

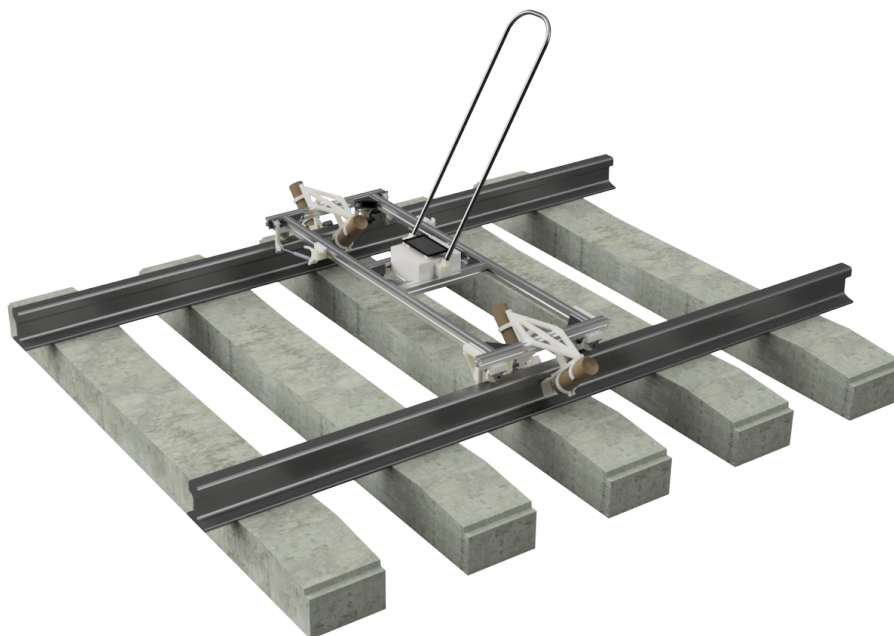
Jonas Mårvad Øvstegård, Peder Sagmo og Edel Reppe

Design og utvikling av måletralle for svillebytte

Design and Development of a Measuring Trolley for Changing Sleepers

Bacheloroppgave i Bachelor maskingeniør
Veileder: Knut Sørby

Mai 2024



Jonas Mårvad Øvstegård, Peder Sagmo og Edel Reppe

Design og utvikling av måletralle for svillebytte

Design and Development of a Measuring Trolley for Changing Sleepers



Bacheloroppgave i Bachelor maskingeniør
Veileder: Knut Sørby
Mai 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon



Kunnskap for en bedre verden

Bacheloroppgaven	
Tittel: Design og utvikling av måletralle for svil- lebytte Design and Development of a Measuring Trolley for Changing Sleepers	Prosjektnummer: MTP-K-2024-02
Forfattere: Jonas Mårvad Øvstegård, Peder Sagmo, Edel Maria Reppe	Dato levert: 21.05.2024 Gradering: Åpen/ Lukket
Oppdragsgiver eksternt: Totalprosjekt Namsskogan AS	
Veileder internt: Knut Sørby	
<p>Kort Sammendrag:</p> <p>Opgaven omhandler design og produksjon av prototype for en måletralle som skal markere jernbaneskiner før svillebytte. Denne trallen skal være designet i samsvar med NS-EN 13977 for å bli godkjent til å brukes på jernbanenettverket i Norge. Det skal designes både en mekanisk og en elektrisk del for å lage en funksjonell prototype av måletrallen.</p> <p>Funksjonen til det mekaniske er å ha en robust ramme som holdes godt festet på jernbaneskinene og har en mekanisme som kan markere skinnene. Det elektriske skal måle avstanden kjørt ved hjelp av enkodere og drive servomotorene som utløser markeringsmekanismen. Hele det elektriske systemet drives av en Raspberry Pi 5.</p> <p>Short abstract:</p> <p>The task concerns the design and production of a prototype for a measuring trolley that will mark railway tracks before sleeper replacement. This trolley must be designed in accordance with NS-EN 13977 to be approved to drive on the railway network in Norway. Both a mechanical and a electrical part must be designed to create a functional prototype of the measuring trolley. The function of the mechanical system is to have a robust frame that stays firmly fixed on the railway rails and has a mechanism that can mark the rails. While the electric system will measure the distance driven using incremental encoders and drive the servomotors that trigger the marking mechanism. The electrical system is powered by a Raspberry Pi 5.</p>	
Stikkord Jernbane Svillebytte Tralle Raspberry Pi Enkoder Python	Keywords Railway Sleeper change Trolley Raspberry Pi Encoder Python

Forord

Denne rapporten er skrevet som den avsluttende oppgaven på bachelorstudiet i maskiningeniør ved NTNU Trondheim. Vi håper denne oppgaven kan knytte oss nærmere arbeidslivet og gi oss verdifull kunnskap til senere i jobben som ingeniør.

Vi ønsker å rette en stor takk til veileder Knut Sørby som har vært en god støtte under prosjektet med veiledning og konstruktive tilbakemeldinger. Det har vært til stor hjelp å avholde regelmessige møter for å avklare og diskutere utfordringer og gode løsninger.

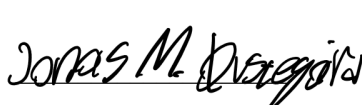
En stor takk rettes også til Bjørnar Myrvold i Totalprosjekt Namsskogan, som har vært en viktig samarbeidspartner i realiseringen av dette prosjektet. Deres bidrag finansielt og faglig har vært avgjørende for å gjøre prosjektet helhetlig med praktisk arbeid. Det var også svært lærerikt å besøke verkstedet for bygging av prototypen.

Vi vil også takke Trond Østerås og Jan-Petri Bengtsson fra Jernbanetilsynet for deres verdifulle innsikt og hjelp med å forstå regelverket og kravene som gjelder for drift av arbeidstraller på jernbanenettet i Norge.

Gruppen ønsker å takke NTNU for å gi god faglig opplæring som har gitt gruppemedlemene rikelig med kunnskap i løpet av de 5 semesterene før prosjektstart.

For å gjennomføre bacheloroppgaven vår på best mulig vis var det en prioritet for oss å finne et tema som alle tre ser på som interessant og relevant for oss. Vi ønsket å ha et prosjekt som ikke bare var teoretisk, men der vi faktisk fikk bruke kunnskapen vår i praksis ved å lage et fungerende produkt. Vi har lært mye gjennom denne oppgaven, og vi har sett hvordan effektivisering kan gjøre fremtiden enklere for vedlikehold av jernbanen.

Dato: 21.05.2024



Jonas Mårvard Øvstegård



Peder Sagmo



Edel Maria Reppe

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven viser design og utvikling av en måletralle som skal brukes til å markere jernbaneskiner før utskifting av sviller. Tralleprototypen består av både mekaniske og elektriske komponenter, og designes innenfor rammene i NS-EN 13977 for å få godkjenning til å brukes på jernbanen av Statens jernbanetilsyn. Trallen skal dyttes og opereres manuelt av en operatør.

Trallen er tegnet i Autodesk Fusion, og er bygd opp av en ramme av aluminiumsprofiler og et hjuloppheng med en festemekanisme som låser trallen fast mellom skinnene. Dette styrer trallen på sporet og hindrer rotasjon som kan forstyrre målingene og markeringene. Trallen er utstyrt med et bremsesystem for å forhindre at den kan trille utilsiktet fra operatøren. Markeringmekanismen er gjennom flere tester utviklet for å lage en presis stripe på hver side av begge skinner. Mekanismen består av spraybokser som aktiveres av servomotorer. Malingen treffer plater med slisser for å lage en smal malingsstripe.

Det elektriske systemet består av en Raspberry Pi som behandler signalene fra enkoderne. Enkoderne registrer rotasjon, måler hvor langt trallen har forflyttet langs skinnene og signaliserer når den har kjørt langt nok til en ny markering. Det er skrevet kode i Python som regner ut svilleavstanden innenfor kraven som er satt av BaneNOR. Denne koden tar også hensyn til punkter hvor svillene ikke kan plasseres. En logic level converter (LLC) gjør at signalene mellom Raspberry Pi og enkoderne er kompatible. Servomotorer aktiverer sprayboksdyser der markeringene skal være langs skinnene, og styres av Raspberry Pi'en med hjelp av et PWM utvidelseskort. Det hele kontrolleres fra en touch-skjerm som gjør hele systemet mer brukervennlig for operatøren.

En prototype er bygget og de elektriske komponentene er testet. Arbeidet som gjenstår for å fullføre prototypen er å; redesigne plasseringen av servomotorene for utløsning av spraybokser, designe justeringsmekanisme for avstand fra dyse til skinne og ferdigstille koden til brukergrensesnittet til skjermen. I tillegg gjenstår følgende for å få trallen godkjent hos Jernbanetilsynet; teste bremsesystemet, lage brukerveiledning og skrive søknad. For at prototypen skal bli holdbar må det også lages nye deler i sterkere materialer fra 3D-printer eller CNC-maskinering.

Abstract

This bachelor's thesis shows the design and development of a prototype for a measuring trolley to be used to mark railway tracks before replacing sleepers. The trolley prototype consists of both mechanical and electrical components, and is designed within the framework of NS-EN 13977 in order to obtain approval for use on the railway by the "Statens jernbanetilsyn". The trolley must be pushed and operated manually by an operator.

The trolley was designed in Autodesk Fusion, and is made up of a frame of aluminum profiles and a wheel suspension with a fastening mechanism that locks the trolley firmly between the rails. This steers the trolley on the track and prevents rotation that could disturb the measurements and markings. The trolley is equipped with a braking system to prevent it from rolling away unintentionally from the operator. The marking mechanism has been developed through several tests to create a precise stripe on each side of both rails. The mechanism consists of spray cans that are activated by servo motors. The paint hits slitted plates to create a narrow paint strip.

The electrical system consists of a Raspberry Pi that processes the signals from the encoders. The encoders register rotation, measure how far the trolley has moved along the rails and signal when it has traveled far enough for a new marking. Code has been written in Python that calculates the sleeper distance within the requirement set by Bane NOR. This code also takes into account points where the sleepers cannot be placed. A logic level converter makes the signals between the Raspberry Pi and the encoders compatible. Servo motors activate the spray can nozzle where the markings should be along the rails, and are controlled by the Raspberry Pi with the help of a PWM expansion card. The whole thing is controlled from a touch screen, which makes the system more user-friendly for the operator.

A prototype has been built and the electrical components have been tested. The work that remains to complete the prototype is to; redesign the placement of the servo motors for triggering the spray cans, design the nozzle-to-rail distance adjustment mechanism and finalize the code for the screen's user interface. In addition, the following remains to be done to get the trolley approved by "Statens jernbanetilsyn"; test brakes, create a user guide and write an application. In order for the prototype to be durable, new parts must be made in stronger materials from 3D printers or CNC machining.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Figurliste	vi
Tabelliste	viii
1 Innledning	1
1.1 Motivasjon	1
1.2 Bakgrunn	1
1.3 Problemstilling	2
1.4 Resultatmål	2
1.5 Effektmål	3
1.6 Begrensninger	3
1.7 Oppbygning av oppgaven	3
2 Regelverk	4
2.1 Overbygning	4
2.2 Skinnegående materiell	4
3 Traller til jernbane	6
4 Økonomiske rammer	7
5 Design og utvikling	8
6 Ramme	9
6.1 Design og konstruksjon	9
6.2 Diskusjon av ramme	13

7 Hjuloppheng og bremsesystem	15
7.1 Valg av hjuloppheng	15
7.2 Design av hjuloppheng	16
7.3 Strammemekanisme	19
7.4 Bremsesystem	21
7.5 Diskusjon av hjuloppheng og bremsesystem	23
8 Markeringsmekanisme	27
8.1 Designprosessen	27
8.2 Bygging og testing	30
8.3 Resultater	32
8.4 Diskusjon av markeringsmekanisme	34
9 Elektronikk	36
9.1 Innledning	36
9.2 Elementer i målesystemet	37
9.2.1 Raspberry Pi	37
9.2.2 Enkoder	38
9.2.3 Logic level converter	40
9.2.4 Servomotor	40
9.2.5 PWM utvidelseskort	41
9.2.6 Touch-skjerm	42
9.2.7 Måleusikkerhet	43
9.3 Kode	44
9.4 Bygging og testing	47
9.4.1 Elektrisk systemdesign	47
9.4.2 Program til touch-skjerm	49
9.5 Måleusikkerhet	52

9.6	Diskusjon	54
9.6.1	Kontrollmåling	54
10	Diskusjon	57
11	Konklusjon	60
	Referanseliste	61
	Vedlegg	64
A	Kode til svilleplassering	64
B	Kode som kjører enkodere	68
C	Kode til touch-skjerm	70
D	Maskintegninger	75
E	Koblingsoppsett	78
F	Deleliste	79

Figurliste

1	Dronefoto fra svillebytte	2
2	Gauge, utklipp fra NS-EN 13977 (Standard-Norge 2024, side 24) (mål oppgitt i millimeter)	5
3	Eksempel på tralle for transport av utstyr (AS Fredrikstad 2024)	6
4	Eksempel på tralle med påmonterte måleinstrumenter (Norgeodesi 2024)	6
5	Vinkelbraketter	9
6	Utklipp fra Fusion: 3D-modell av aluminiumsprofil	10
7	Festemuttere	10
8	Utklipp fra Fusion: 3D-modell av skinnegang med sviller	11
9	Skinneprofil	11
10	Utklipp fra Fusion: 3D-modell av ramme	12

11	Utklipp fra Fusion: Oppdatert rammedesign	13
12	Foto fra bygging	13
13	Utklipp fra Fusion: Krefter på ramme	14
14	Skinnehjul med flens (Munday and son 2024)	15
15	Skinnehjul med sideveis støtte (Norgeodesi 2024)	16
16	Hjul og fotlager	17
17	Utklipp fra Fusion: Brakett til hjullager	17
18	Utklipp fra Fusion: Oppdatert design av brakett til hjullager	18
19	Utklipp fra Fusion: Brakett til enkoder	18
20	Tegning av hjuloppheng med enkoder	19
21	Lineær skinnføring	19
22	Håndtegning av strammemekanisme	20
23	Utklipp fra Fusion: Strammemekanisme	20
24	Foto fra testing av strammemekanisme	21
25	Foto fra testing av strammemekanisme	21
26	Håndtegning av bremsemekanisme	22
27	Utklipp fra Fusion: Sammensatt modell av hjul med hjullager og bremsesystem	22
28	Tegning av hjuloppheng med brems	23
29	Fysisk hjuloppheng med enkoder	23
30	Utklipp fra Fusion: Brakett til gassfjær	24
31	Utklipp fra Fusion: Krefter på sideveis støtte	25
32	Tidlige skisser av markeringmekanismen	27
33	Skisse av sprayboksholder	28
34	Tidlige skisser av sammenstilling av markeringmekanisme	28
35	3D-modell av sammenstillingen til hele markeringmekanismen	29
36	Skisse av glideskinne på markeringmekanismen	29
37	3D-modell av glideskinne assembly	30

38	Slisse 3D-modell og testing	31
39	A: Rust-Oleum spraymaling, B: Würth Spraymaling, C:Servomotor	32
40	Spraytest 1	33
41	Spraytest 2	33
42	Render av 3D-modellen	33
43	Maskintegning av måletrallen	34
44	GPIO pinout diagram for raspberry Pi (RaspberryPI 2024a)	38
45	Digitale signaler fra enkoder (SICK 2024b)	39
46	Adafruit logic level converter (Adafruit 2024a)	40
47	Dualsky AS549 servo (Elefun 2024)	41
48	Adafruit 16 kanals PWM HAT (Adafruit 2024b)	42
49	Streamline results	43
50	Eksempel på skinnestrekning	45
51	Liste med plassering av sviller fra eksempelet i figur 50	46
52	Elektriske koblinger	47
53	Enkoderen som brukes (SICK 2024b)	48
54	Ønsket utseende på touch-skjerm	49
55	Kode til test av app	50
56	Test av app	50
57	Test av app skrevet av kunstig intelligens	51
58	Målestav med gule merker	55

Tabelliste

1	Estimerte kostnader	7
2	Sammendrag måleteknikk	53

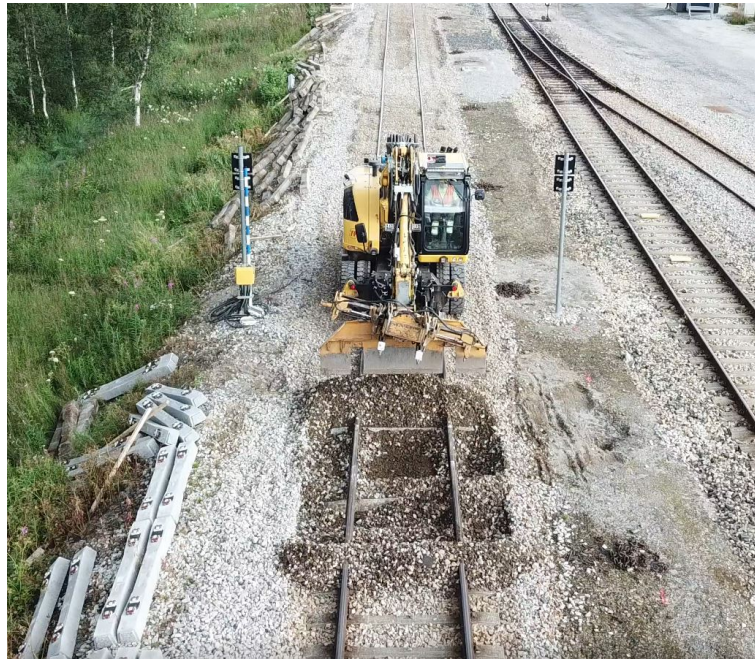
1 Innledning

1.1 Motivasjon

Den største motivasjonen for denne oppgaven var å jobbe med et praktisk prosjekt, hvor man får designe, bygge og teste et produkt som har stor nytteverdi. Det har blitt mange teoritunge fag under studiet og lite praktisk arbeid og 3D-modellering. Særlig 3D-modellering er et interessant tema vi har hatt et ønske om å bli bedre i. I faget "Mekatronikk" lærte vi om elektriske kretser og programmering, og ved planlegging av bacheloroppgave var dette et tema vi ønsket å fordype oss i.

1.2 Bakgrunn

Ideen til oppgaven oppsto sommeren 2023 på jernbanestrekningen inne på Majavatn stasjon. På arbeidsplanen sto prosjektet svillbytte. Strekningen hvor svillene skulle byttes var på omtrent 900 meter. Svillene byttes med en gravemaskin med påmonterte skinnehjul og et skjær med en klo som kan plukke ut gamle sviller og montere en og en ny sville, se figur 1. Jernbanesvillene skal på dette området plasseres med en avstand på 600 mm. Oppmåling av denne avstanden samtidig som maskinen jobber er vanskelig da den dekker til svillene som er montert med pukk. Det betyr at forarbeidet til dette prosjektet er å markere på skinnen hvor alle svillene skal plasseres. Dette gjøres med tusj, en hjemmelagd linjal og vinkel for å få merkene vinkelrette på sporet. Totalt var det omtrent 1500 sviller som skulle byttes, og tilsvarende antall streker som måtte måles og tegnes opp. Arbeidsstillingen er knestående over lengre perioder, og oppmålingen blir fort upresis. I tillegg kan ikke svillene plasseres der skinnene er sveist sammen fordi det blir igjen overskuddsmaterial under skinnen fra sveiseprosessen. Da må svillplasseringen forskyves innenfor rammene som tillates av BaneNOR(BN); ± 10 mm (BaneNOR 2024b). Utregningen av forskyvningen kan bli komplisert når det er mange sveiser innenfor et kort område.



Figur 1: Dronefoto fra svillebytte

I dagens marked finnes det ikke verktøy som kan gjøre arbeidsoppgaven enklere. Utvikling av spesialverktøy til dette arbeidet vil lette arbeidsbelastningen og gi et bedre resultat, samt effektivisere jobben.

1.3 Problemstilling

Konstruere og bygge en tralle som er godkjent i henhold til jernbanetilsynets regelverk. Trallen skal kunne måle nøyaktig avstand, markere presise striper på begge sider av begge jernbaneskinner og regne ut svilleavstand innenfor BN sitt regelverk. Trallen skal bygges innfor en en tildelt økonomisk ramme på 40 000 kr.

1.4 Resultatmål

Målet er å designe og bygge en måletralle som markerer plasseringen for jernbanesviller når de skal byttes for vedlikehold. Måletrallen skal kunne skyves manuelt av en operatør og kan ikke veie mer enn 25 kg, da det skal være mulig for en person å løfte den av og på skinnene (Arbeidstilsynet 2024). Plasseringen må være 600 mm mellom hver markering med en toleranse på ± 10 mm (BaneNOR 2024b). Trallen skal bygges etter standarden NS-EN 13977: 2011 (Standard-Norge 2024). Her er det viktig å bemerke seg at i kurver skal avstanden justeres etter den ytterste skinnen. I tillegg kan ikke markeringene ligge der jernbaneskinne har blitt sveiset sammen.

1.5 Effektmål

Målet er å sitte igjen med bedre kunnskap om programmering, mekatroniske systemer, prosjektarbeid, design og produktutvikling etter prosjektet. Bedriften, Totalprosjekt, ønsker en forbedret løsning til oppmerkingen for å effektivisere sviltebytte og minske belastning for anleggsarbeiderne. En godt utarbeidet løsning vil spare arbeidstimer og gjøre oppmålingen mer presist enn dagens metode. Det vil sikre at arbeidet utføres innenfor kravene spesifisert av BN.

1.6 Begrensninger

Bacheloroppgaven skal gjennomføres over en kort periode som gir begrensninger for hvor omfattende prosjektet kan være. Arbeidstiden vil være fra januar til midten av mai, hvor det i løpet av de tre første månedene skal gjennomføres et 10-studiepoengsfag med gruppeprosjekt og eksamen. Resterende tid vil bli brukt på bacheloroppgaven. Konstruksjon og bygging av et slikt produkt vil vanligvis ikke skje over en så kort periode i et utviklingsfirma, og det kan derfor bli vanskelig å komme helt i mål med et feilfritt produkt. Produksjonsmetodene av 3D-modellerte deler begrenses til 3D-printing i plastmaterialer og eventuelt bestilling av CNC-maskinerte deler. Programmeringen av systemet kan bli svært utfordrende da vi har begrenset kunnskap om programmering i Python.

Regelverket tilknyttet jernbaneredskaper er en av de største begrensningene for oppgaven og vil kreve mye arbeid. Regelverket som omhandler denne typen tralle er BaneNOR Teknisk regelverk og jernbanetilsynets krav for godkjenning.

1.7 Oppbygning av oppgaven

Opgaven har en oppbygning med tradisjonell innledning, men en mer utradisjonell oppdeling av hoveddelen. Først gjennomgås regelverket tilknyttet vedlikehold av jernbane og skinnegående materiell. Deretter vises det eksempler på traller som brukes på jernbane, og så et kort kapittel om de økonomiske rammene til prosjektet. I kapittel 5 kommer design og utvikling og i kapittel 6 er begynnelsen på konstruksjonen av rammen med egen diskusjonsdel. Deretter kommer kapitlene om hjuloppheng og bremsesystem, markeringsmekanisme og til slutt elektronikk. Alle kapitlene om konstruksjon av deler til trallen er bygd opp som små rapporter med egne diskusjoner. Til slutt kommer et kapittel med en oppsummerende diskusjon og en konklusjon for prosjektet med viderearbeid.

2 Regelverk

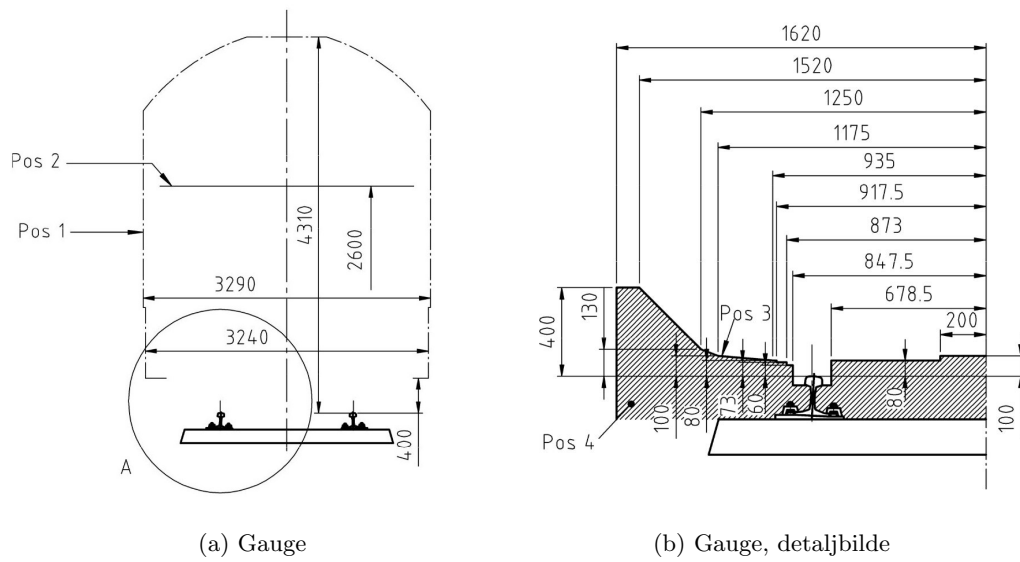
2.1 Overbygning

Overbygning er et begrep som beskriver jernbaneskinner, sviller, befestning, ballast, sporveksler osv. Regelverket på det offentlige jernbanenettet i Norge er bestemt av BN og kalles teknisk regelverk. Den inneholder prosedyrer og tegninger på alt som har med bruk, bygging og vedlikehold av jernbanen. Produktet som utvikles i dette prosjektet skal brukes under utskifting av jernbanesviller, og det må dermed tas hensyn til tilhørende prosedyrer og krav. Et viktig krav ved svillebytte er senteravstanden mellom sviller. Svillavstanden bestemmes av overbygningsklassen på den bestemte strekningen, og som oftest betyr det en avstand på 600 mm. Det tillates et maksimalt avvik på ± 10 mm (BaneNOR 2024b). Det stilles også krav til at svillene skal plasseres vinkelrett på skinnene. Konsekvensene av arbeid som er utført utenfor toleransene kan være at svillene må flyttes og legges på nytt over en større strekning.

2.2 Skinnegående materiell

Godkjenning av skinnegående materiell gjøres av Statens jernbanetilsyn. Alt materiell som brukes på jernbanesporet som regnes som rullende materiell, skal være godkjent av jernbanetilsynet før bruk. En tralle som dyttes og betjenes med menneskekraft, og ikke har egen fremdrift, skal utvikles i tråd med standarden NS-EN 13977: 2011, "Sikkerhetskrav for flyttbare maskiner og traller for konstruksjon og vedlikehold" (Standard-Norge 2024). Standarden beskriver spesifikke krav som farge, bremses og størrelsesbegrensninger.

Omrisset som skinnegående materiell må passe innenfor kalles gauge, se figur 2. Vogner og andre kjøretøy som ikke er konstruert innenfor gauge for den bestemte jernbanestrekningen kan ødelegge infrastrukturen rundt sporet. Baliser som ligger montert på svillene, planoverganger og akseltellere er komponenter som er montert nærme skinnene og kan skades. En tralle som designes etter NS-EN 13977 kan ha deler som kommer utenfor gauge'en, men det må beskrives i brukermanualen hvordan trallen skal brukes for å unngå skader og slitasje.



Figur 2: Gauge, utklipp fra NS-EN 13977 (Standard-Norge 2024, side 24) (mål oppgitt i millimeter)

3 Traller til jernbane

Traller som settes på jernbanesporet er ofte brukt til vedlikeholdsoppgaver på og ved sporet. Trallerne skyves med håndkraft og er lette slik at de kan løftes av og på sporet uten bruk av maskiner. Bruksområdet kan være transport av verktøy og utstyr som vist i figur 3. Det lages også traller som er påmontert spesialverktøy eller er laget som en enhet som kan måle sporgeometri eller omgivelser som vist i figur 4.



Figur 3: Eksempel på tralle for transport av utstyr (AS Fredrikstad 2024)



Figur 4: Eksempel på tralle med påmonterte måleinstrumenter (Norgeodesi 2024)

4 Økonomiske rammer

I begynnelsen av prosjektperioden ble det satt opp et estimat på kostnadene til prosjektet. Utklipp fra regnearket vises i tabell 1. Den estimerte maksimale kostnaden ble 39100 kr og det ble dermed tildelt 40000 kr til prosjektet fra Totalprosjekt. De endelige kostnadene til prototypen er lagt ved i vedlegg F.

Tabell 1: Estimerte kostnader

Prisoverslag av komponenter til tralle		
Komponent	Anslag minumumspris	Anslag maximumspris
Aluminiumsprofil	1000	3000
Raspberry pi	1000	2000
Encoders til testing	400	700
Encoders til bruk	2000	10000
Div elektrisk komponenter	300	700
Digital skjerm	1800	4000
Kobling til aluminiumsprofiler	500	2000
Boks for elektronikk	200	400
Skruer og div	200	400
Sprayboks	700	1400
Div ekstra til sprayboks	100	300
Plater for spraying	300	5000
Håndtak for håndtering	300	3000
Hjul og hjuloppheng	600	2100
4x servomotor	520	3200
Oppheng motor og sprayflaske	100	400
Powerbank	300	500
Sum	10320	39100

5 Design og utvikling

Design og utvikling innebærer tegning av deler og komponenter på PC. I dette prosjektet er det valgt å bruke CAD-programmet (computer-aided design) Autodesk Fusion, videre kalt Fusion. Programmet er brukt til design av alle deler og sammenstilling av delene. Dette er valgt fordi programmet er tilgjengelig for studenter ved NTNU, og har en veldig god samarbeidsfunksjon som passer bra når det er flere som jobber sammen med å designe trallen. Designet av trallen er kun en prototype, og dermed blir delene designet for 3D-printing i plast. 3D-printing er perfekt for prototyping ettersom det er billig og går relativt raskt. Det tillater også design av mer komplekse deler som ikke ville vært gunstig å maskinere. Det vil i hovedsak bli brukt PLA (polylactic acid) som filament i 3D-printingen. Materialet egner seg godt til å teste deler på en prototype, men er sprøtt, lite holdbart over tid og tåler varme dårlig. Hvis trallen bygges som et ferdig produkt må det enten benyttes andre materialer i printingen, eller maskinering av deler i metall. Designemetoden til prosjektet likner et ”bottom up” design. Dette kommer av at mange av delene er kjøpt inn av forskjellige produsenter. Dermed er det smådelene som bestemmer mye av hvordan designet ender opp.

6 Ramme

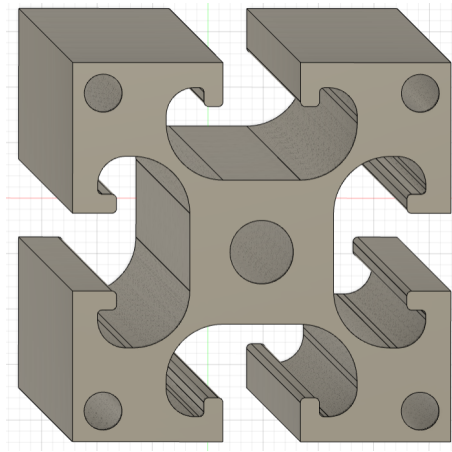
6.1 Design og konstruksjon

Rammen er en sentral del i konstruksjonen av trallen og har innvirkning på styrke og vekt. Materialvalget sto mellom stål og aluminium. Det ble konkludert med å bruke aluminiumsprofiler for å unngå høy vekt, og flere muligheter for montering og endring av design underveis. Bruk av stål gir høy vekt og større materialstyrke, men det er ikke behov for stor styrke, og vekten kan bli for stor til at en person kan løfte trallen alene. Bruk av aluminiumsrør og firkantør er en mulighet, men det gir utfordringer og begrensninger ved montering. Slikt design vil også kreve mer komplekse koblingsmetoder som gjør prototypingen mer komplisert, og det blir vanskeligere å endre designet under bygging. Ved å bygge rammen med aluminiumsprofiler kan den skrues sammen med tilpassede koblingsstykker, se figur 5.



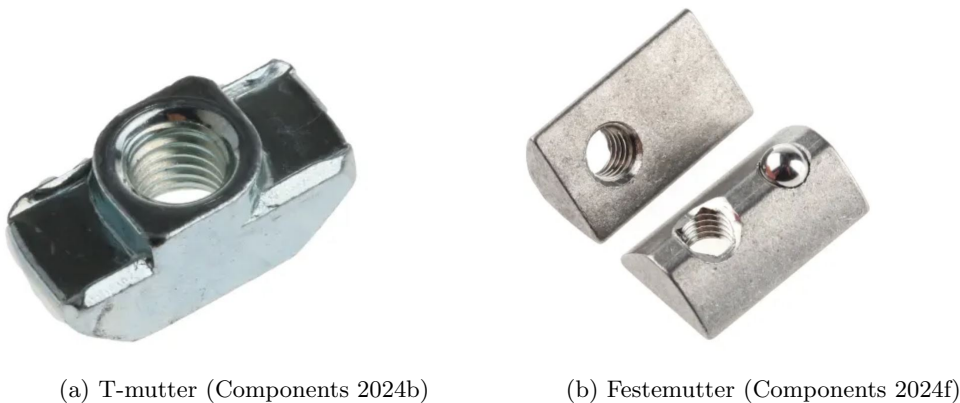
Figur 5: Vinkelbraketter

Det er tatt utgangspunkt i aluminiumsprofiler og koblingsdeler som kan kjøpes hos ”RS Components”, for at delene skal komme fra samme produsent og være kompatible med hverandre. Det forenkler også bestillingsprosessen. Profilene finnes i flere størrelser, men valget falt på 40 · 40 mm tverrsnitt med et 8 mm spor. Den aktuelle profilen er tegnet i Fusion i figur 6.



Figur 6: Utklipp fra Fusion: 3D-modell av aluminiumsprofil

Komponentene festes til profilene ved å bruke t-muttere, vist i figur 7a, som kan dyttes inn i sporet på profilen og virker som et anker for bolter. På figur 7b er det en festemutter med et fjærbelastet kulelager. Kulelageret gjør at mutteren sitter fast slik at det blir enklere å feste boltene.



Figur 7: Festemuttere

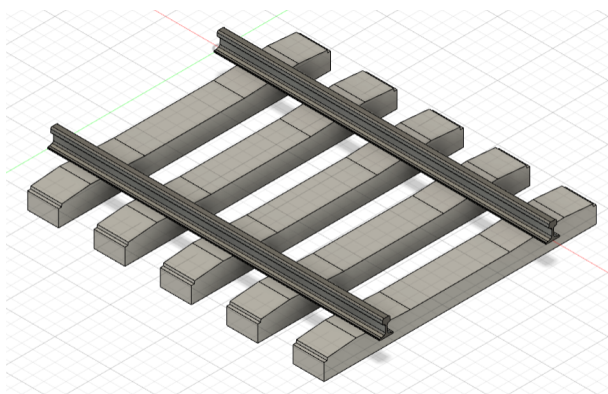
Ved bruk av aluminiumsprofiler blir det mange muligheter for rammedesign. Eksempler på forslagene er;

- En rektangulær ramme som består av fire profiler der to ligger på toppen av de to andre profilene.
- En rektangulær ramme som består av fire profiler som ligger i samme plan, og brakettene i figur 5 kan anvendes.
- Ramme som består av tre profiler med kun en tverrgående og to langsgående profiler som ligger parallelt med skinnene.

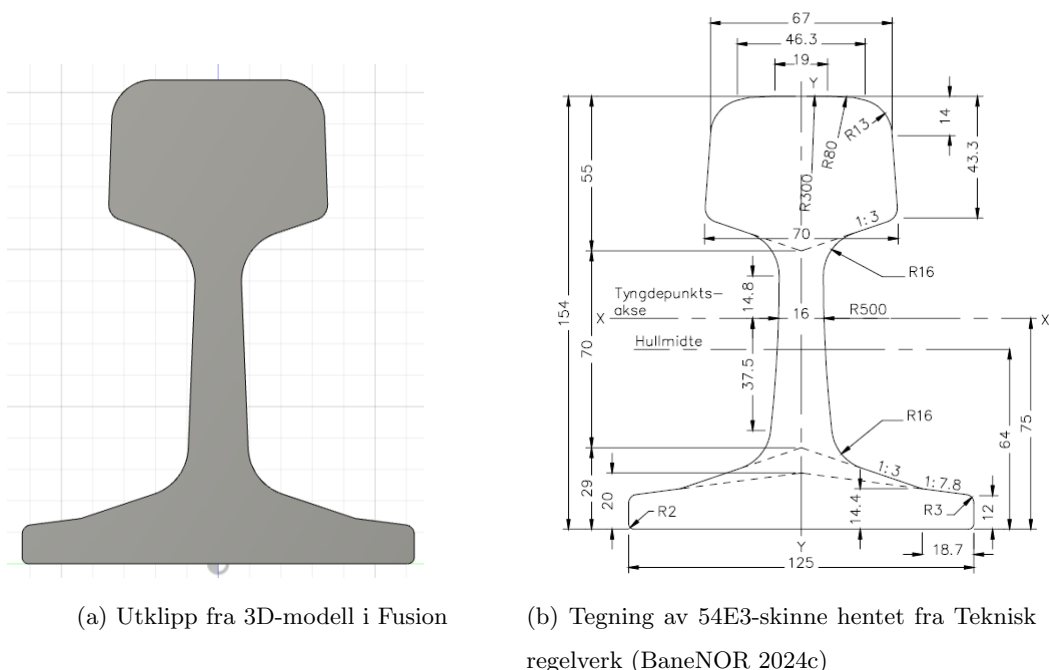
Utfordringer knyttet til rammedesign er hvordan hjuloppheget, markeringsløsningen, elektronikk,

håndtak og strammeløsningen mellom skinnene skal festes. Stivheten til hele konstruksjonen og muligheten til å plassere trallen på bakken når den løftes av sporet og transporteres er også viktige punkter.

For å gjøre arbeidet med konstruksjon av trallen slik at den passer på sporet enklere, ble det konstruert en 3D-modell av et spor med skinner og sviller, se figur 8. Skinnene som ble tegnet i figur 9a tilsvarende en 54E3-skinne, som vist i figur 9b. Den øverste delen av skinnen kalles skinnhodet, den nederste delen kalles skinnefoten og den midterste delen som holder det sammen kalles skinnelivet.



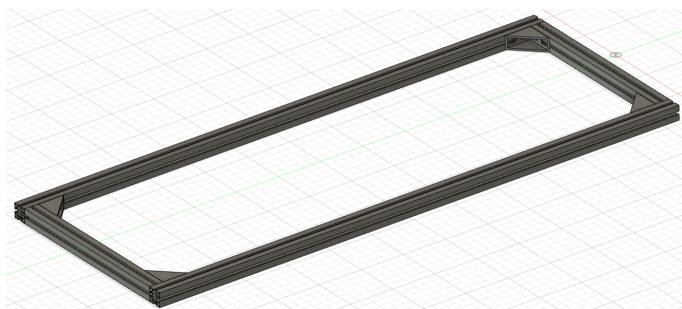
Figur 8: Utklipp fra Fusion: 3D-modell av skinnegang med sviller



Figur 9: Skinneprofil

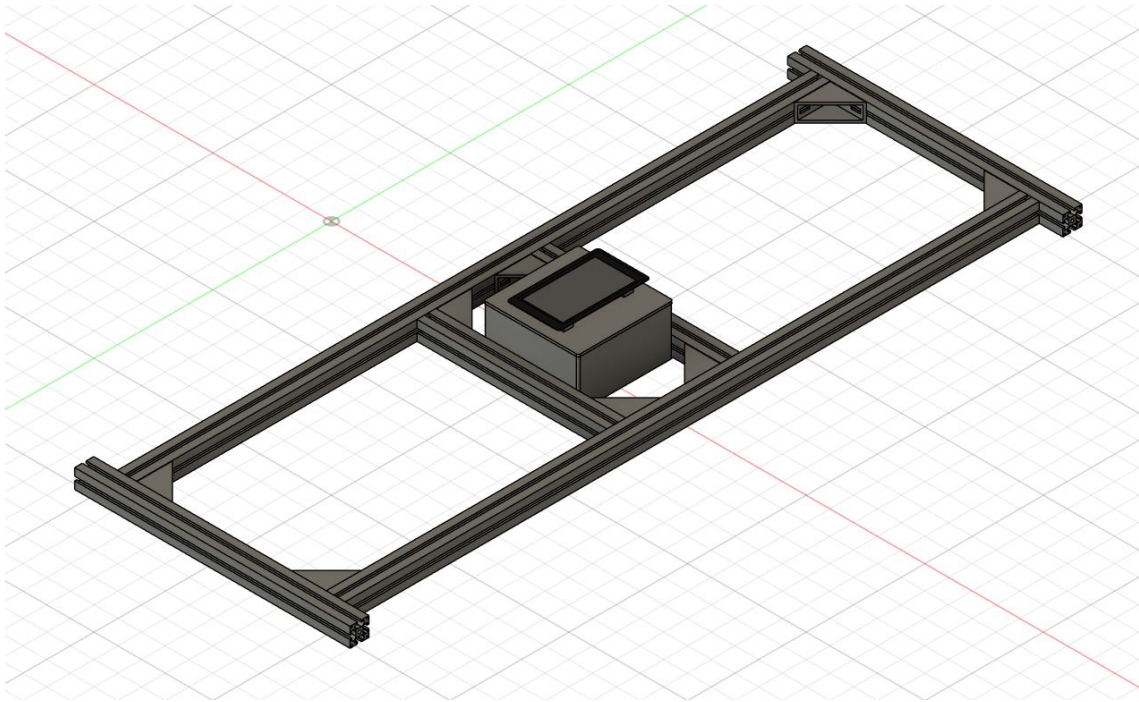
For å oppnå tilstrekkelig stivhet i konstruksjonen ble det vurdert å konstruere en trekantformet ramme. Den vil bli svært stiv, men kan gi utfordringer med monteringen av delene som finnes til sammenstilling av aluminiumsprofiler. En firkantramme er enklere å tegne og gjør at det kan

brukes vinkelrette hjørnekoblinger. I tillegg gjør det kapping av profilene til riktig lengde enklere. I figur 10 er første rammeforslag tegnet etter forslaget med en ramme der profilene ligger i samme plan med brakettene fra figur 5a. Bredden på hele rammen tegnes slik at midtpunktet på profilene som går parallelt med skinnene plasseres midt over skinnhodet. Den nominelle sporvidden er på 1435 mm og bredden på skinnhodet er 67 mm. Det gir en bredde på 1502 mm senter til senter på aluminiumsprofilene. Rammen lages 500 mm lang for at den skal kunne få plass i en varebil for transport til arbeidsstedet og gi plass til markeringssystemet som skal festes i de korte profilene på høyre og venstre side.



Figur 10: Utklipp fra Fusion: 3D-modell av ramme

Etter design av hjuloppheng ble det nødvendig med festepunkter for brakettene til hjulene som støtter trallen sideveis. Dette festepunktet var opprinnelig tenkt å være i hjørnene, men kom da i konflikt med hjørnebrakettene. Rammen ble tegnet på nytt som vist i figur 11. De tverrgående profilene ble trukket litt nærmere hverandre for å gi plass til brakettene til hjuloppheng. Det ga en positiv konsekvens ved at avstanden mellom hjulene som støtter sideveis, fikk større avstand mellom hverandre. Det øker stabiliteten som forhindrer rotasjonsbevegelser. I tillegg ble det tegnet inn to aluminiumsprofiler på midten av trallen som fungerte som monteringspunkt til elektronikkboksen og håndtaket. Det ble lagt til fire ekstra hjørnebraketter for å feste profilene og øke rammestivheten.



Figur 11: Utklipp fra Fusion: Oppdatert rammedesign

Byggingen av rammen gikk ut på å kutte aluminiumsprofilene til riktig lengde og feste de sammen med hjørnebrakettene. På dette tidspunktet ble det brukt koblingsplater for å feste de midterste aluminiumsprofilene til rammen (se figur 12). Det ble montert endebeskyttelse i plast på aluminiumsprofilene, slik at skarpe kuttflater ikke blir en risiko.



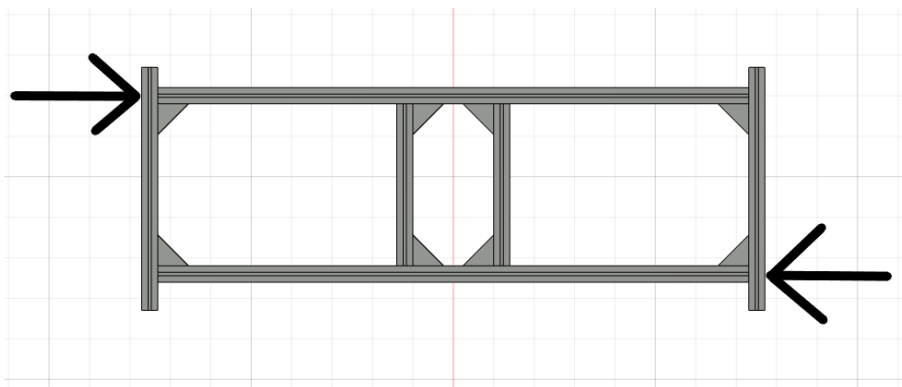
Figur 12: Foto fra bygging

6.2 Diskusjon av ramme

Ved å prøve og bøye på aluminiumsprofilene ble det klart at materialet til rammen var sterkt nok. Rammen ble støttet nedenfra helt ute ved endene og det var derfor tvil om tverrsnittet var godt

nok dimensjonert, før byggingen ble igangsatt. Hele trallen skulle ikke veie mer enn 25 kg og mye av vekten kom fra selve rammen. Det var få komponenter som skulle monteres på midten av trallen og de var lette i forhold til vekten av hele systemet. De tyngste delene som skulle monteres på rammen var hjuloppheng og markeringsmekanismen, og den vekten ble sentrert over hjulene på hver side. Det ble dermed lite moment som virket på aluminiumsprofilene under bruk.

Sett ovenfra var det viktig at rammen var stiv nok i hjørnene, for å motvirke kreftene som kan oppstå fra hjuloppheng vist i figur 13. Målingene og markeringen ville bli unøyaktige om rammen kunne endre form til en rombe og ikke et rektangel med rette vinkler. Under testingen på sporet ble det observert at rammen var tilstrekkelig stiv i hjørnene.



Figur 13: Utklipp fra Fusion: Krefter på ramme

7 Hjuloppheng og bremsesystem

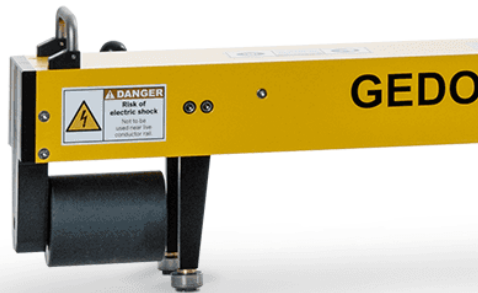
7.1 Valg av hjuloppheng

Hjuloppheget til en tralle skal oppfylle flere krav som avhenger av bruksområdet. Uavhengig av bruk må hjuloppheget ha et system som styrer trallen på sporet slik at den ikke sporer av. Bruk av skinnehjul med flens som vist i figur 14, er et enkelt design som egner seg til bruk på traller som skal benyttes til transport og forflytning. Hjulet har en flens som ligger mot innsiden av skinnehodet og forhindrer avsporing. I motsetning til skinnehjulene som brukes på tog har ikke dette hjulet en konisk rullebane. Konsekvensen av en flat rullebane er at hjulet styrer dårlig i en kurve og ønsker å gå rett frem. Sporvidden på jernbanen kan variere og derfor må slike hjul monteres med litt mindre avstand enn den oppgitte sporvidden, slik at trallen ikke kiler seg fast. I sum fører dette til at trallen ikke vil holde en helt rett bane og kan vandre mellom høyre og venstre side.



Figur 14: Skinnehjul med flens (Munday and son 2024)

Et alternativ til bruk av skinnehjul er et vanlig hjul som ligger på toppen av skinnehodet, med sideveis støtte fra mindre hjul som treffer innsiden av skinnehodet (se figur 15, utklipp fra figur 4). Hjulene som treffer innsiden av skinnehodet kan være fastmontert med en toleranse slik at sporvidden kan variere. Hjulene kan monteres med en fjærbelastet mekanisme på den ene siden som presser hjulene mot skinnehodet.



Figur 15: Skinneshjul med sideveis støtte (Norgeodesi 2024)

Hjulopphenget må føre trallen helt parallelt med sporet slik at det ikke oppstår vridninger som kan gi unøyaktige målinger og markeringer. Løsningen med skinneshjul som har flens er enkel og robust, men må designes slik at flensene til skinneshjulene har litt avstand til skinnehodet. Små variasjoner i sporvidden er årsaken til at det må være smalere mellomrom mellom flensene enn den eksakte sporvidden. Dette medfører at trallen vil få rom til å rotere noen grader, som igjen vil gi unøyaktige målinger og upresis markering.

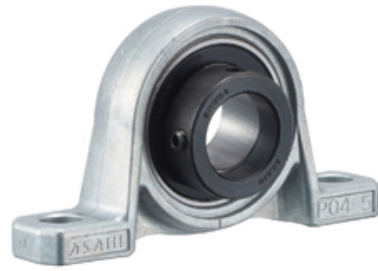
Den andre løsningen for design av hjuloppheng er et eget hjul som ruller på toppen av skinnehodet og et annet hjul som ruller mot innsiden av skinnehodet på hver side av trallen. Ved å fjærbelaste hjulet som ruller på innsiden, vil hjulene på begge sider presses mot innsiden av skinnehodet. Trallen vil dermed spore helt parallelt med skinnene og motstå rotasjon rundt seg selv. Det ble vurdert at denne løsningen var mest egnet til prosjektet på grunn av økt presisjon.

7.2 Design av hjuloppheng

Hjulene som bærer vekten av trallen, lagrene som akslingen monteres i, og enkoderne som presenteres i elektronikkdelen må støtte samme akseldiameter. Etter leting hos flere leverandører ble det avklart at en 10 mm akseldiameter ville være hensiktsmessig for å finne komponenter som har samme diameter. Figur 16a viser hjulet som skal bære konstruksjonen og måle avstanden på skinnene. Dette målehjulet egner seg godt for måling på metall og andre overflater (Baumer 2024) og er laget av Hytrel TPE-E som er en type termoplast. Figur 16b viser fotlageret som monteres på hver side av hjulet for å ta opp kreftene fra hjulet og akslingen.



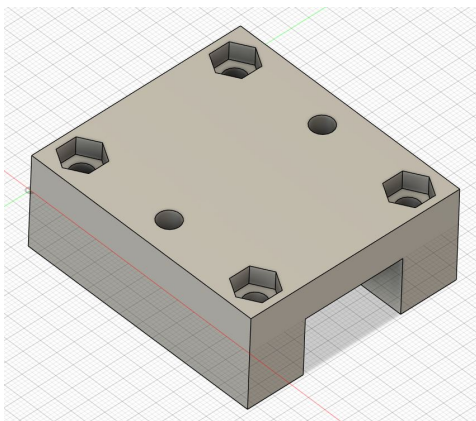
(a) Baumer 241.10D målehjul (Components 2024a)



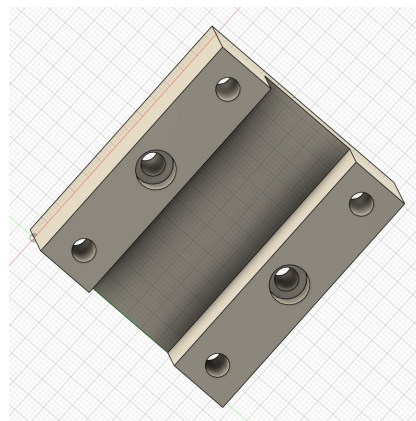
(b) UP000 fotlager for 10 mm aksling (Misumi 2024)

Figur 16: Hjul og fotlager

Senteravstanden mellom skruehullene i fotlageret er 53 mm. Det resulterer i at lagrene må festes i en brakett for at de skal kunne monteres på aluminiumsprofilene. Braketten må ha hull til feste av lagrene og til boltene som fester braketten. Et utkast ble modellert i Fusion og er vist i figur 17. På toppen er det laget nedsenkede hull som har rom til M6 bolter med sekskanthode. Lagrene festes med disse skruene og muttere på undersiden. På bunnen er det nedsenkede hull til M6 bolter med rundt skruehode som fester braketten i aluminiumsprofilen med en t-mutter. Sporet på undersiden av braketten sørger for god klaring til hjulet.



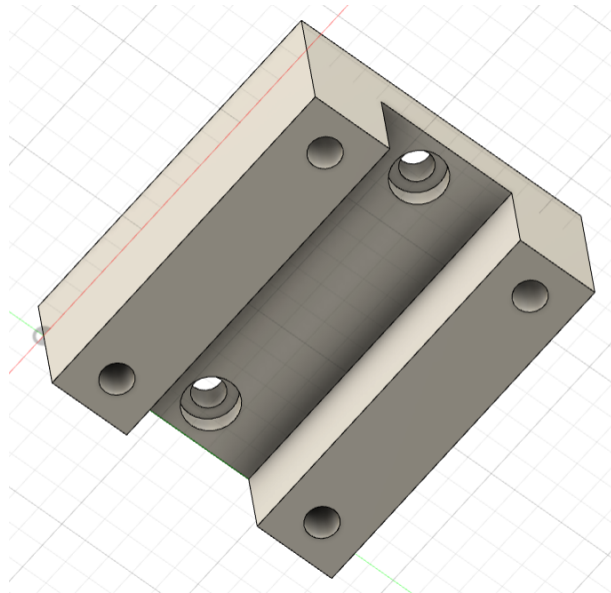
(a) Topp



(b) Bunn

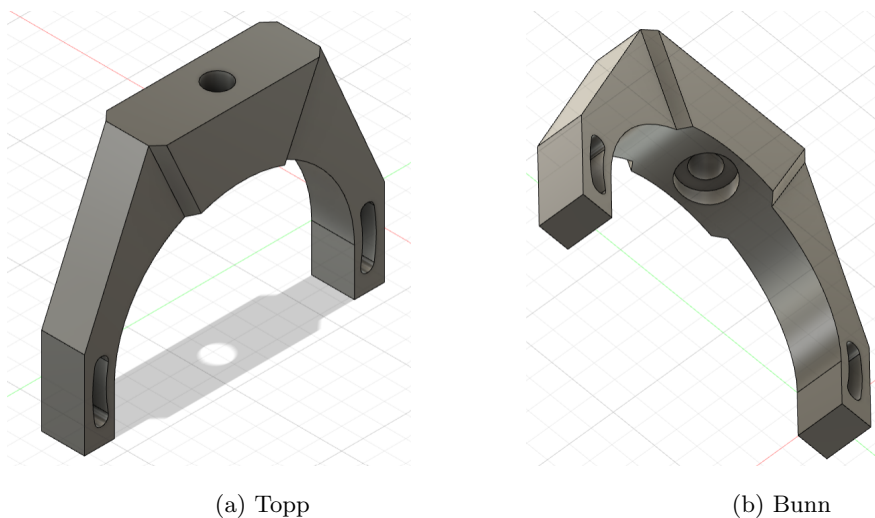
Figur 17: Utklipp fra Fusion: Brakett til hjullager

Designet av braketten til hjullagrene ble oppdatert etter at det siste rammedesignet ble ferdigstilt. Hullene til monteringsboltene ble flyttet på grunn av endringen av hvilken aluminiumsprofil den festes til. Det gjeldende designet er i figur 18.



Figur 18: Utklipp fra Fusion: Oppdatert design av brakett til hjullager

På begge sider av trallen skal det monteres enkodere på hjulakslingen. Den krever en egen brakett med monteringshull til bolter. Braketten til enkoderne er tegnet i Fusion i figur 19.

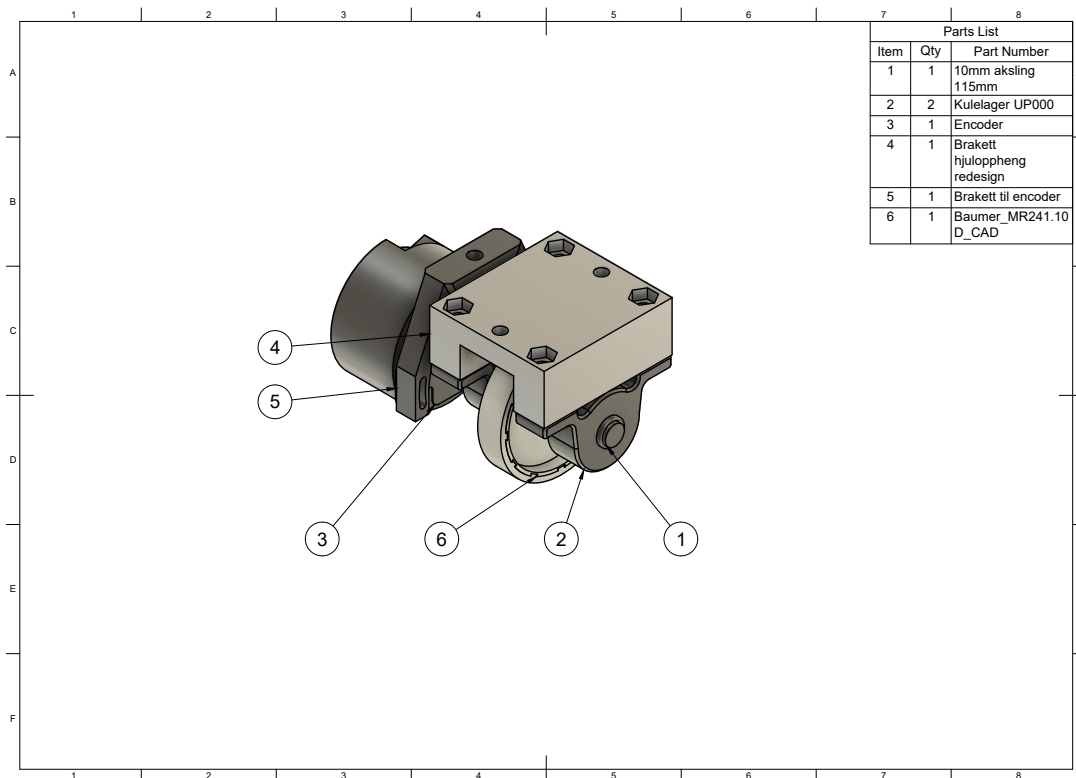


(a) Topp

(b) Bunn

Figur 19: Utklipp fra Fusion: Brakett til enkoder

Maskintegning av sammensettingen av hjuloppheget med enkoder vises i figur 20. Braketten til enkoderen har som formål å forhindre at enkoderen spinner rundt. I tillegg skal denne braketten overføre minst mulig krefter fra trallen til enkoderen, derfor er den uavhengig av braketten til hjullagrene. Dette vil gjøre at braketten koblet til kulelagerene vil ta mesteparten av kreftene fra trallen.



Figur 20: Tegning av hjuloppheng med enkoder

7.3 Strammemekanisme

To løsninger til mekanisme for stramming av hjulene som ruller mot innsiden av skinnhodet ble utarbeidet. Den ene løsningen var å bruke en lineær skinnføring med en gassfjær. Delene som trengs til denne løsningen er en glideskinne (figur 21a) og en glideblokk (fig 21b) som kan kjøpes i flere butikker som selger komponenter til industrielle systemer.

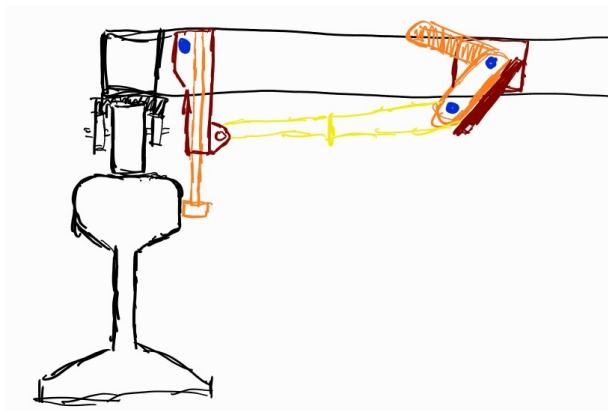


(a) Glideskinne til lineær skinnføring (Rollco 2024b) (b) Glideblokk til lineær skinnføring (Rollco 2024a)

Figur 21: Lineær skinnføring

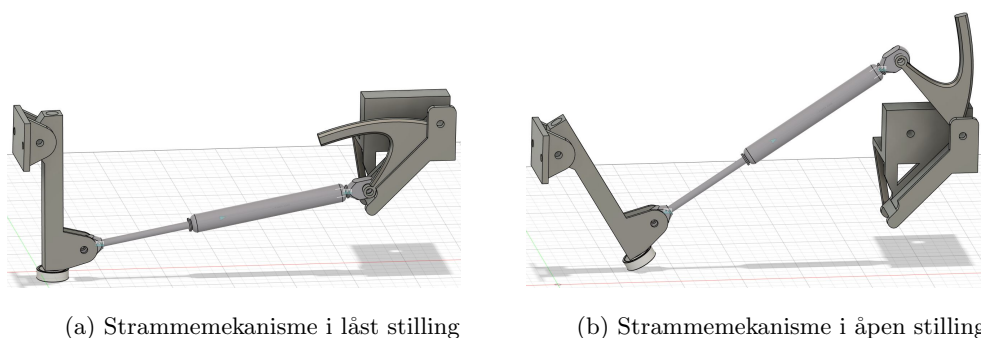
Den andre løsningen består av to ledd som er koblet til en gassfjær. Det ene leddet har en arm

med et kulelager i bunnen som ruller mot skinnhodet, se figur 22. Det oransje håndtaket til høyre i figur 22 festes med en bolt midt på aluminiumsprofilen, tegnet inn i blått. Gassfjæren er tegnet i gult og er koblet sammen med håndtaket og den vertikale armen. Ved å vippe håndtaket opp og til høyre vil gassfjæren først komprimeres og dermed slippes helt ut og kulelageret trekkes bort fra skinnhodet. Trallen kan dermed løftes av sporet uten trykket på kulelagrene. Mekanismen låses når håndtaket presses til venstre og ned, uten bruk av en annen mekanisme enn kraften fra gassfjæren.



Figur 22: Håndtegning av strammemekanisme

Strammemekanismen er tegnet og satt sammen i Fusion, se figur 23. Mekanismen er designet rundt en gassfjær med en kraft på 200 N. Gassfjæra har en slaglengde på 100 mm og en lengde på 236,3 mm fra senter til senter i monteringshullene. Når trallen skal settes på sporet må mekanismen stå i åpen stilling som i figur 23b, og deretter settes den i låst stilling som i figur 23a. På den andre siden av trallen lages det en fastmontert brakett som holder fast et kulelager i en fast posisjon.



(a) Strammemekanisme i låst stilling

(b) Strammemekanisme i åpen stilling

Figur 23: Utklipp fra Fusion: Strammemekanisme

I figur 24 er strammemekanismen montert på rammen. Kulelageret som ruller mot skinnen er montert med en 10 mm gjengestang med låsemutter i begge ender. Figur 25 viser braketten som tar opp kreftene fra kulelageret som er montert på motsatt side av strammemekanismen.



Figur 24: Foto fra testing av strammemekanisme



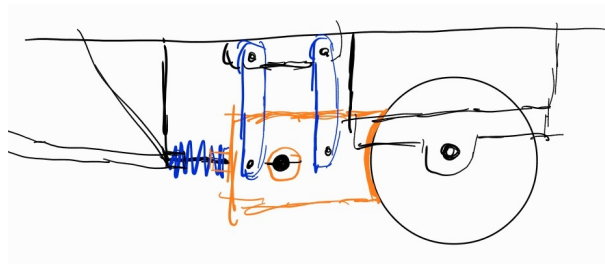
Figur 25: Foto fra testing av strammemekanisme

7.4 Bremsesystem

Bremsen er designet som en ”dødmannsbremse”, med betydningen at den skal bremse trallen automatisk om operatøren slipper håndtaket. Dette er et krav i standarden NS-EN 13977. Mer spesifikt er kravet at trallen må stoppe ved helning på 40‰ i 6 km/h på en lengde under 10 m (Standard-Norge 2024, 5.4 Brake and immobilisation system). Dette gjelder i tørt vær, og ved våte skinner må bremselengden være under 14 m.

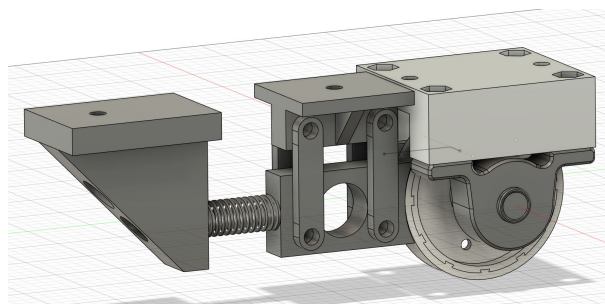
Bremsene monteres på begge hjulene som ikke har enkoder for å unngå at hjulene med enkoder begynner å gli på skinnene under bremsing og forstyrrer målingen. Bremsene er fjærbelastet og presser en bremsekloss på hjulbanen kontinuerlig når bremsehendelen ikke er trykket inn. Se figur 26, hvor bremseklossen er skissert i oransje farge og pendelarmene som holder fast bremseklossen er skissert i blått. Fjæren, skissert i blått, festes mellom en brakett og bremseklossen, og pendelarmene festes i en egen brakett. Bremsesystemet festes i aluminiumsprofilen med to separate braketter

for at det skal være enkelt å justere hvor mye fjæren trykkes sammen. En bremsekabel koblet mellom bremsehendelen, gjennom en kabelstrømpe og videre til bremseklossen trekker i klossen og skrur av bremsen. Bremsehendelen som skal tas i bruk kan være en vanlig mekanisk sykkelbrems. Fjærstivheten til fjæra som trykker inn bremseklossen er ikke valgt. Det bør testes i praksis, slik at fjæra er kraftig nok til å bremse trallen samtidig som bremsehendelen er lett å holde inne.



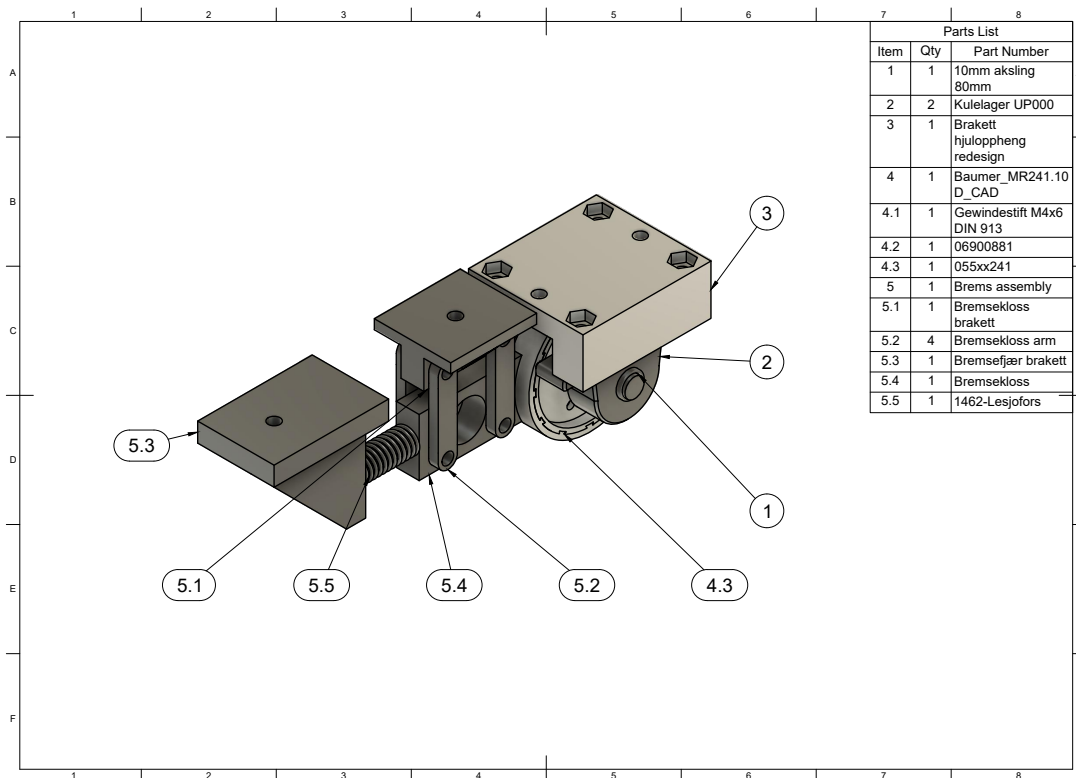
Figur 26: Håndtegning av bremsemekanisme

Sammensatt modell av hjuloppheng med lager, aksling, hjul og bremsesystem vist i figur 27. Brakettene til bremsesystemet festes til aluminiumsprofilene med M6 bolter og festemuttere, på samme måte som brakettene til hjullagrene. Det er laget nedsenkinger til skruehodene slik at de ikke kolliderer med andre deler. Alle delene lages med 3D-printer i plast og monteres sammen med M6 bolter.



Figur 27: Utklipp fra Fusion: Sammensatt modell av hjul med hjullager og bremsesystem

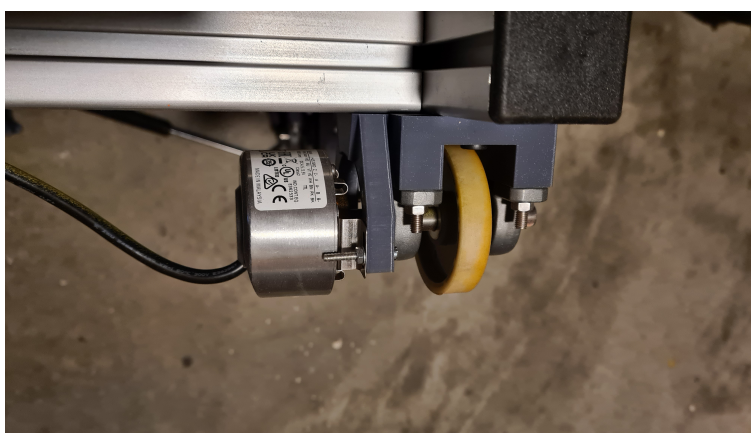
Maskintegning av hjuloppheng med bremsesystem er vist i figur 28.



Figur 28: Tegning av hjuloppheng med brems

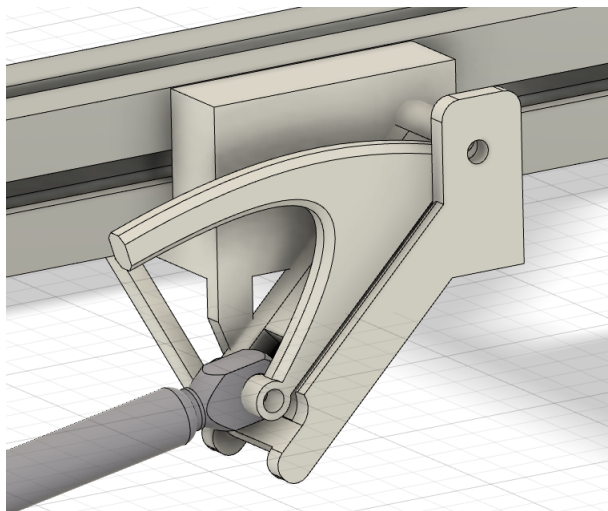
7.5 Diskusjon av hjuloppheng og brems

Hjulopphenget fungerte svært godt når det ble satt på skinnene. Trallen går helt parallelt med skinnene når strammemekanismen låses. Det ble observert at motstanden fra hjulopphenget og festemekanismen bremses vognen mye. Det meste av friksjonen kommer fra lagrene som inneholder tykt smørefett. På grunn av den høye friksjonen kan det vurderes om bremsene er nødvendige, men motstanden i lagrene kan endre seg over tid, og derfor er det fornuftig å beholde bremsene.



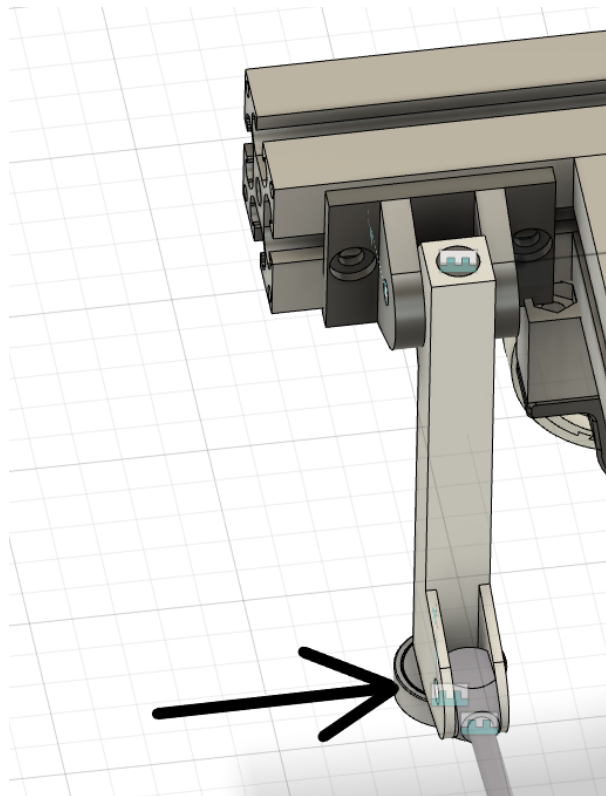
Figur 29: Fysisk hjuloppheng med enkoder

Gassfjærene har en kraft på 200 N hver for at de skal kunne dytte trallen på plass slik at den kjører parallelt med sporet. Ved å låse den ene strammemekanismen klarte gassfjæren å dytte hele trallen på plass. Det er positivt for stabiliteten til trallen, men gir utfordringer i innfestningspunktene. Brakettene som holder strammemekanismen på plass er 3D-printet i materialet PLA og er for sprøtt til å brukes over tid og med stor belastning. Det gjeldende designet i figur 30 holdt akkurat til å få gjennomført tester.



Figur 30: Utklipp fra Fusion: Brakett til gassfjær

Jernbaneskinnene det ble testet på var rustne og hadde en svært høy overflateruhet, og dette førte til at det ble en del friksjon mot kulelageret på strammemekanismen. Dette påførte krefter i retninger som ikke var godt dimensjonerte, vist i figur 31. På et spor med større trafikk vil overflaten være glattere og dette bli et mindre problem, men det kan likevel være lurt å forsterke strammemekanismen mot krefter i denne retningen.



Figur 31: Utklipp fra Fusion: Krefter på sideveis støtte

Lagrene og hjulene har settskruer som komponentene festes i akslingen med. På enkoderne er det en tredelt klemhylse hvor kun den ene delen klemmes mot akslingen. Når skruen på klemhylsen strammes nok til at enkoderen roterer med akslingen, blir ikke senterlinjene til enkoderen og akslingen parallelle. Dette fører til at enkoderen beveger seg opp og ned når hjulet roterer. Bevegelsen er liten nok til at det ikke vil skape store problemer siden hjulet vil rotere med lav hastighet under drift. I tillegg er metallbrakettene som var montert på enkoderne laget av tynt metall som gjør at det ikke oppstår store krefter i festepunktet.

Bremsesystemet virket som forventet, men ble kun testet med en trykkfjær med ukjent fjærstivhet. Det gjenstår fortsatt arbeid for å teste bremsene etter standarden til jernbanetilsynet. Det må bygges et jernbanespor med helling på 40 ‰ og gjøres tester på tørre og våte skinner. Viser det seg at bremsene ikke virker tilstrekkelig kan trykkfjæren byttes i en kraftigere, eller bremseklossen lages i et materiale som gir høyere friksjon mot hjulene.

Ved montering av hjulopphenget ble det behov for bolter i mange forskjellige lengder. Hvis designet skal oppdateres bør det konstrueres slik at bolter med samme lengde kan brukes på mange steder. Det vil gjøre både innkjøp og montering enklere.

Trallen har ikke et godt system for å sette den på bakken ved siden av sporet og for transport i bil. Hvis den settes ned på bakken med denne oppbygningen vil den hvile på brakettene som gir sideveis støtte. Brakettene er i utgangspunktet ikke dimensjonert for å støtte vekten av hele

trallen hvilende på toppen, og spesielt under transport i bil bør denne løsningen utbedres. Forslag for utbedring er å forsterke brakettene for sidevies støtte, lage egne solide føtter som kan vippes ned under rammen, eller lage en brakett som gjør at trallen kan plasseres på den ene langsiden. Det må også tas hensyn til markeringsmekanismen som vil bli lavere enn hjulopphenget.

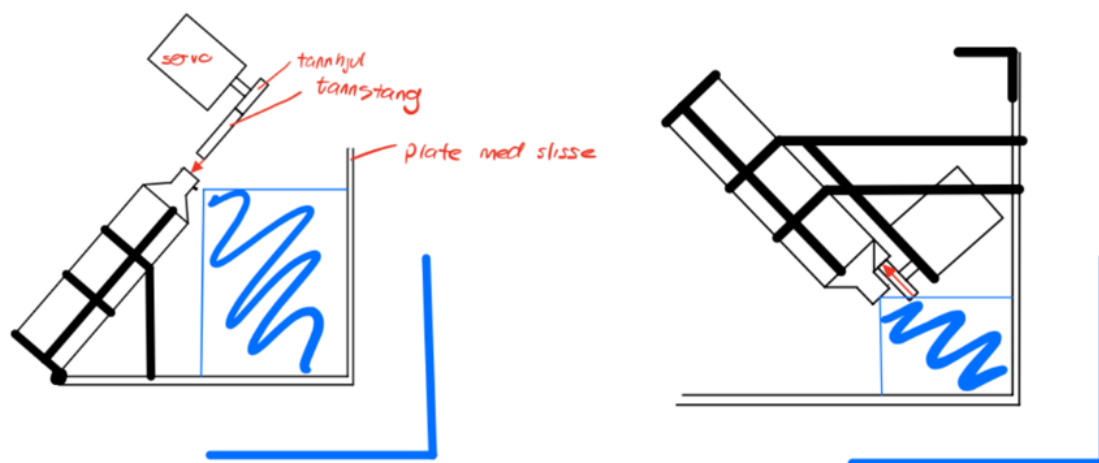
8 Markeringsmekanisme

Markeringmekanismen har som formål å spraye en malingsstripe på jernbaneskinnen når en knapp trykkes ned. Den skal holde sprayboksen fast til rammen og trykke ned sprayboksdysen med en servomotor. Boksen skal stå på en 45° vinkel rettet mot jernbaneskinnen og skal ikke ligge for nærme svillene slik at de ikke skrapes opp under bruk. Malingen skal treffe en slisse som er festet til mekanismen og som står nærme skinnen for å oppnå en tynn og tydelig malingsstripe som gjør det enkelt for banemontøren å feste svillen på riktig sted. Det skal være en sprayboks på hver side av begge skinnene.

8.1 Designprosessen

Det første designutkastet var basert på en standard sprayboksstørrelse med dyse som får malingen til å spraye ut mot siden. Bildet av skissen til venstre i figur 32 viser at servomotoren med tannhjul skal festes over sprayboksen og presse en tannstang ned mot sprayboksdysen. Spraymalingen treffer slissen på 45° og lager en tynn stripe på skinnene, illustrert med blå farge på figur 32.

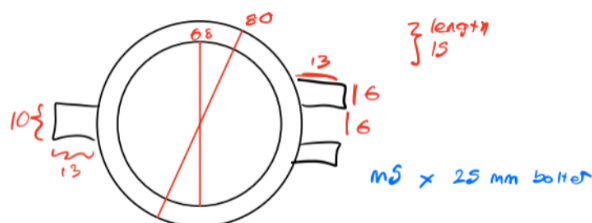
Det andre designutkastet er designet rundt Würth-sprayboksen som har en dyse som sprayer maling rett ut fra toppen. På grunn av dyseplasseringen og retningen til malingen blir det enklere å plassere sprayboksen, vist til høyre i figur 32. På det nye designet blir mellomledet som består av tannhjulet og tannstanga fjernet, da servomotoren har nok kraft til å trykke ned dysen selv, uten hjelp av en mer komplisert mekanisme. Effekten av markeringmekanismen blir fortsatt nøyaktig den samme som i det første utkastet, der spraymalinga treffer slissa for å lage en tynn stripe.



Figur 32: Tidlige skisser av markeringmekanismen

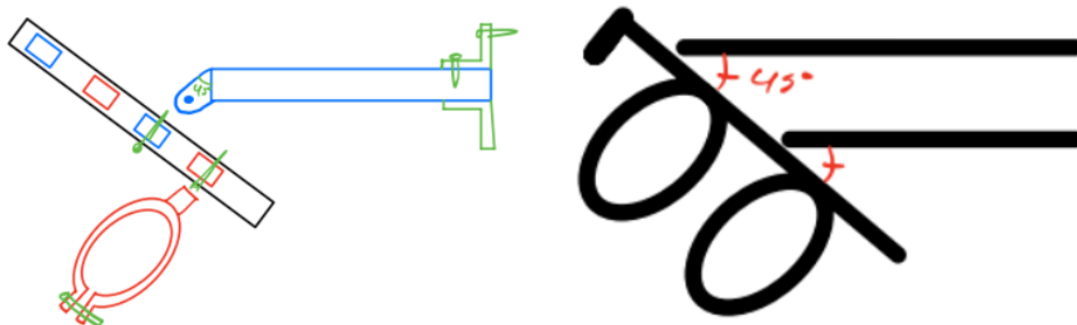
Figur 33 viser en skisse av hvordan holderen til sprayboksen vil se ut. Det skal være to holdere på hver sprayboks for at den skal sitte sikkert og ikke bevege seg under bruk. Den innerste radiusen er 3 mm større i diameter enn selve sprayboksen slik at den lett kan bli tatt ut og inn og bli erstattet

når den går tom for maling. Den strammes med en bolt som går gjennom de to utstikkerene på høyre side på figur 33 og festes til resten av sprayboksholderen i et spor med en bolt gjennom utstikkeren på venstre side. PLA-plastikken er fleksibel nok til at dette fungerer uten at den knekker.



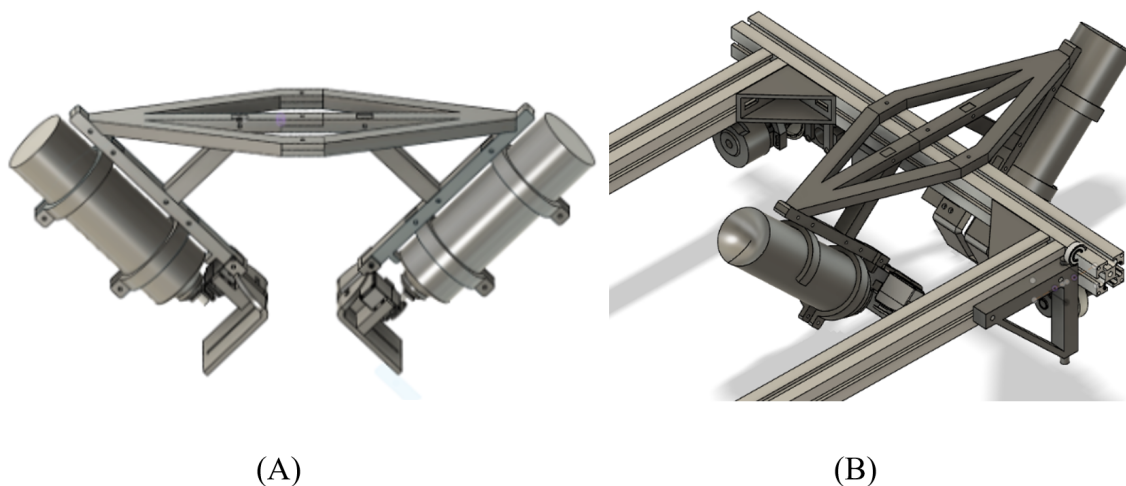
Figur 33: Skisse av sprayboksholder

Sprayboksen skal stå på en 45° vinkel mot skinnen slik at spraymalingen treffer langs hele høyden til skinnen. Sprayboksholderen skal festes til resten av ramma med to korte bjelker som kompenserer for den 45° vinkelen, markert med blått på figur 34. De skal festes til sprayboksholderen på samme måte som delen på figur 34, markert med rødt på figur 34, i et spor med en gjennomgående bolt. I utgangspunktet var planen å feste bjelkene til rammen med bolter og vinkelbraketter, men dette ble forandret til kun bolter på toppen av holderen.



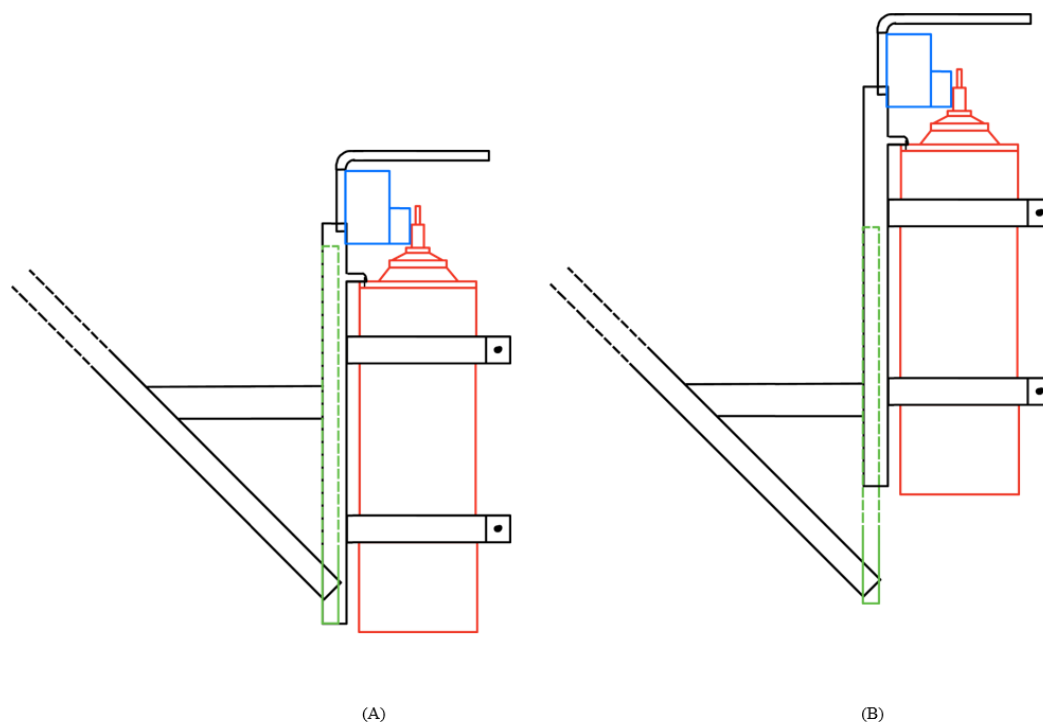
Figur 34: Tidlige skisser av sammenstilling av markeringmekanisme

Figur 35 A viser sammenstillingen av markeringmekanismen. Modellen inneholder sprayboksholderen, feste til rammen, servomotoren og slissen. Alle disse komponentene bygger opp sprayboksholderen. Sprayboksholderen skal holde sprayboksen stabil i riktig posisjon når mekanismen brukes. Rammefestet gir stabilitet og gjør at mekanismen er festet til rammen (Figur 35 B). Servomotoren skal trykke ned dysen på sprayboksen lenge nok til at markeringen blir jevn på skinnene. Slissen leder malingen gjennom for å oppnå en presis markering.



Figur 35: 3D-modell av sammenstillingen til hele markeringmekanismen

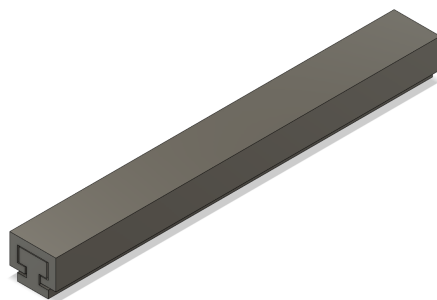
Jernbaneskinnene finnes i forskjellige profiler, og høyden varierer. Derfor er det nødvendig med en justerbar sprayboksholder som kan flytte sprayboksen og slissen nærmere skinnen når nødvendig. Den trenger ikke å ha justerbar vinkel, så lenge den har justerbar lengde, da 45° kommer til å fungere fint for markering på alle skintetyper.



Figur 36: Skisse av glideskinne på markeringmekanismen

Figur 36 viser en skisse med oversikt over hvordan den vil se ut når den er festet på markeringmekanismen. I posisjon A vil den være trukket tilbake og ligger så langt unna skinnen som mulig. I posisjon B vil den være på vei inn mot skinnen og kan justeres etter hvilken lengde som passer

best. Figur 37 viser et utkast av hvordan glideskinnen kan se ut for seg selv. Glideskinnen vil festes i den ønskede posisjonen med bolter.



Figur 37: 3D-modell av glideskinne assembly

8.2 Bygging og testing

Markeringsmekanismen består for det meste av 3D-printede deler, derfor består den største delen av byggeprosessen av å 3D-printe alle delene. De største delene måtte deles opp i to for å få plass i printerene og så settes sammen etterpå med bolter og muttere. Dette kan forbedres med å bruke en større printer. Det ble benyttet 3D-printere på Prototypelaboratoriet til instituttet for maskinteknikk og produksjon, samt personlige 3D-printere. Under byggeprosessen ble alle delene satt sammen med M4 bolter og muttere med 3D-modellen som guide.

Metode for testing av slisse:

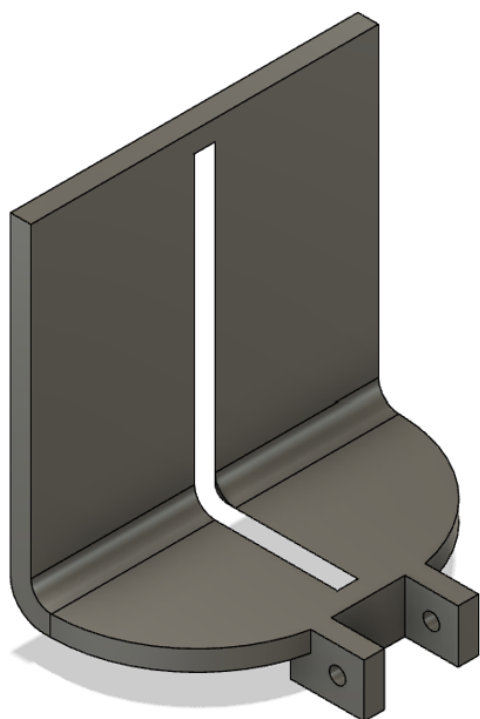
1. Bruk sprayboksen til å spraye maling gjennom slissen rettet mot skinnen. Hold slissen med en 45°graders vinkel. Test forskjellige avstander og ta bilder underveis og ta notat av hva som gir best resultat på skinnene.
2. Gjenta dette med både Rust-oleum-spraymaling og Würth-spraymaling.
3. Gjenta dette med alle slissetykkelser og design. Tykkelsene på slissene som testes er 1 mm, 2 mm, 5 mm og 7 mm.

Den første slissetesten ble gjennomført da det var vindstille ute. Her ble begge de to forskjellige spraymalingene testet ut på det første slisseutkastet. Det kom tydelig frem under testingen at Würth-spraymalingen hadde mye tykkere konsistens og lenger rekkevidde enn rust-oleum-spraymalingen. Dette ble et problem da Würth-malingen tettet slissen og den ikke kunne spraye mer enn 10 korte spray før den tettet slissen så mye at markeringene ble unøyaktige. Det kom også frem at den ideelle lengden mellom slissen og sprayboksdysen var på ca. 20 cm og at slissen måtte være posisjonert så nære skinnene som mulig for å oppnå smalest mulig markering. Dette er viktig for å holde markeringene innenfor kriteriene som sier at svillene, og derfor også markeringene skal

ligge 600 mm \pm 10 mm. Dermed ble avstanden mellom dysen og slissen på det originale designet justert fra 2.6 cm til 20 cm. Det er viktig å merke at slissetykkelsen som ble testet ut i den første testen var på 5mm. Derfor var det nødvendig å ha så stor avstand mellom slissen og dysen for å oppnå presise markeringer.

Den andre slissetesten ble gjennomført under byggingen av trallen. Her ble forskjellige slissetykkelser og avstander mellom sprayboksdyse, slissen og skinnene testet på nytt (figur 38 B). Under testingen kom det frem at blant 7 mm, 5 mm, 3 mm, 2 mm og 1 mm, er 2 mm den som gir smalest og tydeligst markering. Denne gangen ble testen holdt med slisser som blir tynnere jo nærmere åpningen man kommer (figur 38 A). Dette fungerte veldig bra for å samle opp malingen som ikke kom gjennom, og slissen ble ikke tettet like raskt som ved tidligere testing.

På grunn av den store avstanden på 20 cm mellom slissen og dysen ble malingen forskjøvet av vinden og markeringene ble unøyaktige. Derfor var det mer gunstig å ha en kort avstand på 1-3 cm mellom dysen og slissen. En vindskjerm mellom denne lengden må også vurderes for å hindre vinden i å ta tak i spraymalingen.



(A)



(B)

Figur 38: Slisse 3D-modell og testing

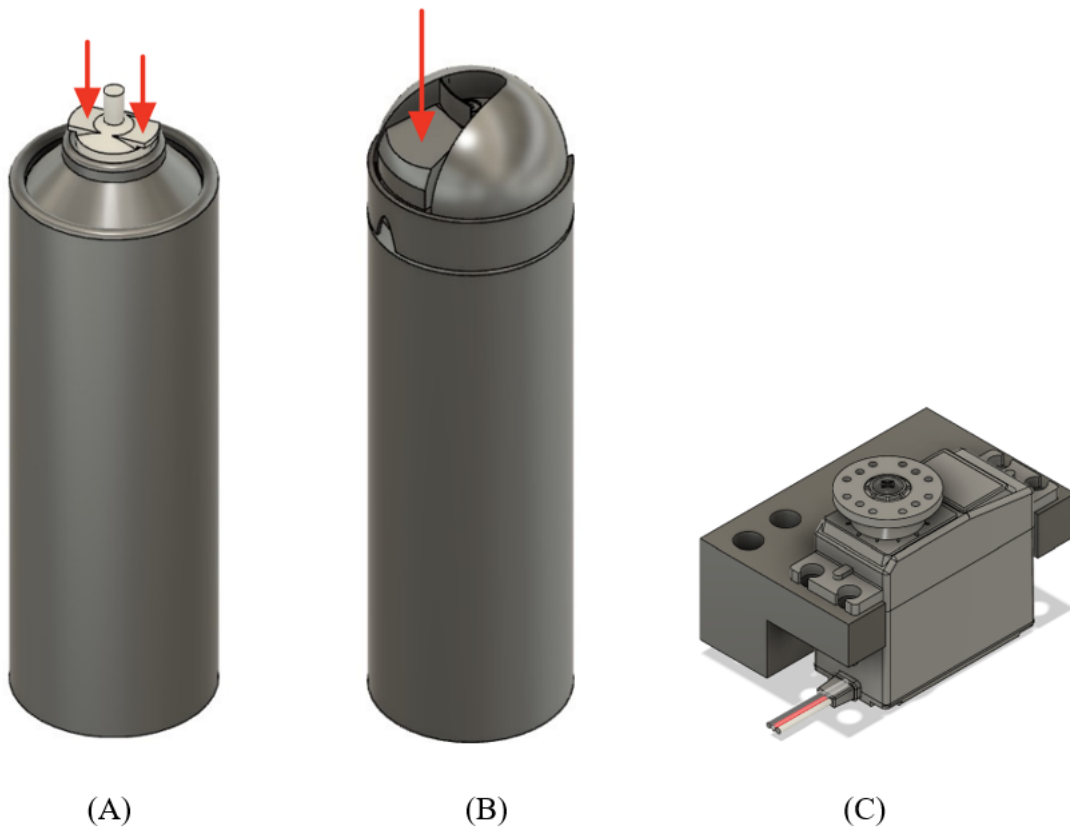
Metode for testing av spraymekanisme:

1. Fest sprayboksen og servomotoren til markeringsmekanismen som på figur 35 A slik at ser-

vomotoren står riktig plassert til å trykke ned dysen.

2. Koble servomotoren opp til en Raspberry pi og kjør en kode som får servomotoren til å gå rundt.
3. Ta notat på hvor mange grader servomotoren må rotere for å treffe dysen og hvor lenge den må holde dysen nede for at den skal spraye nok maling til å markere.

Trykkemekanismen består av en servomotor plassert så nære sprayboksdyse at den kan trykke den ned for å spraye maling. Det første designet er basert på Würth-sprayboksen (figur 39 B) som kun har ett punkt som skal trykkes ned. Rust-oleum-sprayboksen har to punkter som må trykkes ned samtidig for å kunne spraye maling. Dette er et problem siden det kun er en servomotor på hver dyse. Servomotoren treffer bare på ett av punktene som må trykkes ned for å få markeringen til å fungere.



Figur 39: A: Rust-Oleum spraymaling, B: Würth Spraymaling, C: Servomotor

8.3 Resultater

Det kom frem under den første testen at Würth-spraymalingen var for tykk til å brukes til markering fordi den tettet slissen etter kort tid. Derfor måtte den tynnere rust-oleum-spraymalingen brukes til markeringen. Den første testen viste også at sprayboksdyse måtte være 20 cm unna slissen for

å få resultater innenfor kravene. Den andre testen viste at avstanden måtte være mellom 1-3 cm for å forhindre at vinden tok tak i malingen og blåste den bortover skinnene.



Figur 40: Spraytest 1



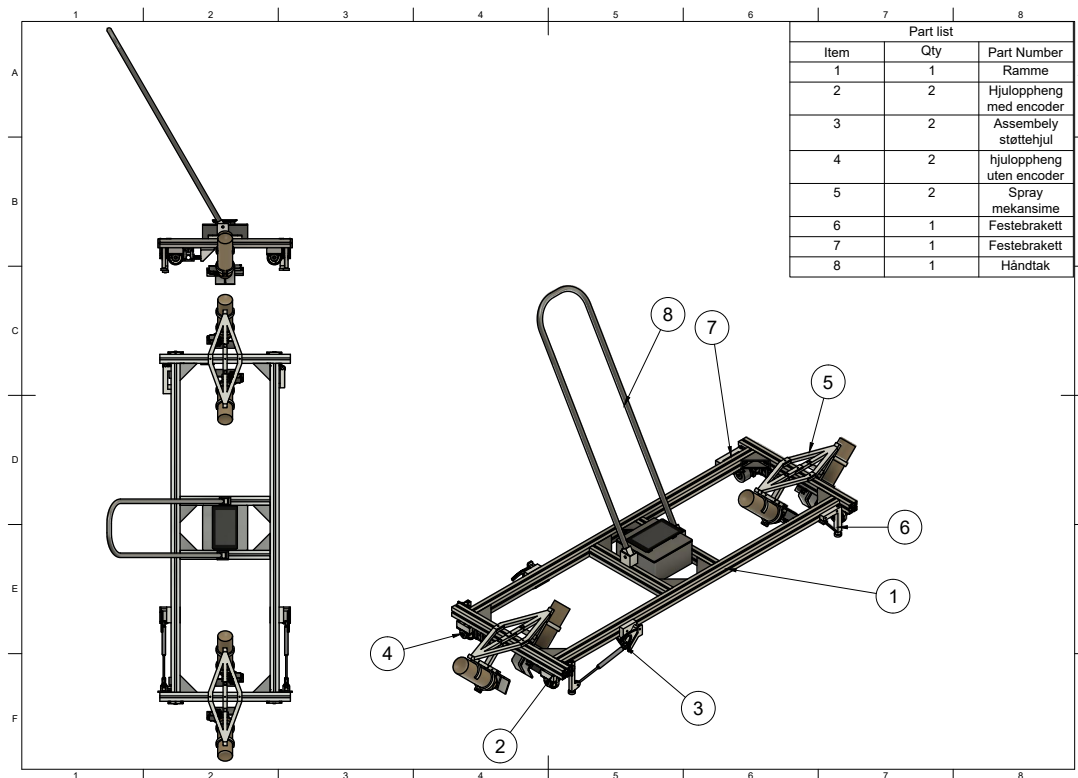
Figur 41: Spraytest 2

Under testen fungerte servomotoren fint, men den var ikke plassert nærme nok til at den nådde dysen. Derfor må designet justeres slik at servomotoren står nærmere sprayboksdysen uten å komme i veien for malingsprøyen. Det viser seg også at det er vanskelig å trykke ned begge sidene på rust-oleum-sprayboksen med kun en servomotor, da kun ett av de punktene som må trykkes ned blir truffet (figur 39).

Resultater av den sammensatte konstruksjonen er vist i figur 42 og 43. I tillegg til markeringsmekanismen ble det tegnet et styre og en boks til elektronikken for å vise hvordan den ferdige trallen vil se ut.



Figur 42: Render av 3D-modellen



Figur 43: Maskintegning av måletrallen

8.4 Diskusjon av markeringsmekanisme

En av utfordringene under denne delen av prosjektet var å finne riktig spraymaling med riktig konsistens, og sprayboks for nøyaktig markering. Würth-spraymalingen var for tykk og tett slissen som førte til unøyaktige markeringer. Rust-oleum-spraymalingen hadde tynnere konsistens og tettet ikke slissen like fort. Den har to punkter som måtte trykkes ned, og dette ga utfordringer når designet inneholder kun en servomotor for hver dyse. Derfor treffer servomotoren bare ett av de to punktene som må trykkes ned.

En annen utfordring var avstanden mellom slissen, sprayboksdysen og skinnene. Testingen viste at avstanden mellom skinnene og slissen måtte være så liten som mulig og at den originale avstanden mellom dysen og slissen på 20 cm ikke fungerte på grunn av vindkast som sprer malingen. Den justerte avstanden på 1-3 cm fungerte bedre. I videredesignet bør resultatene om avstanden fra den første testen bli sett bort fra når det kommer til avstanden mellom slissen og dysen slik at vinden ikke blir et problem. Den andre testen viste at 2 mm var den beste tykkelsen for slissen og at for å forebygge oppbygging av maling, måtte plasten bli tynnere og tynnere inn mot slissen. I tillegg måtte slissen ligge så nære skinnene som mulig.

Selve trykkemekanisme fungerte dårlig, da avstanden mellom servomotoren og sprayboksdysen var for lang og armen til servomotoren ikke traff på riktig sted på dysen. Derfor er det nødvendig

å justere motorplasseringen i designet slik at den kommer nærmere uten å komme i veien for malingsprayen.

Den største forbedringen som kan gjøres er å få markeringmekanismen til å bli justerbar når det kommer til avstand fra skinnene. Da kan hele mekanismen justeres for å passe ulike jernbaneprofiler og markeringen kan tilpasses til å bli mest mulig nøyaktig for hvert enkelt område. Glideskinnen ble aldri helt ferdigstilt og er derfor ikke del av det ferdige produktet, men kan jobbes videre med i ettertid. Selve konstruksjonsstyrken kan også bli mye bedre hvis deler av plastikk blir byttet ut med maskinerte aluminiumsdeler eller et sterkere filament til 3D-pinteren. De eksisterende delene kan eventuelt styrkes og bli mer slitesterke med hjelp av stålplater. Mekanismen skal brukes i lang tid og plastikkbitene må byttes mye oftere enn stålbitene. Vindskjerming kan settes inn mellom dysen og slissen for å unngå at vinden tar tak i malingen. Dette er viktig for å unngå unøyaktige markeringer.

For å gjøre monteringsprosessen enklere bør M4 boltene i markeringmekanismen byttes ut med M6 bolter hvor det benyttes færre forskjellige lengder. Dette kan justeres basert på hvilke bolter som blir brukt i andre deler av trallen slik at byggeprosessen blir forbedret.

De beste resultatene fra testingen av spraymaling og slisse ble såvidt godkjent av veilederen vår i Totalprosjekt. Malingsstripen bør ha tydelige og rette kanter og ha nok maling til at den ikke slites bort under arbeidet med svilleytting. Det ble derfor diskutert alternative metoder til markeringmekanisme. Ett forslag er å bruke en sprøytepipette som brukes til billakking med en dyse som gir en smal malingsstripe. For å drive sprøytepipetter kreves det derimot luftkompressor som leverer luft under trykk. Det kan løses ved å benytte en batteridrevet kompressor som monteres på trallen, eller en trykktank som fylles med luft fra en annen kompressor før jobben begynnes.

Et lignende alternativ er å bruke en "air brush". Det er en mindre utgave av en billakkingssprøyte og kan gi bedre presisjon med smale dyser. Den krever også en liknende løsning med kompressor da den krever trykkluft for å operere.

Et siste alternativ er å kopiere den manuelle metoden med tusj ved å konstruere en mekanisk arm som tegner på skinnen. utfordringer med denne løsningen er at mekanismen kan bli komplisert og tidkrevende å lage, og svilleyttingen vil komme i konflikt med armen og tusjen. Stripen vil dermed bare bli lagd i skinnelivet.

9 Elektronikk

9.1 Innledning

I denne delen av teksten skal all elektronikken til måletrallen være med, den tar også for seg måleusikkerheten og diskusjoner rundt dette. Det betyr kode og alle komponenter som trenger strøm for å fungere. Oppgaven til disse komponentene er å kunne måle avstanden som trallen kjører, finne plasseringen til sviller og drive motorer som utløser markeringsmekanismen.

9.2 Elementer i målesystemet

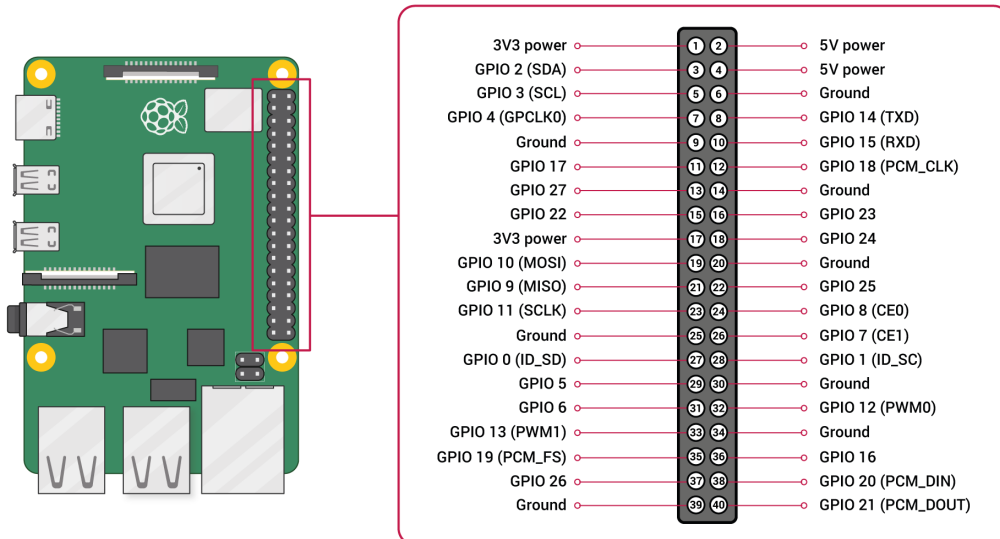
9.2.1 Raspberry Pi

Raspberry Pi (RPi) er en av de mest utbredte kretskortene for hobbyelektronikk. Den bruker Broadcom BCM2712 2.4GHz quad-core 64-bit Arm Cortex-A76 CPU og har 4GB Ram som gjør den til en svært kraftig og effektiv datamaskin til å hente og sende signaler (RaspberryPI 2024a). Kretskortet kommer med et ferdig installert operativsystem som kalles Raspberry PI OS. Programmeringsspråket som vanligvis brukes med en RPi er Python, og det kan skrives i programmet Thonny. Ved hjelp av mange forskjellige pakker i programvaren er dette kretskortet særdeles enkelt å utnytte selv for amatører.

Man bruker GPIO (general-purpose input/output) pins for å få signaler rett inn og ut av RPi'en. Som vist i figur 44 er det 40 pins med forskjellig bruk basert på hvilken pin man kobler seg til. Videre for å kunne koble til og kommunisere med RPi'en, kan man velge å koble en skjerm og tastatur direkte til kretskortet. Da vil den fungere helt likt som en PC. Man kan også koble til ved hjelp av VNC (virtual network computing) for trådløs kobling til en bærbar PC. Man kan kontrollere GPIO pins til å enten ta inn signaler eller gi ut signaler i form av kun digitale signaler. Det er også 4 PWM (pulse width modulation) porter som kan lese og gi analoge signaler hvis det skulle være nødvendig. PWM portene brukes til å sende digitale signaler i en høy frekvens slik at det kan variere mengden strøm som går gjennom porten. Dette egner seg til styring av motorer og dimming av lys ettersom det er oppgaver som ikke påvirkes mye av små raske forandringer (Wikipedia 2024).

"3V3 power" og "5V power" er portene som gir strøm til de forskjellige komponentene koblet til RPi'en og "ground" er jordingen. Videre har man også SDA og SCL porter, disse skaper I2C (Integrated Circuit) kommunikasjonen til brettet som ofte brukes til komponenter som krever mer enn ett digitalt signal. Utenom de vanlige "pins" har man også UART, (Universal Asynchronous Teceiver-Transmitter) kommunikasjon med PC, Bluetooth, SPI (Serial Peripheral Interface Bus) for kommunikasjon og serial.

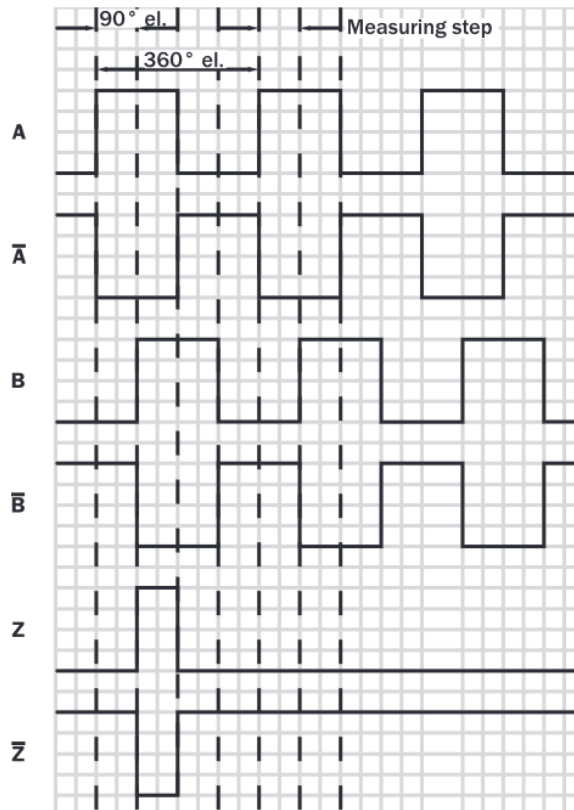
Noen begrensinger til en RPi er at den drar mer strøm enn andre modeller og krever opp til 25 W på det meste, med en strømforsyning på 5 V og 5 A. Det er også en begrensing på mengden strøm som kan dras ut av hver pin på 16 mA, og over hele brettet kan det ikke dras mer enn 50 mA til av alle pins til sammen. Det er også en sikring i brettet på 750 mA som gjelder alt inkludert 5V, 3V3, USB og koblingene (RaspberryPI 2024a).



Figur 44: GPIO pinout diagram for raspberry Pi (RaspberryPI 2024a)

9.2.2 Enkoder

Hovedoppgaven til en inkrementell enkoder er å måle nøyaktig rotasjon. Ved å legge til et målehjul med kjent omkrets på en enkoder bruker man rotasjonsmålingene til å finne en avstand dette målehjulet ruller. Målingene kommer i form av digitale signaler slik som vist i figur 45. Det er da typisk 6 forskjellige kanaler for de digitale signalene, A, B, Z, \bar{A} , \bar{B} og \bar{Z} . Et steg telles som en endring i signalet som gis ut hos A og \bar{A} eller B og \bar{B} som vist i figur 45.



Figur 45: Digitale signaler fra enkoder (SICK 2024b)

Som vist i figur 45 har Z kun ett steg for hver rotasjon, denne brukes kun for kalibrering og telling av hele runder. Det er da mulig å sammenlikne den med signalene fra A og B for å se om alle signaler er talt riktig.

Ut av A er det en mengde steg per rotasjon som varierer mellom enkoder modeller. Dette kan brukes alene til å måle rotasjon til enkoderen ved å telle antall steg, eller endringer i det digitale signalet man får. Da finner man en hastighet og avstand, men denne alene kan ikke avklare hvilken retning enkoderen spinner, derfor har man både signal A og signal B. Som vist i figur 45 er det like lang avstand mellom stegene hos A og B, men B er forskjøvet med et halvt steg i forhold til A. Ved å se på hva signalet A og B var før og etter en endring på en av dem vil dette vise hvilken retning enkoderen spinner, samt avstand og hastighet den beveger seg (PCAencoders 2024).

Det finnes også \bar{A} , \bar{B} og \bar{Z} dette er et identisk motsatt signal av A, B og Z. Slike signaler kan brukes til sammenlikning med A, B og Z for kvalitetsikring, men de gir ikke ny informasjon om målingene gjort av enkoderen (PCAencoders 2024).

Signalet man får ut av den kalles pulser og er et antall steg talt av enkoderen. For å regne videre om til avstand brukes likning 1. Denne likningen krever at man kjenner encoderen sin "pulses per revolution" (PPR) som er oppgitt i databladet til encoderen.

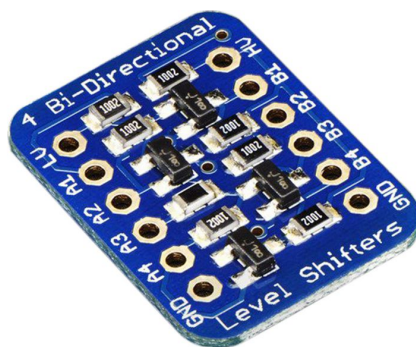
$$L = \frac{\text{Pulser} \cdot \text{Omkrets}}{\text{PPR}} \quad (1)$$

Nøyaktigheten til enkoderen er basert på antall runder per runde samt toleranse gitt av produsenten.

Det finnes mange forskjellige versjoner av kobling man kan velge for en enkoder, hvor de har forskjellige formål. Det er også forskjellige aksel diametere ettersom man har forskjellige formål. De forskjellige versjonene er hollow og solid shaft. Solid shaft har en innebygd aksling festet til enkoderen og hollow shaft er at den ikke har en innebygd aksling men et hull med stramming hvor man kan plassere sin egen aksling. Det finnes også forskjellige underkategorier som hollow og blind hollow, hvor blind hollow ikke har et hull helt gjennom enkoderen i motsetning til hollow som har hullet helt gjennom enkoderen (Components 2024c).

9.2.3 Logic level converter

Et problem med signaloverføring innad i elektronikk er at signalene må komme inn med riktig spenning. Det er mange måter å løse dette men den letteste måten er å bruke en logic level converter (llc), vist i figur 46. Dette er en innebygd krets med formålet å endre en input spenning til en ønsket output spenning. De kan både dra spenningen ned og opp basert på hva man ønsker. Det man trenger å koble opp for å få den til å fungere er signalet og en referansespenning for hva som skal ut. Den kan da dra spenningen til referansespenningen på utgangen. Oppbyggingen til en slik converter er svært enkelt med kun 2 motstander, en n-channel mosfet og en zenerdiode for å endre spenningen. Denne oppgaven kunne bli gjort ved å koble elementet direkte opp selv, men dette er mindre effektivt enn å kjøpe inn et ferdig Brett med alle disse komponentene.



Figur 46: Adafruit logic level converter (Adafruit 2024a)

9.2.4 Servomotor

Elektriske servomotorer er en type aktuator som ofte brukes i bygging av modellfly og i industrielle mekatroniske systemer. En servo består av en dc-motor, flere reduksjonsgir, et potensiometer, en mikrokontroller, et servohus og en aksling (Elprocus 2024). Motoren i servoen er liten og opererer med et høyt turtall og lavt dreiemoment. Reduksjonsgiret gjør at momentet på utgangsakslingen blir høyt og hastigheten blir lavere. I tillegg gir giringen mye motstandsmoment, slik at det kreves

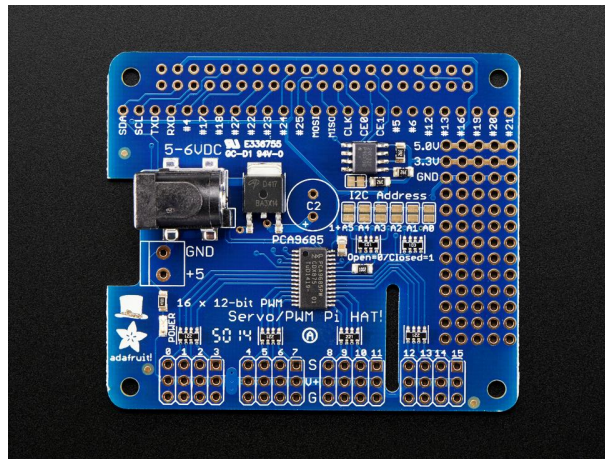
stort moment for å dreie akslingen med håndkraft for å få motoren til å rotere når den står stille. Servoen kobles til styringselektronikken med tre ledere; 5 volt, jord og signal. Den aktiveres ved å sende et PWM-signal i signallederen med en pulsvidde som resulterer i en bestemt vinkelposisjon (Elprocus 2024). PWM-signalet må ha en spenning på 3,3 volt. Mange servoer har en rotasjonsbegrensning på 180°, 270° eller 360°. Det finnes også servoer med kontinuerlig rotasjon hvor retningen styres av PWM-signalet. På servoen monteres et servohorn som kan overføre momentet fra akslingen til en kraft.



Figur 47: Dualsky AS549 servo (Elefun 2024)

9.2.5 PWM utvidelseskort

Styring av servoer kan gjøres via de dedikerte PWM-pinnene på RPi'en eller gjennom et utvidelseskort. På RPi'en er det kun 4 utganger som kan generere PWM-signaler (RaspberryPI 2024a). Utvidelseskortet som er valgt er et Adafruit 16-kanals kort (figur 48) som kan drive opptil 16 servoer samtidig (Adafruit 2024c). Siden servoer kan trekke mye strøm er det fordelaktig å bruke et utvidelseskort som har en separat strømkilde. Ved bruk av de dedikerte pinnene på RPi'en kan man risikere å overbelaste og ødelegge elektronikken. En kraftig servo kan trekke strøm på opptil 1 A ved 5 V (Adafruit 2024c). På grunn av høyt strømtrekk ved å kjøre flere servoer samtidig anbefaler produsenten å lodde på en kondensator med størrelse 100 μ F per servo for å kunne forsyne servoene med nok strøm helt i begynnelsen når motoren begynner å rotere.



Figur 48: Adafruit 16 kanals PWM HAT (Adafruit 2024b)

Utvidelseskortet monteres på toppen av RPi'en med koblinger til alle 40 pinner, men kommunikasjonen foregår kun over de to I2C pinnene. Resterende pinner kan fortsatt brukes som normalt. Kommunikasjonsprotokollen I2C gjør at mange enheter kan kommunisere over de samme to kablingene ved at hver enhet får tildelt en unik adresse. Standard adresse for dette brettet er $0x40$. Adressen kan endres ved å lodde sammen punktene A0 til A5 på kortet hvis det skal benyttes flere kort med samme adresse (Adafruit 2024c).

Programmering av brettet gjøres enklest i Python ved å installere biblioteker som inneholder grunnleggende kode som gjør at det kan skrives enkle kommandoer for å kjøre servoer.

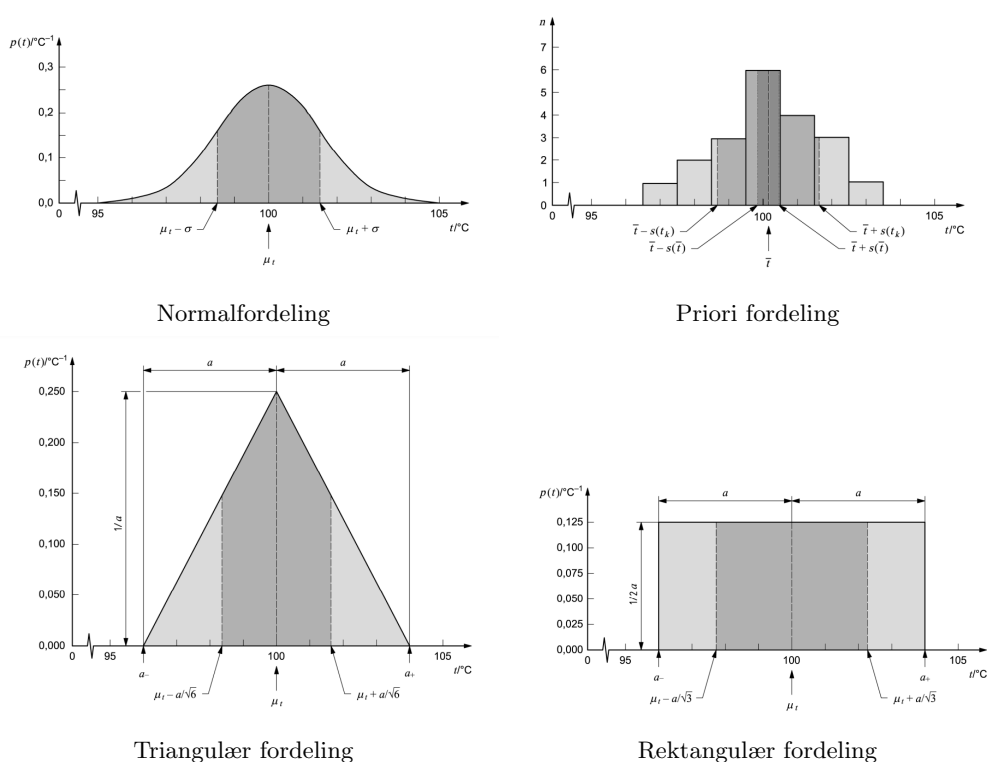
9.2.6 Touch-skjerm

Brukergrensesnitt er en viktig del av et mekatronisk system, her kan operatøren til systemet styre den ettersom hvordan den er designet. Touch-skjerm er en versjon av brukergrensesnitt som kan både vise brukeren relevante målinger og lar den kontrollere systemet. En touch-skjerm til en RPi kobles gjennom PCIe-porten og I2C portene som lar den kommunisere brettet (RaspberryPI 2024b).

Skjermen trenger strømtilkobling og en vanlig metode for dette er å koble den rett til 5V og jord på RPi. Hvis man har en ekstern strømkilde er det også mulig å koble skjermen til strøm ved å bruke en USB-port på skjermen (RaspberryPI 2024b).

9.2.7 Måleusikkerhet

I et målesystem må man kunne forsikre seg om at målingene man tar er riktig og med en godkjent toleranse for feil. Man kan regne ut en sikkerhet på målene basert på de forskjellige usikkerhetsparameterene som kommer av målingene gjort. Dette brukes til å vise frem hvor sikre en kan være på målingene som ble utført. De typiske usikkerhetene som oppstår ved lengdemålinger er temperatur, oppløsning og nøyaktighet til måleinstrumentet. Disse utforskes ved hjelp av statistiske fordelinger og legges sammen til å finne en toleranse for feil. Det brukes flere forskjellige statistiske fordelinger for å regne ut sikkerheten. Det er oftest normalfordeling, triangulær fordeling og rektangulær fordeling etter hva som passer best for den spesifikke målingen slik som vist i figur 49(JCGM 2008).



Figur 49: Forskjellige statistiske fordelinger. (JCGM 2008)

9.3 Kode

Koden er skrevet i Python ettersom det er det mest utbredte kodespråket til RPi. Dette språket har også mange forskjellige pakker som forenkler kodeoppgaven.

For at trallen skal kunne plassere svillene på riktig plass trenger man en kode som kan finne den riktige plasseringen til alle svillene med kravene som er oppgitt. Kravene satt til koden:

- 600 mm avstand ± 10 mm
- Mulighet til å plassere sveiseposisjon
- 100 mm avstand fra sveis på hver side
- Sviller på startplass og sluttsplass
- Mulighet for å tvinge plassering av sviller

En viktig del av koden er hvordan informasjonen skal hentes inn. Det er bestemt at trallen skal kjøre over en skinnestrekning to ganger. Første gang skal alle sveisene, påtvungne plasseringer, start og slutt plasseres. Når dette er notert går operatøren med trallen tilbake over det samme området. Da har en liste med svilleplasser blitt generert og den er klar til å legge merkene. Her vil alle merkene legges og når det er utført er jobben til denne trallen utført.

Koden til denne oppgaven er i vedlegg A. Den krever start- og sluttsplass som et tall, en liste med plassene hvor sveisene skal befinne seg og en liste hvor det skal være tvunget plasseringer. Koden baserer seg på at en perfekt avstand mellom svillene er 600 mm og det første den gjør er å dele opp området i mindre områder hvis det er en tvunget plassering. Hvis det er én tvunget plassering vil det automatisk plasseres en sviller der, og da har man to mindre områder rundt som det fungerer likt som om hver av dem skulle være separate. For hvert område med en start og en slutt vil koden først plassere sviller, ettersom det vil skape avstanden mellom svillene så nære 600mm som mulig. Måten den gjør det er å ta lengden av området, dele på 600mm og runde til nærmeste heltall. Det må være et helt antall sviller i et område. Lengden av området skal igjen deles på tallet som gir ut en avstand som skal være mellom svillene. Dette er jobben til funksjonen "markeringmellompunkt".

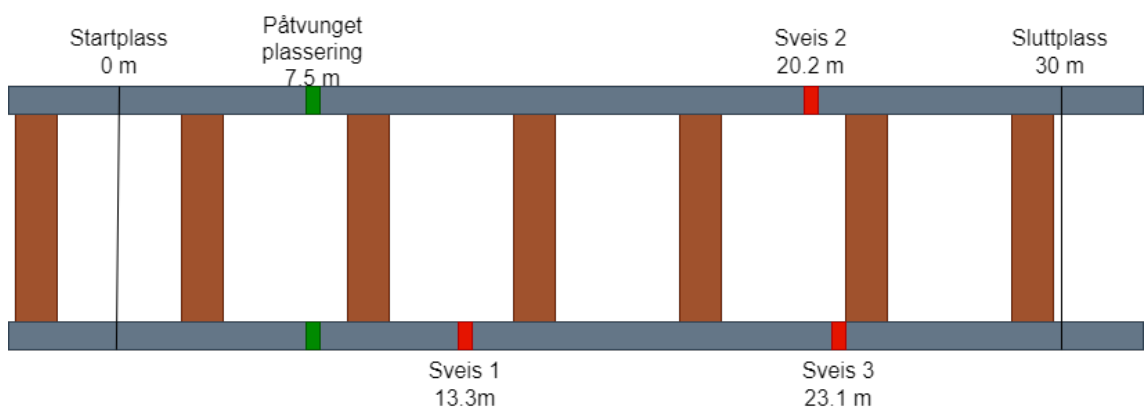
Her får man mulig plassering av svillene. Koden sjekker videre med "treff" funksjonen om dette treffer med plasseringen til sveisene. Hvis det ikke er kollisjoner med sveiser vil denne listen brukes og det blir outputten til koden. Treffer den en sveis går man videre til funksjonen "leggtilsveis". Denne funksjonen finner ut av hvilken sveis det er koden treffer og sammenlikner med hvor den treffer sveisen for å finne minste avstand til kanten av sveisen hvor svillen ikke kan treffe den. Det legges da et punkt der som fungerer likt som en tvunget plassering ved at det da må være en sviller der for at den ikke skal treffe med sveisen. Svillene foran og etter flyttes den minste mulige

veien samtidig som svillene unngår sveisen. Dette skjer med alle sveisene som treffes. Når dette er ferdig går den videre til å legge alle svillene likt som tidligere, men med de nye plassene som unngår sveisene. Denne nye listen med mulig plassering sjekker da igjen om flyttingen av svillene treffer en ny sveis. Hvis det igjen treffer en sveis fordi svillene er flyttet vil den gjøre den samme operasjonen igjen, helt til ingen av svillene treffer en sveis.

For å finne ut om en av svillene er i området til en sveis, brukes først funksjonen "leggverdi" som legger til alle verdiene rundt sveisen basert på antall desimaler ønsket. Her er det definert at man ønsker 10 cm på begge sider og legger til punkter på alle stedene hvor man ikke kan ha en sveis. Det er viktig å ha et riktig antall desimaler siden koden kun finner helt identiske tall i listene. Dette antallet desimaler er definert ved "antall_desimaler" i begynnelsen av koden. Et eksempel på dette er om man har en sveis på plass 100 og "antall_desimaler" på 2 vil listen gi ut: 99, 99.1, 99.2, 99.3, ..., 100.9, 101. Denne listen kan man sammenlikne med svilleplasseringene som også kommer til å være rundet opp til et likt antall desimaler.

Det er kun én pakke som brukes i denne koden og det er "Math". Denne brukes kun én gang i funksjonen "leggtilsveis" for å finne ut nøyaktig hvilken sveis som er truffet når en sville treffer en sveis. Denne funksjonen finner nærmeste sveis ved å se hvor hvor mange elementer det er i listen med sveiser og hvor mange elementer det er i den utvidete sveiselisten. Denne størrelsen er basert på avrundingen til koden og man kan dele plasseringen på antall elementer der og ved å runde dette ned får man plassen til sveisen i den opprinnelige listen med sveiser som ikke har blitt utvidet. Dette vil være plassen markert av operatøren til trallen. Man må runde ned siden nummereringen til en liste i Python starter på null og teller videre oppover.

Hvis eksempelet på en skinnestrekning fra figur 50 skulle bli satt inn i koden ville resultatet blitt slik som vist i listen i figur 51. Her måles avstandene fra starten, plass 0.0 og den siste plasseringen til en sville blir 30.0.



Figur 50: Eksempel på skinnestrekning

For avrundingen ble det valgt 4 desimaler som gir en nøyaktighet på 0.1 mm. Dette er et resultat av behovet for nøyaktighet og regnekraft tilgjengelig. Toleransene til dette prosjektet er nevnt til å

0.0	0.625	1.25	1.875	2.5	3.125	3.75	4.375	5.0
5.625	6.25	6.875	7.5	7.5	8.0874	8.6747	9.2621	9.8495
10.4369	11.0243	11.6116	12.199	12.199	12.7924	13.3857	13.9791	14.5725
15.1658	15.7592	16.3526	16.9459	17.5393	18.1327	18.726	19.3194	19.9128
20.5061	21.0995	21.6929	22.2862	22.8796	23.473	24.0663	24.6597	25.2531
25.8464	26.4398	27.0332	27.6265	28.2199	28.8133	29.4066	30.0	

Figur 51: Liste med plassering av sviller fra eksempelet i figur 50

være på ± 10 mm som betyr at nøyaktighet på 0.1 mm er mer enn tilfredstillende til dette kravet. Videre tar det for denne mengden desimaler svært lite tid for RPi'en å regne ut en svillaliste.

Videre er det behov for å hente inn pakker for å kjøre forskjellige program for å kunne bruke PWM-hatten og lese av målingene til enkoderne. For å bruke pakkene ble disse kodene kjørt i terminalen til RPi'en:

- `sudo pip3 install --break-system-packages adafruit-blinka`
- `sudo pip3 install --break-system-packages adafruit-circuitpython-pca9685`
- `sudo pip3 install --break-system-packages adafruit-circuitpython-motor`
- `sudo pip3 install --break-system-packages adafruit-circuitpython-servokit`
- `sudo apt-get install python-tk`
- `sudo apt-get install python3-gpiozero`

Dette lastet ned pakkene `adafruit-blinka` for kommunikasjon med PWM-hatten over `i2c`, `adafruit-circuitpython-pca9685` er programvare for å bruke PWM-hatten, `adafruit-circuitpython-motor` og `adafruit-circuitpython-servokit` for å kjøre servomotorene, `tkinter` til design av brukergrensesnitt og `gpiozero` for å bruke enkoderne. Samlet hjelper disse med input og output til RPi'en. Videre er de vanligste pakkene allerede lastet ned på RPi'en som f.eks `math` og `numpy`.

Koden som driver enkoderne er vist i vedlegg B. Denne kjører enkoder fra når startknappen er klikket helt fram til avknappen klikkes.

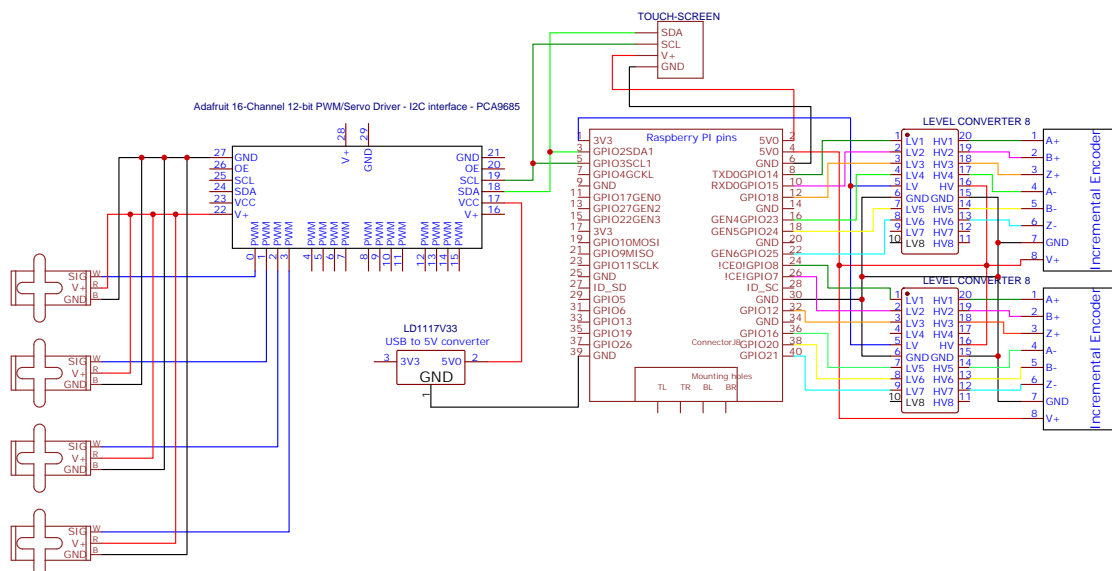
9.4 Bygging og testing

9.4.1 Elektrisk systemdesign

Det elektriske systemet består av 2 kretskort, PWM hatten og RPi'en, hver av disse drives av en egen strømkabel i form av USB-C. For å kunne fungere en arbeidsdag skal det være koblet til et batteri. Det som er valgt har 20000 mAh, som er nok til å kjøre hele systemet en hel arbeidsdag. Strømforsyningen til PWM-hatten går gjennom USB til 5 V konverter som henter ut 5 V spenningen og jord til et kretskort det er enkelt å lodde på. Denne strømmen går kun til å drive de 4 servomotorene koblet til PWM hatten. Som vist på figur 52 er de kun koblet opp til PWM hatten. Det er også lagt til en 470 μF kondensator til PWM hatten som anbefalt av produsenten som sørger for at servomotorene får nok strøm i oppstart.

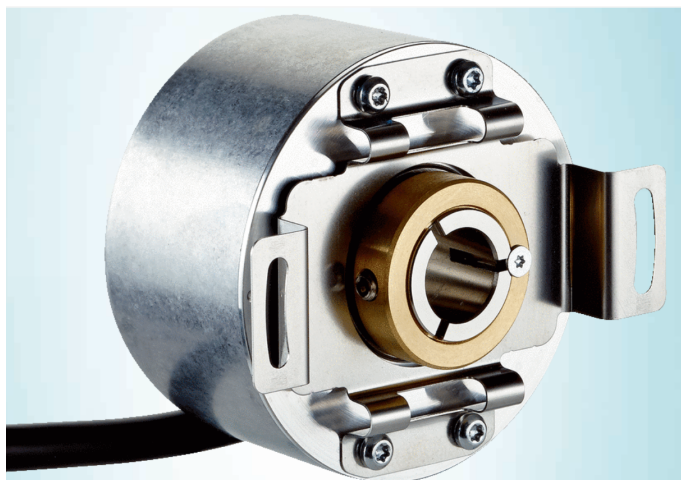
Kommunikasjon mellom PWM hatten og RPi'en skjer gjennom I2C som representeres av SDA og SCL GPIO portene til RPi'en på figur 52. Dette er samme kommunikasjonsmetode som touch-skjermen. Her er det vist at de er koblet til de samme signalportene til RPi. Dette løses ved at de har forskjellige adresser hos I2C kommunikasjonen.

De to enkoderne får strøm rett fra 5 V på RPi'en, ettersom produsenten har oppgitt en anbefalt spenning på 4,5 til 5,5 V i databladet. De digitale signalene fra enkoderne kommer dermed også ut i form av 5 V toppe. Denne spenningen er for stor for GPIO portene på RPi'en som kun kan ha 3,3 V spenning inn. For å løse dette er det koblet opp en llc som gjør om spenningen i signalene. Det vises i figur 52 at llc'ene er koblet til 3,3 V med LV(Low Voltage), porten og 5 V til HV (High Volt) porten. 5 V vil da være spenningen inn og 3,3 V vil da være ønsket spenning ut av llc. Alle signalene vil da komme ut som 3,3 V. Videre er hver ledning fra llc koblet til en egen GPIO port, det er her signalet går inn til RPi'en for å bli lest av.



Figur 52: Elektriske koblinger

Enkoderen som ble valgt er en Sick DBS60 Series Incremental Encoder, 3600ppr, RS422, TTL Signal, Blind Hollow Type, 10mm Shaft til jobben som var å måle avstanden trallen beveger seg som vist i figur 53. I starten av prosjektperioden var det ønsket å velge en solid shaft enkoder som også skulle gjøre jobben som aksling til hjulet. Med et slikt design ville alle kreftene til vognen gå gjennom enkoderen. Problemet med denne løsningen er at dette ville blitt for store krefter ettersom enkoderen kun tåler 100 N radially og 50N aksialt (SICK 2024a). Med en egenvekt på opptil 25 Kg ville kreftene på enkoderne bli større enn de som er anbefalt av databladet. Det brukes nå en “blind hollow” enkoder med en 10 mm aksling, to fotlager og et målehjul som hjuloppheng. Det vil da være kulelagrene som tar imot kreftene til trallen og det går videre gjennom akslingen til målehjulet uten å gå gjennom enkoderen. Da kan det trygt påføres ekstra krefter uten fare for å ødelegge elektronikken.



Figur 53: Enkoderen som brukes (SICK 2024b)

Det er valgt at det skal brukes 2 enkodere på måletrallen, en på hver skinne for å måle begge lengdene. Hovedgrunnen til dette er at det originalt er et krav om at man ønsker å måle lengden mellom svillene på ytterskinnen i kurver. Det vil gi den lengste lengdemålingen, som gir en kortere avstand mellom markeringene enn ved innerskinnen.

Minste radius på Nordlandsbanen er 210 m. Som vist i utregning 2 er forskjellen på omkrets ved en sporvidde på 1.435m hele 9.016 m som tilsvarer 2.254 m ved en sving på 90°.

$$\begin{aligned}
 \Delta L &= O_1 - O_2 = 2 \cdot \pi \cdot (r + l/2) - 2 \cdot \pi \cdot (r - l/2) \\
 &= 2 \cdot \pi \cdot r - 2 \cdot \pi \cdot r + 4 \cdot \pi \cdot l/2 = 2 \cdot \pi \cdot l \\
 &= 2 \cdot \pi \cdot 1.435 \text{ m} = 9.016 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Hvis man antar at man bare har 1 enkoder, hvor stor feil ville hver måling fått?

$$\begin{aligned}
 O &= \pi \cdot 2 \cdot r = \pi \cdot 2 \cdot (210 \text{ m} - 1.435 \text{ m}) = 1319.5 \text{ m} \\
 \frac{1319.5 \text{ m}}{0.6 \frac{\text{m}}{\text{sville}}} &= 2199 \text{ sviller}
 \end{aligned}$$

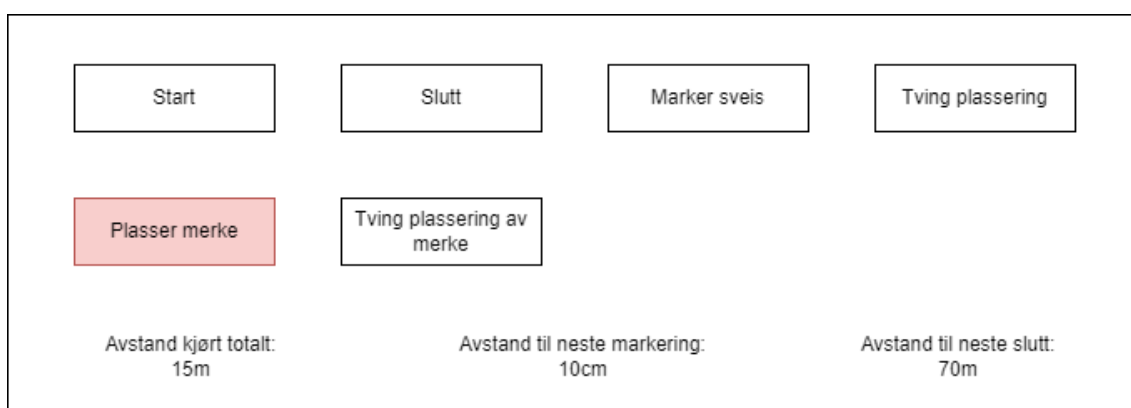
$$\frac{9.016 \text{ m}}{2199 \text{ sviller}} = 4.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Som vist i utregningene over er feilen per sville hvis man måler den innerste skinnen i stedet for den ytterste på 4,1 mm per sville. Selv om dette er innenfor toleransen på ± 10 mm er dette fortsatt en stor feil på målingene. Dermed er det viktig at måletrallen har en enkoder for hver skinne. Da kan man forsikre seg om at markeringen skjer etter kravene gitt av BN. Videre vil to enkodere gi mer sikkerhet i målingene siden man har redundans i systemet. Det vil da gi mulighet for å kunne bruke trallen selv hvis en av dem stopper å virke i løpet av arbeidet. Det er en fare for småstein og grus på skinnene som kan ødelegge en av målingene, men med 2 enkodere vil ikke dette være en grunn til å stoppe arbeidet og skape redundans i systemet.

Dette er designet, men i virkeligheten er PWM-hatter loddet direkte på RPi'en slik at man ikke trenger å ha ekstra ledninger til den, og den er koblet til riktig fra starten av. Det er også slik at selv om touch-skjermen må kobles til I2C kommunikasjon skjer dette gjennom en egen videokabel gjennom PCIe porten. Touch-skjermen har også mulighet til å kobles til strøm direkte fra en USB ledning, og ikke gjennom 5V og jord som vist på koblingsskjema. Det er valgt å koble touch-skjermen rett til RPi'en som strømtilgang fordi det var mest hensiktsmessig og RPi'en kan gi nok strøm for å drive den og de andre komponentene.

9.4.2 Program til touch-skjerm

Det er viktig å ha et bra brukergrensesnitt for å forsikre seg om at trallen blir brukt riktig. Man ønsker å ha en brukervennlig app som tillater operatøren å utføre alle oppgavene denne måletrallen er designet til å gjøre. Målet med denne appen er å kunne få knapper til å fungere og å vise frem kjørt avstand, avstand til neste sville, og å kunne klikke for å gjøre markeringen, som i figur 54.



Figur 54: Ønsket utseende på touch-skjerm

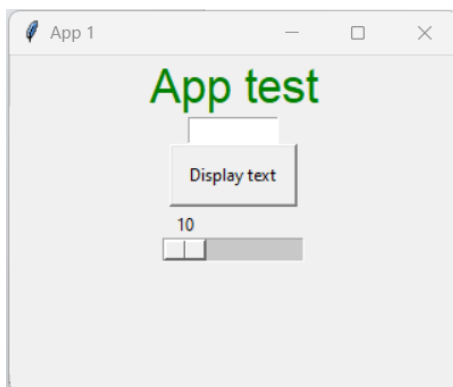
Det er mulig å se at "plasser merke" på figur 54 er rød. Meningen med dette er at den ikke skal fungere før trallen er innenfor toleranseområdet til plasseringen som blir definert i koden.

Når den er innenfor toleranseområdet vil knappen bli grønn og den kan trykkes på for å aktivere markeringssystemet. "Tving plassering av merke" er en knapp som ignorerer området gitt for plassering av svillen og bare plasserer merket der hvor trallen står. Det er ønsket å gi operatøren mye kontroll, men samtidig ha muligheten til å følge de ønskede målingene og plasseringene regnet ut av koden.

Det ble vurdert forskjellige pakker som inneholder kode for å gjøre programmeringen av en app enklere. Pakkene som ble testet var "guizero" og "Tk interface". Utfordringene med programmeringen er at koden som kjøres til appen, kjøres kontinuerlig helt til appvinduet lukkes. Det fører til at det ikke blir mulig å hente inn og vise verdier som oppdateres i sanntid. Kodeeksempelet (Sach 2024) er vist i figur 55 med bruk av pakken "guizero", og vinduet som åpnes ved å kjøre koden er vist i figur 56. Det samme problemet oppsto ved bruk av pakken "Tk interface".

```
1 from guizero import App, Text, TextBox, PushButton, Slider
2
3 def say_my_name():
4     welcome_message.value = my_name.value
5 def change_text_size(slider_value):
6     welcome_message.size = slider_value
7
8 app = App(title="App 1")
9 welcome_message = Text(app, text="App test", size=25, font="Arial", color="green")
10 my_name = TextBox(app)
11 update_text = PushButton(app, command=say_my_name, text="Display text")
12 text_size = Slider(app, command=change_text_size, start=10, end=80)
13
14 app.display()
```

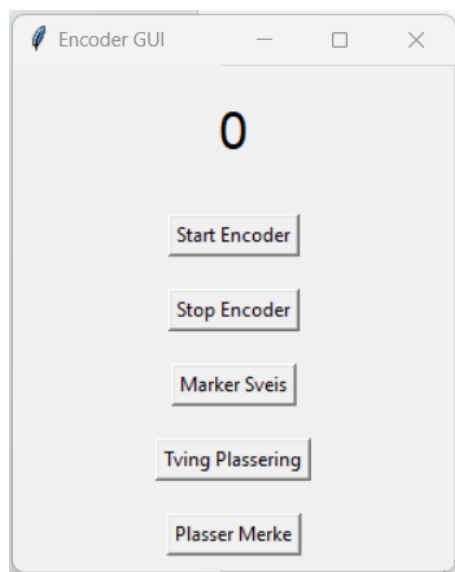
Figur 55: Kode til test av app



Figur 56: Test av app

På grunn av utfordringene ble det testet kodegenerering med ChatGPT (OpenAI 2024). Det er mulig å se hvordan hele koden ser ut i vedlegg C. Koden ble generert ved å spørre om språkmodellen kunne lage et brukergrensesnitt med en verdi som oppdateres kontinuerlig, og fem knapper som utfører en oppgave når de trykkes på. Her er ikke funksjonene helt ferdigutviklet ennå. Vinduet som åpnes ved å kjøre koden kan ses i figur 57. Problemet med å vise verdier som oppdateres

kontinuerlig ble løst ved å bruke threading. Det gjør at flere oppgaver kan kjøres samtidig (Lerner 2024).



Figur 57: Test av app skrevet av kunstig intelligens

9.5 Måleusikkerhet

Det er ønsket å regne ut denne måleusikkerheten for å se hvor den største usikkerheten i målingene gjort av trallen har opphav. Dermed skal det regnes usikkerhet slik som vist i JCGM 2008. Dette skal vise hvor sikre målingene gjort av trallen er og hvor feilen kommer i fra. Da kan man også kommentere på om denne trallen kan gi mål innenfor den gitte toleransen.

Usikkerheten som kommer fra enkoderene er på $36^\circ/\text{PPR}$. Fra datablad er det oppgitt at encoderen valgt har 3600 PPRSICK 2024b som gir:

$$u^\circ = \frac{36^\circ}{3600} = 0.01^\circ$$

Videre er omkretsen på målehjulene oppgitt til å være 20 cm. Dermed blir usikkerhetstillegget fra lengdemålingene:

$$u_l = 0.01^\circ \cdot \frac{200 \text{ mm}}{360^\circ} = 5.555 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

På det meste kan temperaturen variere mellom 5° og 30° på en arbeidsdag. Dette vil være operasjonstemperaturen til trallen. Det blir en temperaturforskjell på 25°C . Med triangulær fordeling blir usikkerheten fra dette på:

$$u_{\Delta T} = \frac{25^\circ\text{C}}{\sqrt{6}} = 10.206^\circ\text{C}$$

Størrelsesutviklingen til stålet i skinnene er oppgitt fra teknisk regelverk (BaneNOR 2024a) til å være på $11.5 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$. Det betyr at lengetillegget til skinnene over 600mm er:

$$u_{l\Delta T1} = 600 \text{ mm} \cdot 10.206^\circ\text{C} \cdot 11.5 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1} = 0.0704 \text{ mm}$$

Videre skal man ha størrelsesutviklingen til aluminiumsprofilene mellom enkoderen og markeringsmekanismen. Nominell avstand er 220mm, og utvidelseskoeffisienten til aluminium i følge NTNU artikkel er på $24 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ (Johansen 2009). Denne størrelsesutviklingen skjer sammen med ekspansjonen på skinnene, og i samme retning. Etersom ekspansjonen skaper mer avstand mellom markeringsmekanismen og enkoderen, vil dette fungere imot usikkerheten som skapes av varmeekspansjonen til skinnene.

$$u_{l\Delta T2} = 220 \text{ mm} \cdot 10.206^\circ\text{C} \cdot 24 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1} = 0.0561 \text{ mm}$$

Programmet runder av målingen til 0.1 mm. Denne usikkerheten blir på 0.05 mm likt som oppløsning. Dette kan man anta som en rektangulær fordeling som gir usikkerheten:

$$u_l = \frac{0.05 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.02887 \text{ mm}$$

Det kommer også til å være et toleranseområde med godkjent plassering for å gjøre det lettere å kunne plassere merkene for operatøren, det er satt på $\pm 1\text{mm}$ fra perfekt plassering, dette fører til en normalfordelt usikkerhet på 1mm.

En ny usikkerhet som ikke er regnet ut er forskyving på merkene ettersom det må flyttes for å kunne unngå sveis. Det er vanskelig å vite hvor langt hvert merke må flyttes på hvert område så det er ikke data tilgjengelig. Det er heller ikke mulig å begrense dette til et spesifikt tall siden denne forflytningen alltid må skje.

Videre må man se om dette er godkjent i forhold til kravene til BN på $\pm 10\text{mm}$. Det kan også noteres at merket har en bestemt tykkelse og det er ønsket at hele dette merket ligger innenfor toleranseområdet. I tabell 2 legges alle de forskjellige usikkerhetene sammen til en samlet usikkerhet. Man kan bruke denne tabellen til å se at mesteparten av usikkerheten kommer fra at toleranseområdet

Tabell 2: Sammendrag måleteknikk

Usikkerhet	Estimat	Standard usikkerhet	Sannsynlighets fordeling	Sensitivitet	Usikkerhets tillegg
Temperatur i skimmer	0	10.206°C	Triangulær fordeling	11.5*10 ⁻⁶ C ⁻¹	0,0704
Temperatur i aluprofil	0	10.206°C	Triangulær fordeling	24 · 10 ⁻⁶ C ⁻¹	-0,0651
Lengdemål (enkoder)	600mm	± 36"/ppr	Normal fordeling	1	0,005555
Område for godkjent plassering	0	1mm	Normal fordeling	1	1
Avrunding av målinger	0	0.02887mm	Rektangulær fordeling	1	0,02887
				sum	1.039725

Resultatene av usikkerhetsutregningene fra tabell 2 er at man får måling med $\pm 1.0397 \text{ mm}$ ved $k=1$ hvor nesten alt kommer fra at det er en tillatt toleranse for plasseringen av svillene. Man kan vurdere å ignorere feilen som kommer av enkoderen og varmeeekspansjonen til skinnene.

9.6 Diskusjon

Elektronikken fungerer som forventet, det er mulig å drive alle servomotorene samtidig ved å koble dem som vist i figur 52. Enkoderne får målt ønsket avstand og takket være llc'ene kan RPi'en lese signalene.

Koden som finner plasseringen til svillene fungerer bra og gir en god løsning på problemet, men den er ikke særlig effektiv. Koden bruker "antall desimaler" som basis for å legge til en mengde punkter i en liste. Dette antallet med punkter blir eksponentielt større ettersom "antall desimaler" øker, som betyr at regnekraften som kreves også øker eksponentielt. Dette er en begrensning til systemet og en bedre skrevet kode ville unngått dette slik at man kan runde av målingene mer nøyaktig. Det er også valgt en RPi med mye regnekraft som tillater koden å være lite effektiv uten å påvirke resultatene mye. Dette vises i utregningene i måleusikkerhet, her er det regnet ut de forskjellige usikkerhetene knyttet til målingene gjort av trallen. Det vises tydelig at selve toleransen som godkjennes for plassering av trallen på det spesifikke punktet er den største usikkerheten. Den er betydelig større enn alle andre usikkerheter knyttet til målingen. Dermed kan man si helt sikkert at å runde til 4 desimaler er et bra valg.

Det kan også noteres at koden vil forflytte svillene en avstand og denne avstanden på forflyttelse ikke er tatt med i måleusikkerhetsutregningene. Dette er fordi de ikke er en direkte usikkerhet på målingene og at dette er et valg man må ta for å kunne unngå sveiser. Selv om de flyttes er et slikt program mye mer nøyaktig enn å måle for hånd siden denne flytter markeringene ved sveisen så lite som mulig og deler det likt over alle svillene i området. Dette er i motsetning til en håndmarkering hvor man ikke kan flytte såpass mange markeringer uten å få problemer med målingene. Dermed vil denne måten å måle alltid gi bedre resultater enn å markere for hånd.

Programmet til touch-skjermen er ikke ferdigstilt, men det er lagt et grunnlag for hvordan koden kan skrives. Deler av koden kan produseres med kunstig intelligens, men koden for å regne ut svilleavstand og styring av servoer og enkodere må bygges inn i denne koden manuelt.

9.6.1 Kontrollmåling

En viktig del av målinger er å kunne undersøke dem i ettertid for å kunne bekrefte at det som er målt og markert faktisk er riktig, og for dette tilfellet betyr det at markeringene er med 600mm mellomrom. Kravene for en slik måling ville være at den er uavhengig av målingene gjort av enkoderne og at operatøren legger merke til feil med en gang de oppstår.

Kontrollmetoder:

- Optisk måling
- Synlig laser

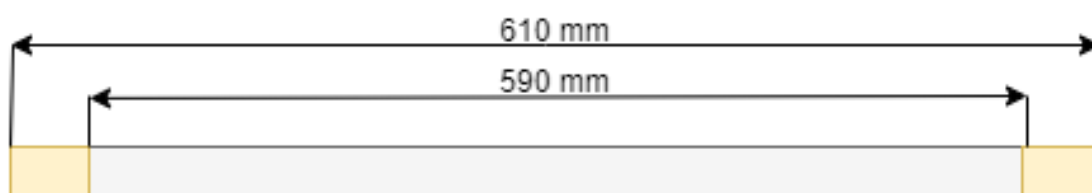
-
- 600mm profil ved siden av trallen
 - Manuell ettermåling

Optisk måling: Dette vil gått ut på å sette en optisk sensor bak på måletrallen slik at den kan finne markeringspunktene. Den vil da kunne sende signaler til RPi'en om målingene er riktig eller feil. Da ville operatøren kunne se direkte på skjermen om det er noe galt med markeringene som er gjort av måletrallen. Dette ville vært en svært krevende oppgave å få til å fungere.

Hvis merkene er markert korrekt burde en optisk måler finne dem, spesielt siden de alltid er på stålskinner og omtrent på samme plass. Problemet er at koden som kreves for dette ikke er lett å lage. Denne løsningen ville ikke være mulig for gruppen å utvikle i løpet av prosjektperioden, dermed er dette en løsning som man ikke ønsker å gå videre med. Hvis dette ble implementert på en god måte av kvalifiserte utviklere ville dette vært den tryggeste måten å gjøre kvalitetssjekk. Dette fordi optiske målere kan være svært nøyaktige og den kunne gitt eksakte mål på feil. Slike mål kan brukes videre til å kalibrere enkoderene på trallen hvis det skulle være nødvendig.

En annen løsning som er vurdert for å sjekke målingene ville vært en laser plassert på måletrallen. Denne ville da settes nøyaktig 600mm unna markeringsmekanismen slik at man lett kan observere om markeringen er i riktig område ved å se hva laseren lyser ned på. Hvis laseren traff et tidligere merke ville det da være 600mm mellom de forskjellige målingene, og man kunne fort se om den måler riktig. Hvis det skulle være et tilfelle hvor programmet ønsker å markere et sted, men laseren ikke lå oppå det tidligere merket ville dette være synlig for operatøren som kunne gjøre nødvendig tiltak for å sørge for at målingene ble riktige igjen. Det eneste problemet med dette er at den ikke tar med seg korrigeringen som gjøres ved forflytting av merkene for å unngå sveiser.

Den letteste løsningen man kan ha for å undersøke om markeringene er gjort riktig er å ha en stav eller profil langsgående på trallen. Staven ville da ha merker på de to endene etter område beskrevet av "maximum material condition" og "least material condition" som vist i figur 58. Slik at hvis markeringen er innenfor de områdene på hver side vil den være godkjent. Ved denne løsningen ville operatøren kjøre vognen mellom 2 merker slik at staven sin ene ende var over en av markeringene og så videre se om det andre merket også er innenfor toleransen. Denne metoden har en mulighet til å være unøyaktig, og tidkrevende hvis man undersøker alle markeringene gjort, men da kan man si sikkert om det blir godkjent eller ikke. Dette vil også kreve ekstra opplæring til operatøren av vognen.



Figur 58: Målestav med gule merker

En siste løsning som allerede er tatt i bruk er manuell inspeksjon. Dette vil være helt uavhengig av målevognen. Her sjekkes avstanden mellom markeringene med målebånd for å se om det er godkjent, på samme måte som man gjør ved manuell markering. Dette er metoden det er valgt å gå videre med for å kunne fokusere tiden på å lage et system som oppfyller de andre kravene til denne oppgaven. Ved videre arbeid er det ønsket å kunne utføre en av metodene for kvalitetssikring.

10 Diskusjon

Prosjektet har kommet svært langt, men er ikke ferdigstilt. Hovedmålet til denne oppgaven var å designe og produsere en funksjonell prototype av måletrallen. Det er bygget en prototype, men en del av funksjonene trenger mer arbeid for å fungere optimalt. Budsjettet som ble satt opp i begynnelsen av prosjektet ble holdt og kan ses i vedlegg F. Videre var det mål om blant annet økt kunnskap om produktutvikling og elektronikk. Innenfor disse området har kunnskapene forbedret seg kraftig ved bruk av Fusion og bygging av elektriske systemer. Programmeringsferdighetene har også blitt mye bedre, selv om vi ikke ble ferdige med all programmeringsjobben. Den fysiske byggingen har også gitt verdifulle erfaringer.

Bærekraftsmål nummer 9 handler om innovasjon og infrastruktur (Nasjoner 2024), og sier at oppgradering av infrastruktur er avgjørende for å skape en bærekraftig utvikling av samfunnet. Dette prosjektet har som effekt mål at den nye løsningen på oppmerkingen skal effektivisere jernbanevedlikehold og minske belastning for anleggsarbeiderne. Det vil dermed være svært relevant for dette bærekraftsmålet.

Det oppsto problemer som må løses før dette kan bli et ferdig produkt. De viktigste punktene som må korrigeres er:

- Teste bremses etter NS-EN 13977
- Bedre måte å utløse sprayboksene
- Designe justeringsmekanisme til avstand fra sprayboks til skinne
- Ferdigstille app til touch-skjermen
- Printe deler i bedre materiale eller bestille maskinerte deler
- Lage brukerveiledning
- Få godkjenning av Statens jernbanetilsyn

Teste bremses etter NS-EN 13977

Under produksjonen av prototypen kom det fram at bremsene fungerte som forventet, og at det var mye motstand innebygd i de forskjellige komponentene. Det eneste problemet var at det ikke ble utført en formell test som fulgte kravene til NS-EN 13977. Dette betyr at det ikke er mulig å konkludere om at bremsene blir godkjent.

Bedre måte å utløse sprayboksene

Selv om servomotorene var sterke nok til å utløse sprayboksene fungerte ikke oppsettet optimalt. Grunnen til dette er at Rust-Oleum boksene krevde trykk fra 2 sider på dysen for å male.

Det må lages et oppsett som tillater servomotoren å trykke på begge sider av sprayboksen samtidig.

Designe justeringsmekanisme til avstand fra sprayboks til skinne

En løsning som gjør det mulig å justere lengden fra skinnen til mekanismene kan videreutvikles med en glideskinne som utgangspunkt. På denne måten vil det bli mulig å justere avstanden individuelt mellom hver sprayboks.

Ferdigstille app til touch-skjermen

Som nevnt i tidligere kapitler er det en stor jobb å lage en egen app til dette prosjektet. Det tidlige utkastet av app ble laget i ChatGPT, men er ikke helt funksjonelt. Det kreves at alle kodeutklippene i vedlegg A, B og C settes sammen til et funksjonelt program. Appen må også kjøre flere funksjoner samtidig ved bruk av "threading". Her mangler gruppen ferdighetene til å utføre denne oppgaven og det er dermed valgt å ikke utføre dette i prosjektperioden, men dette må til for å få hele trallen til å fungere.

Printe deler i bedre materiale eller bestille maskinerte deler

Alle delene som er 3D-printet med PLA- filament er kun holdbare til prototyping og ikke en tralle som skal settes i drift. For å gjøre delene holdbare i flere år må det brukes maskinerte deler av metall eller et filament til 3D-printingen som er mer robust. Mange av materialene som er mer holdbare krever en lukket printer med filter for å filtrere ut potensielt helseskadelige partikler.

Lage brukermanual

For å søke om godkjenning hos Statens jernbanetilsyn er det krav om å skrive en brukermanual til trallen. Manualen skal inneholde instruksjoner for bruk, bruksområder og unntak som er gjort fra standarden. Et eksempel på et unntak som er gjort i designet av denne trallen er at den ikke holder seg innenfor "gauge". Markeringsmekanismen må være så nærme skinnen som mulig for å lage gode linjer, og derfor vil enkelte deler komme utenfor "gauge". I brukermanualen kan det dermed presiseres at trallen må brukes i gangfart og operatøren må være observant slik at utstikkende deler ikke kolliderer med jernbanekomponenter. I tillegg er materialet i markeringsmekanismen mykere enn jernbanekomponentene, slik at trallen blir ødelagt.

Godkjenning av Statens jernbanetilsyn

Selv om designet har fulgt kravene i følge NS-EN 13977 kreves det også at man skal skrive en søknad til Statens jernbanetilsyn, og lage en brukermanual. Det ville også kreve ekstra merking

av trallen med serienummer. Dette arbeidet ble det dessverre ikke tid til å gjennomføre. Det er dog sannsynlig at Totalprosjekt Namsskogan kommer til å søke om denne godkjenningen hvis prototypen utfører oppgaven de ønsker.

11 Konklusjon

Trallen viser lovende kvaliteter for bruk på jernbanen. Det gjenstår dog mye arbeid før den er klar til å tas i bruk. Ved å fullføre prosjektet vil problemstillingen bli løst og produktet kan bygges til et ferdig produkt.

Resultatmål

Resultatmålene som ble satt i begynnelsen av prosjektperioden var å bygge en måletralle innenfor spesifikke krav. Hoveddelene av trallen er konstruert og satt sammen. Alle kravene fra resultatmålet er fulgt, men vi vet ikke om målet om å bygge trallen etter standarden NS-EN 13977 er fulgt godt nok før en søknad er sendt inn og godkjent av jernbanetilsynet.

Effektmål

Effektmålene er ikke alltid oppnådd før en stund etter at prosjektet er avsluttet. Likevel er målene om økt kunnskap innenfor fagområdene programmering, mekatroniske systemer, prosjektarbeid, design og produktutvikling nådd med god margin. Målene som handler om effektivisering av bedriften vil ikke vises før trallen er ferdig bygget og tatt i bruk på det første vedlikeholdsprosjektet, men med løsningene som er utarbeidet i dette prosjektet er det sannsynlig at også de målene blir nås.

Anbefalinger for videre arbeid

- Fullføre og teste forslagene til markeringsmekanismen
- Fullføre utviklingen av brukergrensesnittet
- Utføre test av bremses
- Produksjon av deler i holdbart materiale
- Skrive brukermanual
- Skrive og sende søknad til Jernbanetilsynet

Referanseliste

- Adafruit (2024a). *757 — Adafruit BSS138, Bi-directional Logic Level Converter*. Distrelec Norway. URL: https://www.elfadistrelec.no/en/bss138-bi-directional-logic-level-converter-adafruit-757/p/30091221?ext_cid=shgooaqnono-Smart-Shopping-High-ROAS&cq_src=google_ads&cq_cmp=20396931799&cq_con=&cq_term=&cq_med=pla&cq_plac=&cq_net=x&cq_pos=&cq_plt=gp&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-qexBhCoARIsAFgBlesdManb1BftAE6zP4ORJoOYE5-FhAS7xjLvGW-k3w9Hs_u5859_RPsaAgvoEALw_wcB&gclsrc=aw.ds (visited on 25th Apr. 2024).
- (2024b). *Adafruit 16-Channel PWM / Servo HAT for Raspberry Pi - Mini Kit*. URL: <https://www.adafruit.com/product/2327> (visited on 8th May 2024).
- (2024c). *Adafruit 16-Channel PWM/Servo HAT and Bonnet for Raspberry Pi*. URL: <https://learn.adafruit.com/adafruit-16-channel-pwm-servo-hat-for-raspberry-pi?view=all> (visited on 23rd Apr. 2024).
- Arbeidstilsynet (2024). *Tungt arbeid*. URL: <https://www.arbeidstilsynet.no/tema/ergonomi/manuelt-arbeid/tungt-arbeid/> (visited on 10th May 2024).
- AS Fredrikstad, Verktøy og maskin (2024). *Lett alu.tralle m/brems type 110*. URL: <https://www.ve-ma.com/jernbane/traller/lett-alu-tralle-m-brems-type-110/> (visited on 8th May 2024).
- BaneNOR (2024a). *Overbygning/Bygging/Helsveist spor/Vedlegg/Prosedyre for nøytralisering – Teknisk regelverk*. URL: https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Bygging/Helsveist_spor/Vedlegg/Prosedyre_for_n%C3%B8ytralisering (visited on 24th Apr. 2024).
- (2024b). *Teknisk regelverk - Overbygning/Bygging/Regler for bygging*. URL: https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Bygging/Regler_for_bygging (visited on 26th Apr. 2024).
- (2024c). *Teknisk regelverk - Overbygning/Prosjektering/Sporkonstruksjoner/Vedlegg/Skinneprofiler*. URL: <https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Sporkonstruksjoner/Vedlegg/Skinneprofiler> (visited on 8th May 2024).
- Baumer (2024). *Målehjul.pdf*. URL: <https://docs.rs-online.com/4a43/0900766b816ec949.pdf> (visited on 22nd Feb. 2024).
- Components, RS (2024a). *Baumer MR241 Series Encoder Wheel*. URL: <https://no.rs-online.com/web/p/sensor-accessories/4817666> (visited on 8th May 2024).
- (2024b). *Bosch Rexroth M6 T-Slot Nut Connecting Component, Strut Profile 30 mm, Groove Size 8mm*. URL: <https://no.rs-online.com/web/p/connecting-components/3900256> (visited on 8th May 2024).
- (2024c). *Incremental encoders*. URL: <https://no.rs-online.com/web/c/?searchTerm=incremental+encoder> (visited on 10th May 2024).
- (2024d). *RS PRO Angle Bracket Connecting Component, Strut Profile 40 mm, Groove Size 8mm*. URL: <https://no.rs-online.com/web/p/connecting-components/7675698> (visited on 8th May 2024).

-
- Components, RS (2024e). *RS PRO Angle Bracket Connecting Component, Strut Profile 40 x 40 x 40 mm, Groove Size 8mm*. URL: <https://no.rs-online.com/web/p/connecting-components/7675695?searchld=cc379950-0e64-49d5-9d85-88393edd4b26&gb=s> (visited on 8th May 2024).
- (2024f). *RS PRO M6 T-Slot Nut Connecting Component, Strut Profile 40 mm, Groove Size 8mm*. URL: <https://no.rs-online.com/web/p/connecting-components/7675658> (visited on 8th May 2024).
- Elefun (2024). *Dualsky AS549 Standard Servo 6kg/0.14s*. URL: <https://www.elefun.no/p/prod.aspx?v=48639> (visited on 8th May 2024).
- Elprocus (2024). *Servo Motor – Working, Advantages and Disadvantages*. URL: <https://www.elprocus.com/servo-motor/> (visited on 30th Apr. 2024).
- JCGM (2008). ‘Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement’. In: *JCGM*.
- Johansen, Henning (2009). ‘4 ALUMINIUM OG ALUMINIUMLEGERINGER 4.1 d legering og varmebehandling 5 KLASSIFISERING AV ALUMINIUMLEGERINGER 6 NYERE LEGERINGER OG KOMPOSITTER’. In.
- Lerner, Reuven M. (2024). *Threading in Python*. URL: <https://www.linuxjournal.com/content/threading-python> (visited on 10th May 2024).
- Misumi (2024). *Pillow Type Unit, Silver Series, Cylindrical Bore Type with Eccentric Ring, UP (UP000)*. URL: <https://mx.misumi-ec.com/en/vona2/detail/221000611845/?HissuCode=UP000> (visited on 8th May 2024).
- Munday, Des and son (2024). *TRACK WHEEL SINGLE FLANGED RICHMOND SF899/025*. URL: <https://munday.com.au/track-wheel-single-flanged-richmond-sf899-025.html> (visited on 8th May 2024).
- Nasjoner, Forente (2024). *Mål 9 - Innovasjon og infrastruktur*. URL: <https://unric.org/no/mal-9/> (visited on 16th May 2024).
- Nigro, Eduardo (2024). *Encoder with Raspberry Pi*. URL: <https://thingsdaq.org/2022/03/09/encoder-with-raspberry-pi/> (visited on 5th Oct. 2024).
- Norgeodesi (2024). *Trimble GEDO CE 2.0 jernbanesystem*. URL: <https://norgeodesi.no/produkt/trimble-gedo-jernbanesystem/> (visited on 8th May 2024).
- OpenAI (2024). *ChatGPT [Stor språkmodell]*. URL: <https://chat.openai.com> (visited on 10th May 2024).
- PCAencoders (2024). *HOW ENCODERS WORK*. URL: <https://www.pca-aus.com.au/blog/how-encoders-work> (visited on 26th Apr. 2024).
- RaspberryPI (2024a). *Raspberry Pi Documentation - Raspberry Pi hardware*. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html> (visited on 24th Apr. 2024).
- (2024b). *Raspberry Pi Touch Display*. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/display.html> (visited on 30th Apr. 2024).
- Rollco (2024a). *Flanged Block Type FNS*. URL: <https://www.rollco.no/produkter/skinnefoering-aluminium/aluminium-blokk-flens-fns> (visited on 8th May 2024).
-

-
- Rollco (2024b). *Rail Type A*. URL: <https://www.rollco.no/produkter/skinnefoering-aluminium/aluminium-skinne-type-a> (visited on 8th May 2024).
- Sach, Laura (2024). *Recipes - guizero*. URL: <https://lawsie.github.io/guizero/recipes/> (visited on 4th Apr. 2024).
- SICK (29th Apr. 2024a). *Encoder som var vurdert*. URL: <https://docs.rs-online.com/2a0c/A700000007305624.pdf> (visited on 22nd Feb. 2024).
- (2024b). *Encoder som brukes.pdf*. URL: <https://docs.rs-online.com/32c4/A700000009762263.pdf> (visited on 22nd Feb. 2024).
- Standard-Norge (2024). *Railway applications — Track — Safety requirements for portable machines and trolleys for construction and maintenance (NS-EN 13977:2011)*. URL: <https://online.standard.no/nb/ns-en-13977-2011> (visited on 29th Feb. 2024).
- Wikipedia (19th Feb. 2024). *Pulse-width modulation*. In: *Wikipedia*. Page Version ID: 1208971714. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pulse-width_modulation&oldid=1208971714 (visited on 24th Apr. 2024).

Vedlegg

A Kode til svilleplassering

```
import math
#denne brukes kun 1 sted

antall_desimaler = 4
#bestemmer nøyaktigheten til plasseringen av svillene(i meter)
halvlangde_for_svilleplassering = 1
#i cm, med =1 vil man kunne plassere sville perfekt+- 1 cm

#finner tallene i to lister som er like, bør nok brukes i annen kode også
def treff(list1, list2):

    treff = []
    treff = set(list1) & set(list2)
    return(treff)

# må ha sveiseplass som liste, tvungetplasseringer som liste, startsted og sluttsted som tall
def finneSvillePlassering(sveisplasser, tvungetplassering, startsted, sluttsted):
    #ikke endre navn på noen av disse!!!

    sveisplass = sveisplasser #[36.2, 60.2, 82.64]
    tvingplass = tvungetplassering #[50]
    startplass = startsted #0.1
    sluttplass = sluttsted #100

    #lager en liste med punkter til plassering av
    #sviller nærmest mulig 0.6 meter innenfor to punkter
    def markeringmellompunkt(startpunkt,sluttpunkt):

        i = 0
        liste = []
        avstand = sluttpunkt-startpunkt
        antallsviller = avstand/0.6
        antalsvillerekte = round(antallsviller)
        ideelavstand = avstand/antalsvillerekte
        while len(liste) < antalsvillerekte+1:
```

```

    tall = startpunkt + i * ideelavstand
    liste.append(tall)
    i = i+1
liste2 = [round(x, antall_desimaler) for x in liste]
return(liste2)

```

#legger til verdier rundt sveisene som man ikke kan gå på lager en liste med disse

```

def leggverdi(list):
    nøyaktighet_avrunding = 1/10**antall_desimaler
    antall_ele = 0.2/nøyaktighet_avrunding
    a = list
    start = 0
    end = len(list)
    step = 1
    for i in range(start, end, step):
        x = i

        r = list[x:x+step]

        while len(r) < antall_ele:
            høy_verd = max(r)
            min_verd = min(r)
            r.append(høy_verd+nøyaktighet_avrunding)
            r.append(min_verd-nøyaktighet_avrunding)

            a.append(høy_verd+nøyaktighet_avrunding)
            a.append(min_verd-nøyaktighet_avrunding)
        a2 = [round(x,antall_desimaler) for x in a]
    return(a2)

```

#list 1 er alle punktene med sveiser, list 2 er stedene med sviller krever egt sveisplass

```

def leggtilsveis(list1, list2):
    i = 0
    replass = []
    while i < len(treff(list1, list2)):
        plass1 = list(treff(list1, list2))[i]
        plassering = list1.index(plass1)
        nøyaktighet_avrunding = 1/10**antall_desimaler

```

```

antall_ele = 0.2/nøyaktighet_avrunding + 1
#print(antall_ele)
sveisnr = math.floor(plassering / antall_ele)
avstand = plass1-sveispllass[sveisnr]

if avstand < 0:
    plass_sveis = -0.101 + sveispllass[sveisnr]
else:
    plass_sveis = 0.101 + sveispllass[sveisnr]
repllass.append(plass_sveis)
i=i+1
return(repllass)

#bruker listen med plasser som må brukes og
#setter dem inn merkeringsmellompunkt for en liste med sviller
def samletplassering(list):

    i = 0
    nyliste = []
    while i < len(list) -1:
        første = list[i]
        siste = list[i + 1]
        nyliste.extend(markeringsmellompunkt(første, siste))
        i = i+1
    return(nyliste)

tvungetplassering = []
tvungetplassering.extend(tvingpllass)
tvungetplassering.append(startpllass)
tvungetplassering.append(sluttpllass)
sorttvunget = sorted(tvungetplassering)

svilleliste = samletplassering(sorttvunget)

ikkegåpllass = leggverdi(sveispllass)

listemedsveisersomtrefter = leggtillsveis(ikkegåpllass, svilleliste)

#denne legger til sveisene ettersom de treffes ved at svillene flyttes rundt

```

```
#til slutt kommer det en liste med sviller som ikke treffer noe
if len(listemedseisersomtreffer) == 0:
    svilleliste = svilleliste
else:
    i = 0
    while len(listemedseisersomtreffer) != 0:
        sorttvunget.extend(listemedseisersomtreffer)
        sorttvunget2 = sorted(sorttvunget)

        svilleliste = samletplassering(sorttvunget2)

        listemedseisersomtreffer = leggtilsveis(ikkegåplass, svilleliste)
        i = i+1
#svilleliste er den som man ønsker!!

return(svilleliste)
```

B Kode som kjører enkodere

Denne koden krever at på-knapp og av-knappen på skjermen fungerer. Deler av koden er hentet fra Nigro 2024.

```
import time

import numpy as np

from gpiozero import RotaryEncoder

ppr = 3600 # Pulses Per Revolution of the encoder

tsample = 0.02 # Sampling period for code execution (s)

tdisp = 0.5 # Sampling period for values display (s)

anglecurr = 0

tprev = 0

tcurr = 0

tstart = time.perf_counter()

encoder = RotaryEncoder(23, 24, max_steps=0)

på_knapp = 0

av_knapp = 0

if på_knapp == 1:

    # Pausing for `tsample` to give CPU time to process encoder signal

    time.sleep(tsample)
```

```
# Getting current time (s)

tcurr = time.perf_counter() - tstart

# Getting angular position of the encoder

# roughly every `tsample` seconds (deg.)

anglecurr = 360 / ppr * encoder.steps

# Printing angular position every `tdisp` seconds

if (np.floor(tcurr/tdisp) - np.floor(tprev/tdisp)) == 1:

    print("Angle = {:.0f} deg".format(anglecurr))

# Updating previous values

tprev = tcurr
elif på_knapp != av_knapp:
    på_knapp = 0
    av_knapp = 0

#stoppen encodere
encoder.close()
```

C Kode til touch-skjerm

Denne koden er generert av språkmodellen ChatGPT (OpenAI 2024).

```
import tkinter as tk

from threading import Thread

import time

class EncoderThread(Thread):

    def __init__(self, gui):

        super().__init__()

        self.gui = gui

        self.running = False

        self.value = 0

    def run(self):

        self.running = True

        while self.running:

            # Simulert verdi fra encoder,
            dette må erstattes med verdier fra enkoder

            time.sleep(0.5) # Simulerer oppdatering hvert 0.5 sekund

            self.value += 1
```

```
        self.gui.update_encoder_value(self.value)

def stop(self):

    self.running = False

class GUI:

def __init__(self, root):

    self.root = root

    self.root.title("Encoder GUI")

    self.encoder_value = tk.StringVar()

    self.encoder_value.set("0")

    self.label = tk.Label(root, textvariable=self.encoder_value,
font=("Helvetica", 24))

    self.label.pack(pady=20)

    self.start_button = tk.Button(root, text="Start Encoder",
command=self.start_encoder)

    self.start_button.pack(pady=10)
```

```
self.stop_button = tk.Button(root, text="Stop Encoder",
command=self.stop_encoder)

self.stop_button.pack(pady=10)

self.marker_button = tk.Button(root, text="Marker Sveis",
command=self.marker_sveis)

self.marker_button.pack(pady=10)

self.tving_button = tk.Button(root, text="Tving Plassering",
command=self.tving_plassering)

self.tving_button.pack(pady=10)

self.plasser_merke_button = tk.Button(root, text="Plasser Merke",
command=self.plasser_merke)

self.plasser_merke_button.pack(pady=10)

self.encoder_thread = None

def start_encoder(self):

    if self.encoder_thread is None or not self.encoder_thread.is_alive():

        self.encoder_thread = EncoderThread(self)
```

```
        self.encoder_thread.start()

def stop_encoder(self):

    if self.encoder_thread:

        self.encoder_thread.stop()

def marker_sveis(self):

    # Lagrer encoder-verdien i dette oeyeblikket (simulert)

    print("Marker Sveis - Lagrer encoder-verdien:",
          self.encoder_value.get())

def tving_plassering(self):

    # Lagrer encoder-verdien i dette oeyeblikket (simulert)

    print("Tving Plassering - Lagrer encoder-verdien:",
          self.encoder_value.get())

def plasser_merke(self):

    # Gir en kommando som aktiverer en LED (simulert)

    print("Plasser Merke - Aktiverer LED")

def update_encoder_value(self, value):
```

```
self.encoder_value.set(str(value))
```

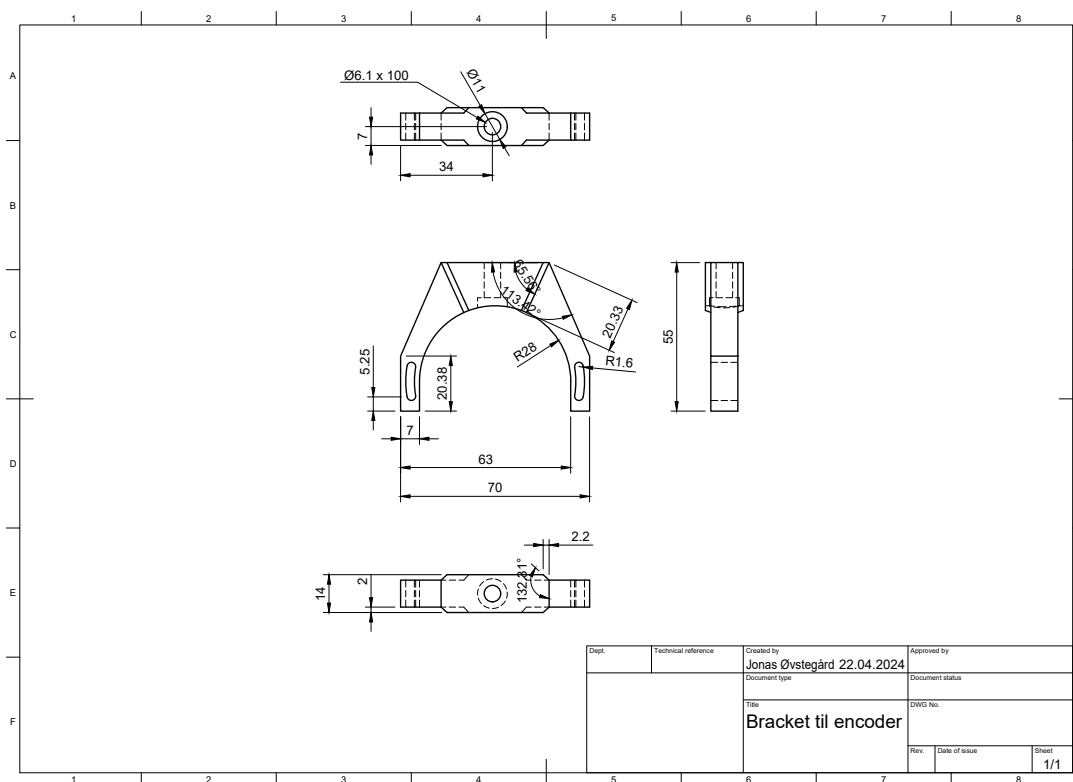
```
if __name__ == "__main__":
```

```
    root = tk.Tk()
```

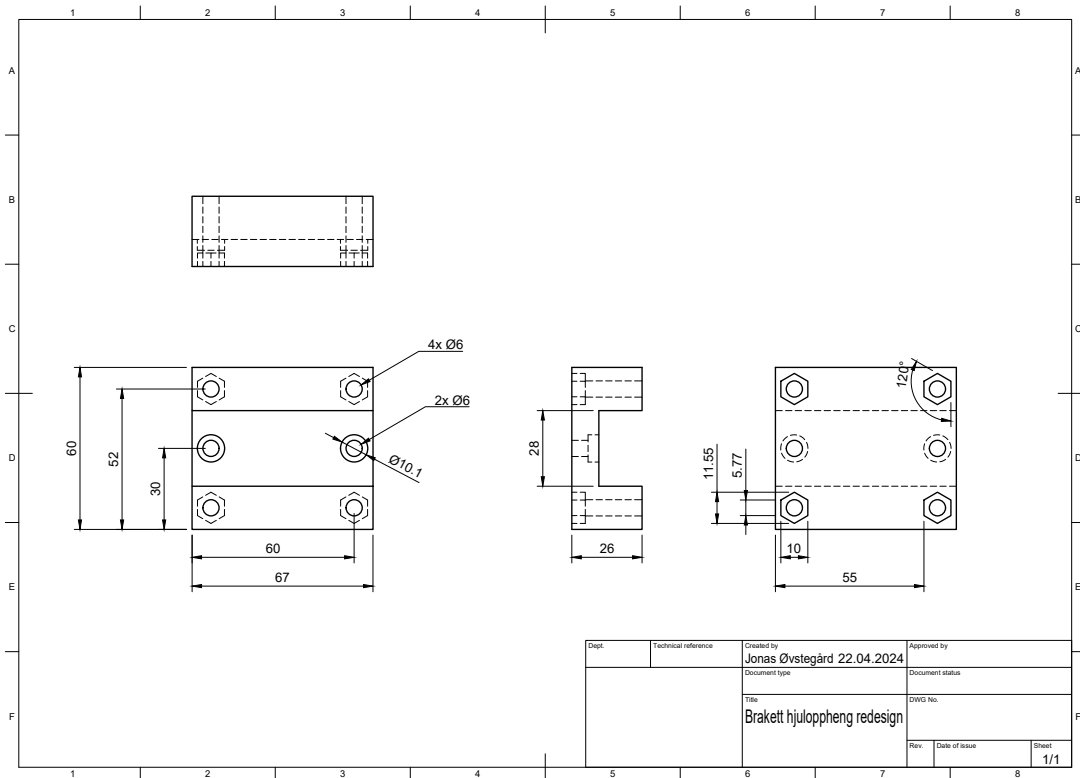
```
    gui = GUI(root)
```

```
    root.mainloop()
```

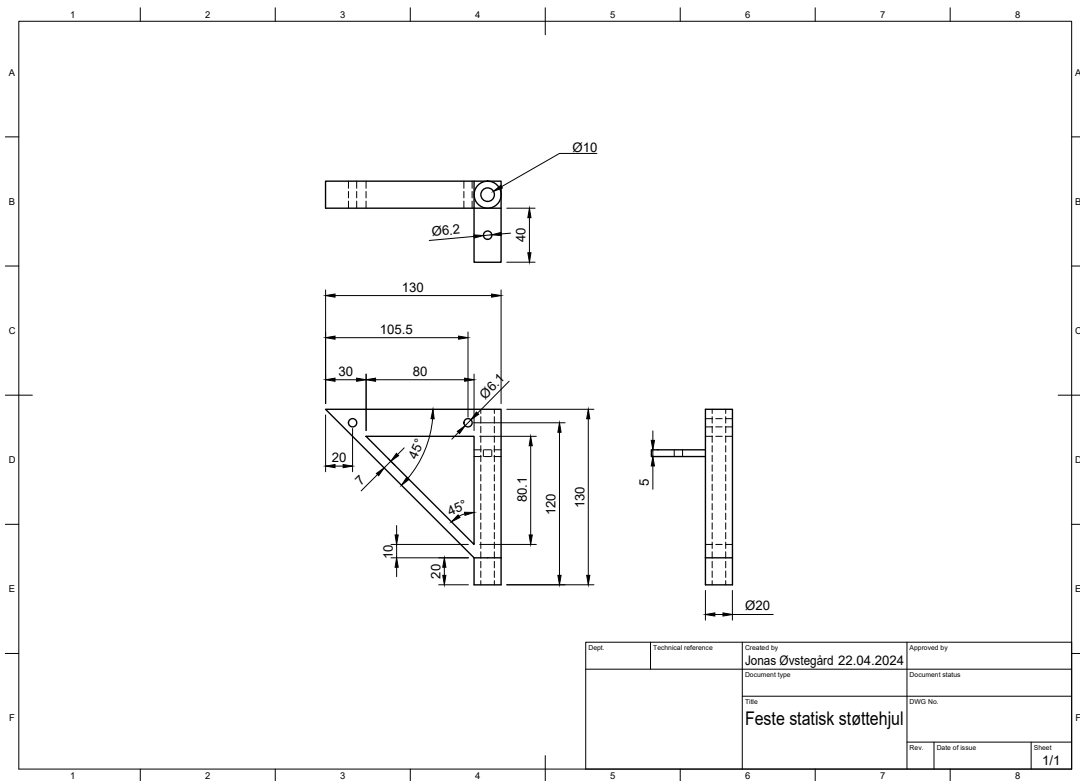
D Maskintegninger



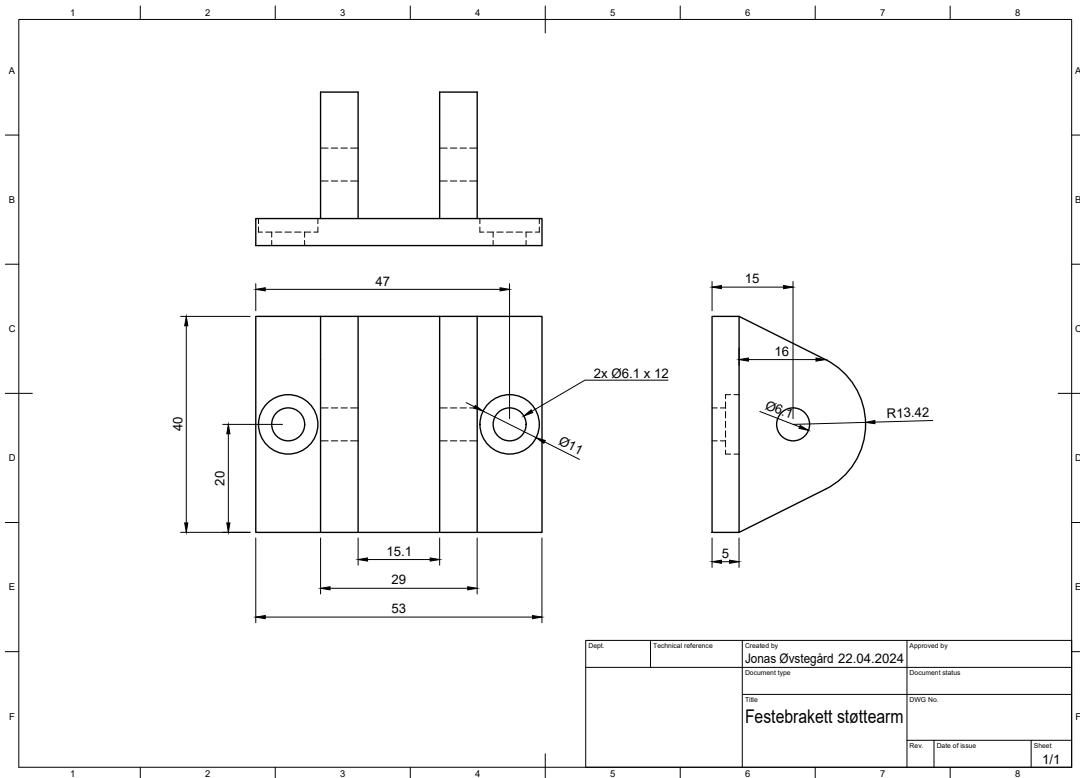
Braketten til encoderen



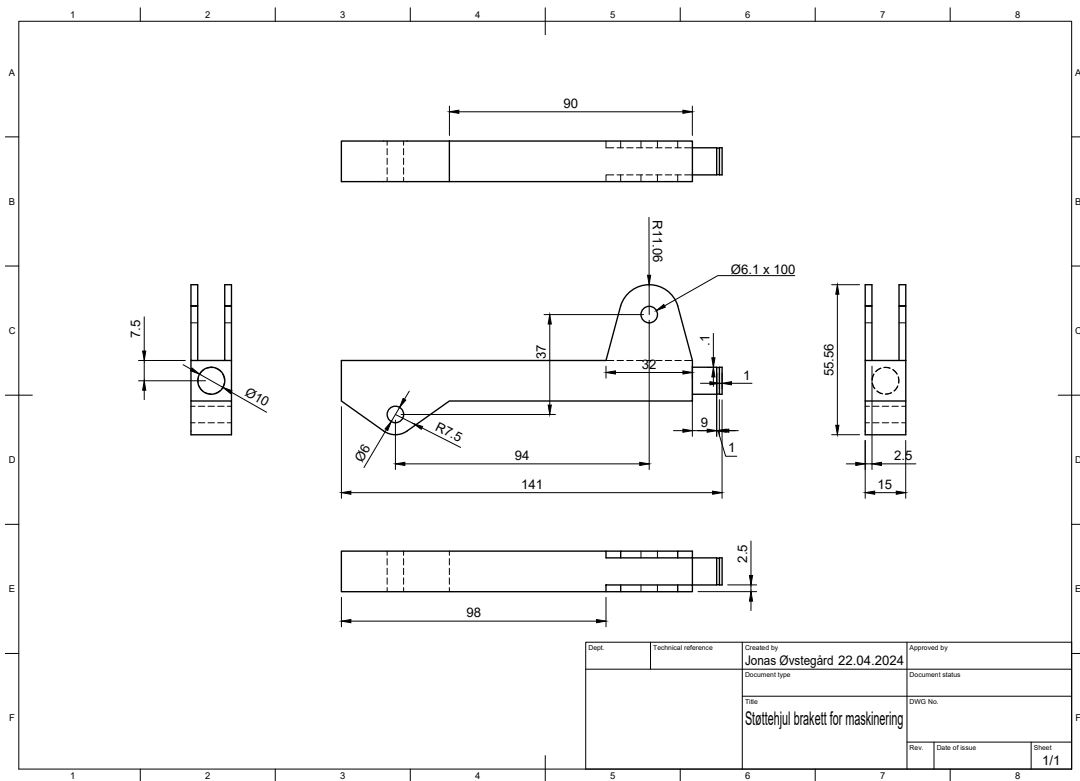
Brakett hjuloppeng



Braketten til encoderen

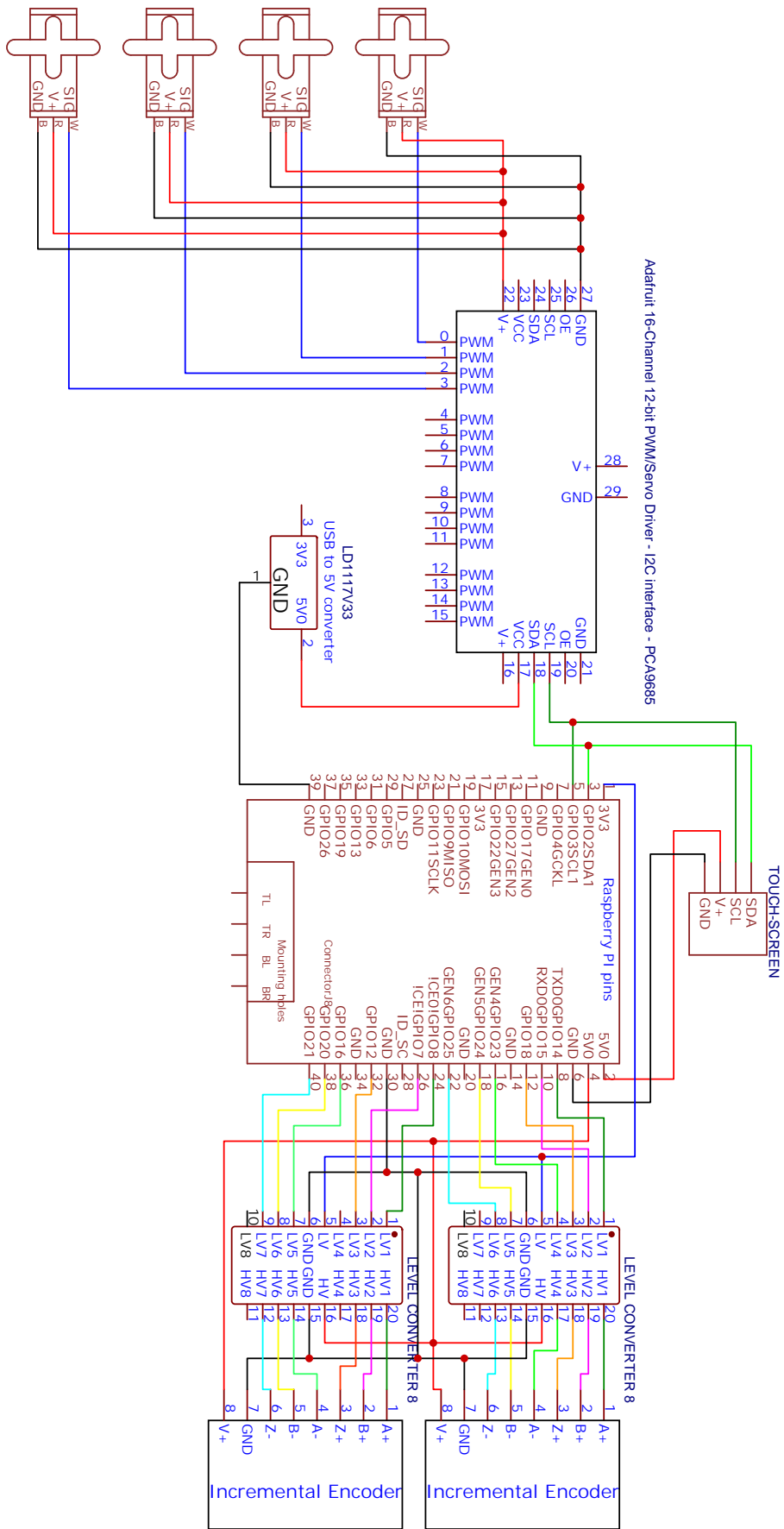


Braketten til encoderen



Braketten til encoderen

E Koblingsoppsett



F Deleliste

Komponent	Antall	Vekt stk (g)	Vekt sum	Pris per stk	Pris sum
Elektronisk:					
Raspberry Pi 5	1	46	46	1695	1695
Encoder	2	250	500	2751,17	5502,34
Servomotor	4	40	160	130	520
USB til 5v converter	1	8	8	65	65
PWM hatt	1	11,2	11,2	319	319
Touch screen	1	336	336	995	995
Touch screen kabel	1	12	12	69	69
Level converter	3	2	6	62,28	186,84
GPIO stacking header	1	5	5	49	49
Servokabel	2	26	52	104	208
Servoplugg	2	5	10	126	252
Powerbank	1	234	234	1190	1190
USB C kabel	2	56	112	179	358
Mekanisk:					
Målehjul	4	50	200	528,99	2115,96
Kulelager "pillowcase"	8	77	616	302	2416
Aksling 10mm	1	50	50	26,18	26,18
Aluprofil 1462mm	2	2193	4386	649,1	1298,2
Aluprofil 400mm	2	600	1200	157,25	314,5
Aluprofil 580mm	2	870	1740	324,55	649,1
Festepunkt til aluprofil (bag med 10)	1	80	80	398,97	398,97
Festepunkt til aluprofil (bag med 10)	1	80	80	110,33	110,33
Self tapping screw (bag med 10)	1	80	80	99,88	99,88
Hjørnekobling til aloprofiler	4	150	600	173	692
Cover (bag med 10)	1	50	50	113,4	113,4
Gassfjær 200N	2	200	400	474	948
Øye for gassfjær	4	20,3	81,2	92	368
Filament - 3D - printing	2	1000	2000	219	438
Spraymaling	4	470	1880	234	936
Kulelager	4	19	76	25,52	102,08
Bremsevaier	2	100	200	160	320
		Sum	15211,4		22755,78

