1220	2	600 kr	Bauhaus
Fyrkantsrör i stål 60x40mm	20	1 320 kr	Göteborgs Handelsstål AB
Aluminium 2x1000x1000mm	1	6 000 kr	Inget köpställe
Aluminium 3x1000x2000mm	2		Inget köpställe
Aluminium 10x1000x1000mm	1		Inget köpställe
Aluminium 15x500x1000mm	1		Inget köpställe
Aluminium 20x200x300mm	1		Inget köpställe
Skruv, mutter och bricka	800	900 kr	TOOLS Sverige AB
Inslagsmutter M10	100		TOOLS Sverige AB
Gummistopp 20x20mm	8	45 kr	Eugen Wiberger AB
Maskinfot 50mm	4	430 kr	Eugen Wiberger AB
Bälg	8	1 530 kr	eBay Inc.
Kardborreband 3000x25mm	2	120 kr	Biltema
Hammarlack svart 750ml	1	180 kr	Biltema
Vajer 2000mm	5	350 kr	Biltema
Excenterlås	1	50 kr	Inget köpställe
Gångjärn	2	100 kr	Inget köpställe
Tätningsslist, P-list 5000mm	1	40 kr	Bauhaus
Kabelkedja 35x73x1000mm	1	280 kr	JB CNC & Linear Components
Kabelkedja 23x50x1000mm	2	340 kr	Amazon.com, Inc.
Total kostnad mekaniska komponenter		21 805 kr	

Elektroniska komponenter

Artikel	[st] alt. [m]	Totalpris [kr]	Inköpsställe
Mach3	1	1 520 kr	Newfangled Solutions LLC
Geckodrive G540	1	2 300 kr	Automation Technology Inc
Ethernet SmoothStepper	1	1 830 kr	Automation Technology Inc
Stegmotor Nema23 2,7Nm 3,5A 1,8°	4	1 360 kr	Automation Technology Inc
VFD och spindel 2,2kW	1	3 123 kr	eBay Inc.
Nätaggregat 48V 7,5A	2	610 kr	Automation Technology Inc
Induktiv sensor NC	4	360 kr	Farnell Components AB
Mekanisk brytare	3	15 kr	Farnell Components AB
Nödstopp NC	3	750 kr	Biltema
Ethernetkabel	2	40 kr	Farnell Components AB
Kabel 4 ledare skärmad flexibel 1,5mm² (spindel)	6	270 kr	JB CNC & Linear Components
Kabel 4 ledare skärmad 0,5mm² (Stegmotorer)	20	200 kr	Farnell Components AB
Kabel 2 ledare 0,25mm² (Nödstopp och mekaniska brytare)	20	145 kr	Farnell Components AB
Kabel 4 ledare skärmad flexkabel 0,25 mm² (Induktiva givar	20	285 kr	Elfa International AB
Kabel övrig	10	10 kr	Farnell Components AB
Jordkabel flexibel	7	70 kr	Elfa International AB
Krympslang, blandade diametrar	5	50 kr	Biltema
Startknapp med kontaktblock	1	265 kr	Farnell Components AB
Nyckelbrytare	1	65 kr	Farnell Components AB
Kontaktdon 4pin hona, kabelmonterad	5	65 kr	Farnell Components AB
Kontaktdon 4pin hane, panelmonterad	5	50 kr	Farnell Components AB
Kontaktdon 6pin hona, kabelmonterad	5	125 kr	Farnell Components AB
Kontaktdon 6-pin hane, panelmonterad	5	100 kr	Farnell Components AB
Kontaktdon 5-pin hona, kabelmonterad	4	60 kr	Farnell Components AB
Kontaktdon 5-pin hane, kabelmonterad	4	60 kr	Farnell Components AB
Tätad genomföring	1	20 kr	Farnell Components AB
Ethernetutgång hona	1	75 kr	Farnell Components AB
Spänningsomvandlarkretsens inefattade komponenter	1	25 kr	Farnell Components AB
Strömbrytare	1	10 kr	Farnell Components AB
Nätkabelingång	1	10 kr	Farnell Components AB
Nätkabel	1	10 kr	Farnell Components AB
Relä	1	15 kr	Farnell Components AB
Lysdioder	2	25 kr	Farnell Components AB
Kopplingsplintar	4	65 kr	Farnell Components AB
Fläkt	1	50 kr	Inget köpsställe
Total kostnad elektroniska komponenter		13 408 kr	

Alla komponenter

Total kostnad alla komponenter 35 213 kr
--

F Beräkningar

F.1 Beräkningar av axialkraft från stegmotorer

Från formelsamlingen i Maskinelement (Svedensten and Evertsson, 2005) formel 21 för åtdragningsmoment.

$$M = F_{\text{ax}}(0.16P + 0.58\mu d_2 + \mu_b r_m) \quad (\text{A.1})$$

Beskrivning av variabler:

M = Moment på skruv (Maxmoment 2,7 Nm)

P = Gängstigning (5 mm)

μ = Gängfriktion (Väldigt liten p.g.a. kulskruv, approximeras till noll)

μ_b = Underlagsfriktion (Noll i detta fall då vi inte har något underlag)

d_2 = Medeldiameter på skruv

r_m = Medelradie för anläggningsytan

Detta leder till följande axialkraft vid krocklast:

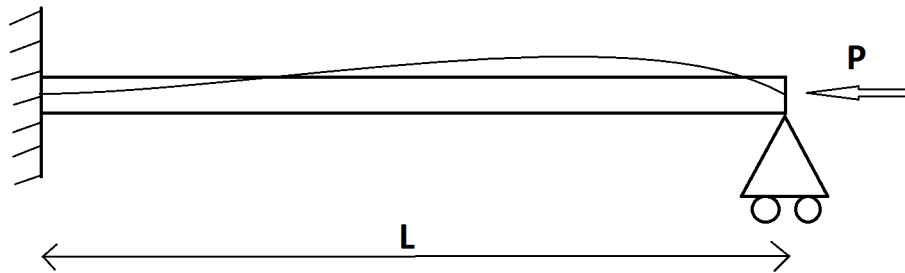
$$F_{\text{ax}} = \frac{M}{0.16P} = \frac{2.7}{0.16 \cdot 0.005} = 3375 \text{ N} \quad (\text{A.2})$$

Med en verkningsgrad på 90 % fås:

$$F_{\text{ax}} = 0.9 \cdot 3375 \approx 3000 \text{ N} \quad (\text{A.3})$$

F.2 Knäckning kulskruv

För beräkning av knäckning på kulskruven användes Eulers tredje knäckningsfall med en fast inspänd ände och en fritt upplagd enligt figur A.1.



Figur A.1: Eulers tredje knäckfall.

Kritisk last fås då från:

$$P_{kr} = \frac{2,05\pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{A.1})$$

Här är:

E = Elasticitetsmodul (210 GPa för stål)

L = Kulskruvens längd (1,2 m som kan belastas vid krock)

I = Yttröghetsmoment, beräknas för cirkulärt tvärsnitt med skruvens innerdiameter.

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{0,007^4 \pi}{4} = 3,8 \times 10^{-5} \text{ m}^4 \quad (\text{A.2})$$

Detta ger den kritiska lasten enligt:

$$P_{kr} = \frac{2,05\pi^2 EI}{L^2} = \frac{2,05\pi^3 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 0,007^4}{4 \cdot 1,2^2} = 5564 \text{ N} \quad (\text{A.3})$$

Det ger oss en säkerhetsfaktor på ungefär 1,85 gentemot den axiella kraft som motorn kan utveckla vid en eventuell krock.

F.3 Resonans kulskruv

Vid beräkning av egenfrekvenser för kulskruv används följande antaganden och data.

- Materialet är stål med elasticitetsmodul 210 GPa och densitet (ρ) 7850 kg/m³.
- Maximal frigående längd på kulskruven är 1,25 m.
- För radien på skruven används innerradien 7 mm.
- Skruven är fast inspänd på motorsidan och fritt upplagd i den andra änden.
- Lägsta egenvärde (λ_1) avläses ur tabell med ovanstående randvilkor till 3,927. (Boström, 2001)

Yttröghetsmomentet för ett cirkulärt tvärsnitt beräknas med ekvation A.1.

$$I = \frac{\pi \cdot r^4}{4} \quad (\text{A.1})$$

Egenfrekvenser beräknas sedan med ekvation A.2. I ekvationen är $n = 1, 2, 3, \dots$ positiva heltal. (Boström, 2001)

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{A\rho}} = \frac{\lambda_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E\pi r^4}{4\pi r^2 \rho}} \quad (\text{A.2})$$

Med de antagna värdena fås en lägsta egenfrekvens på kulskruvarna till:

$$f_1 = 28,44 \text{ Hz} \quad (\text{A.3})$$

De valda stegmotorerna, se avsnitt 6.2.1, kan leverera ett varvtal på 1300 rpm vilket motsvarar en frekvens på 21,67 Hz.

Kravet på maximal matningshastighet motsvarar en rotationshastighet på cirka 1000 rpm. Används denna rotationshastighet fås istället en frekvens på 16,7 Hz.

F.4 Beräkning av skärkraft för hårda plaster

Vid beräkning av skärkraft görs följande antaganden:

- Materialet som bearbetas betecknas som ”hårda plaster” (Dormer, 2015b)
- Skäret som används är en pinnfräs vid namn C159 (Dormer, 2015a)

Grovbearbetning

Data som används (Dormer, 2015a) (Dormer, 2015b):

$m_c = 0.2$ (materialkonstant för hårdplast)

$k_{c1} = 1400 \text{ N/mm}^3$ (specifik skärkraftskonstant för hårdplast)

$K_0 = 90^\circ$ (ställvinkel)

$a_e = 5 \text{ mm}$ (radiellt skärdjup)

$a_p = 5 \text{ mm}$ (axiellt skärdjup)

$f_z = 0,038 \text{ mm/tand}$ (tandmatning)

$D_{\text{cap}} = a_e = 5 \text{ mm}$ (fräsdiameter vid faktiskt skärdjup, a_e)

Skärkraft beräknas då enligt (Hågeryd, L., Björklund, S., & Lenner, M., 2002)

Genomsnittlig spåntjocklek:

$$h_m = 360 \cdot \sin(K_0) \cdot a_e \cdot \frac{f_z}{\pi \cdot D_{\text{cap}} \cdot \arccos\left(1 - \frac{2a_e}{D_{\text{cap}}}\right)} = 0,0121 \text{ mm} \quad (\text{A.1})$$

Specifik skärkraft:

$$k_c = k_{c1} \cdot h_m^{-m_c} = 3385,1 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{A.2})$$

Skärkraft:

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f_z = 643 \text{ N} \quad (\text{A.3})$$

Finbearbetning

Data som används (Dormer, 2015a) (Dormer, 2015b):

$m_c = 0.2$ (materialkonstant för hårdplast)

$k_{c1} = 1400 \text{ N/mm}^3$ (specifik skärkraftskonstant för hårdplast)

$K_0 = 90^\circ$ (ställvinkel)

$a_e = 5 \text{ mm}$ (radiellt skärdjup)

$a_p = 1 \text{ mm}$ (axiellt skärdjup)

$f_z = 0,038 \text{ mm/tand}$ (tandmatning)

$D_{\text{cap}} = a_e = 5 \text{ mm}$ (fräsdiameter vid faktiskt skärdjup, a_e)

Skärkraft beräknas då enligt (Hågeryd, L., Björklund, S., & Lenner, M., 2002)

Genomsnittlig spåntjocklek:

$$h_m = 360 \cdot \sin(K_0) \cdot a_e \cdot \frac{f_z}{\pi \cdot D_{\text{cap}} \cdot \arccos(1 - \frac{2a_e}{D_{\text{cap}}})} = 0,006 \text{ mm} \quad (\text{A.4})$$

Specifik skärkraft:

$$k_c = k_{c1} \cdot h_m^{-m_c} = 3888,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{A.5})$$

Skärkraft:

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f_z = 147 \text{ N} \quad (\text{A.6})$$

F.5 Beräkning av skärkraft för trä

Vid beräkning av skärkraft görs följande antaganden:

- Skärdaten är baserad på mätdata från tester då Polypropylene bearbetats i CNC-fräs, det har liknande skäregenskaper som trä (Palmqvist, J., 2003)
- Den specifika skärkraften antas vara lika vid grov- och finbearbetning

Data som används (Palmqvist, J., 2003):

$F_N = 35 \text{ N}$ (maximal normalkraft vid fräsning)

$F_P = 45 \text{ N}$ (maximal parallellkraft vid fräsning)

$D = 60 \text{ mm}$ (fräsdiameter)

$a_p = 2 \text{ mm}$ (axiellt skärdjup)

$h_m = 0,05 \text{ mm}$ (medel spåntjocklek)

$v_f = 160 \text{ mm/min}$ (bordsmatning)

$v_c = 113,09 \text{ m/min}$ (skärhastighet)

$n = 600 \text{ rpm}$ (varvtal spindel)

$z = 1 \text{ st}$ (antal tänder på skär)

Specifik skärkraft k_c beräknas då enligt (Hågeryd, L., Björklund, S., & Lenner, M., 2002):

$$F_c = \sqrt{F_N^2 + F_P^2} = 57,01 \text{ N} \quad (\text{A.1})$$

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} = 0,267 \text{ mm/tand} \quad (\text{A.2})$$

$$k_c = \frac{F_c}{a_p \cdot f_z} = 106,89 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{A.3})$$

Grovbearbetning

$f_z = 0,2 \text{ mm/tand}$ (tandmatning)

$a_p = 8 \text{ mm}$ (axiellt skärdjup)

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f_z = 171,024 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{A.4})$$

Finbearbetning

$f_z = 0,05 \text{ mm/tand}$ (tandmatning)

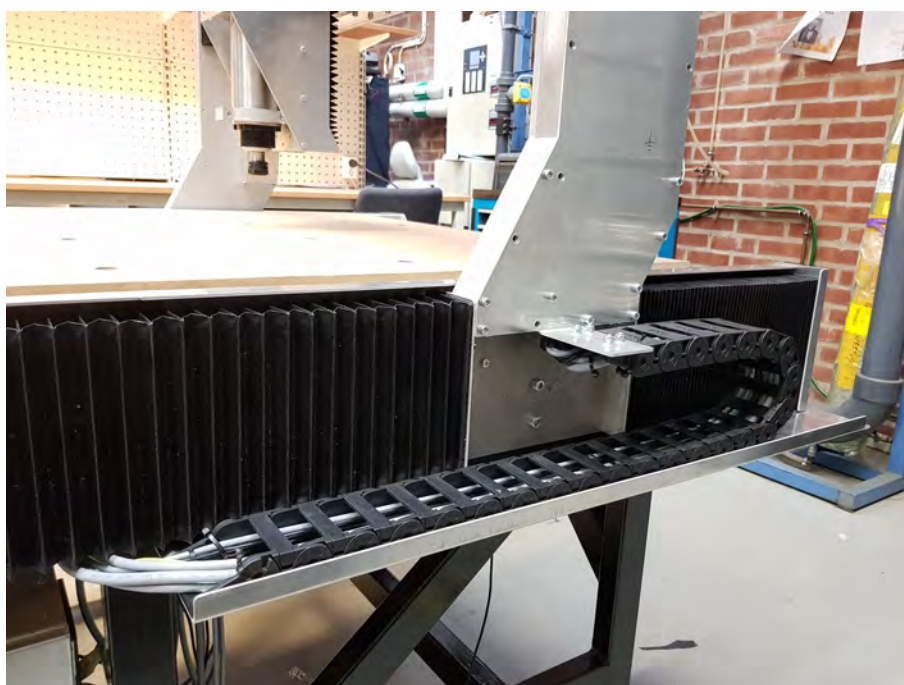
$a_p = 8 \text{ mm}$ (axiellt skärdjup)

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f_z = 42,756 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{A.5})$$

G Monterad maskin



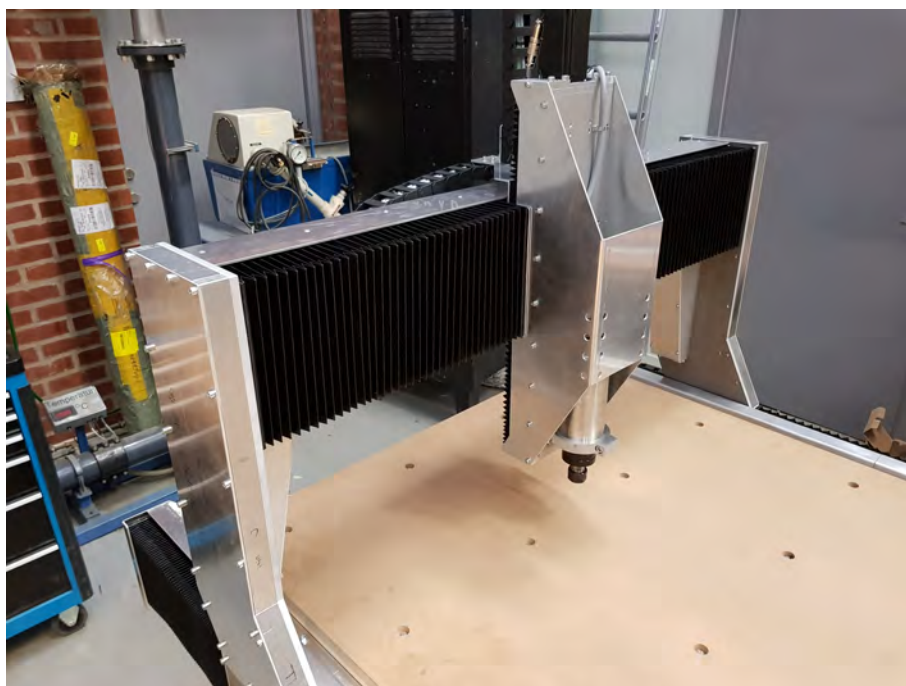
Figur G.1: Maskinen monterad, framifrån.



Figur G.2: Kabelkedja i Y-led monterad, framifrån.



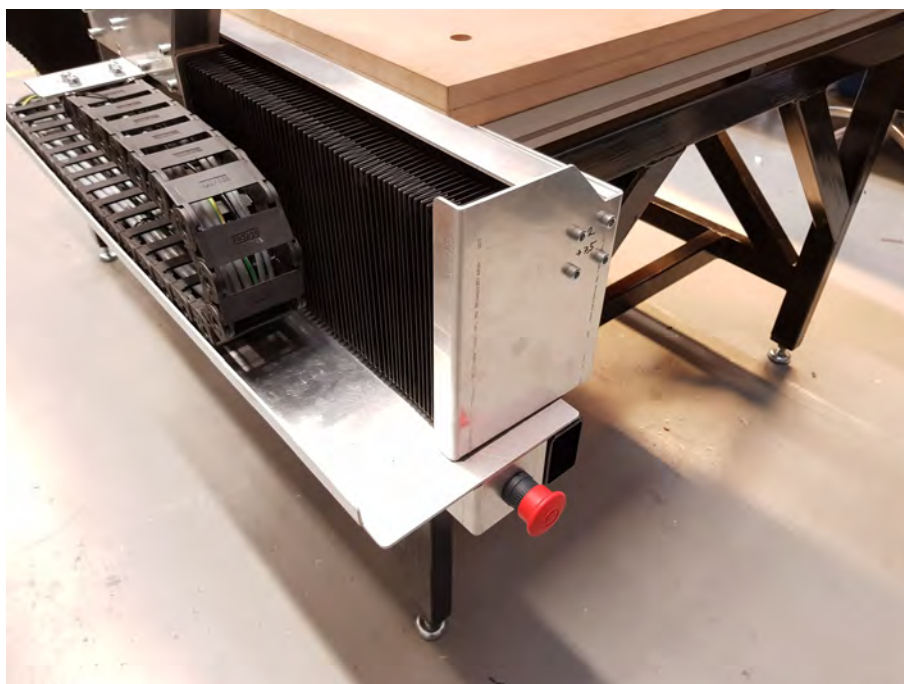
Figur G.3: Kabelkedjor i X- och Z-led monterade.



Figur G.4: Den tillverkade portalen monterad.



Figur G.5: Z-assembly monterad på portalen, underifrån.



Figur G.6: Kabelkedja i Y-led monterad, bakifrån.