



CHALMERS



Utveckling av skalmodell som testbädd för autonoma lastbilssystem

Design och konstruktion av två stycken dragfordon-semitrailer kombinationer med hög körprecision för att möjliggöra tester av själv- och samkörning

Kandidatarbete inom system- och reglerteknik

Oskar Höglund
Hampus Johansson
Lukas Karlhager
Arvid Larsson
William Nordkvist
Felix Persson

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2024

Utveckling av skalmodell som testbädd för autonoma lastbilssystem

Design och konstruktion av två stycken dragfordon-semitrailer
kombinationer med hög körprecision för att möjliggöra tester
av själv- och samkörning

Oskar Höglund
Hampus Johansson
Lukas Karlhager
Arvid Larsson
William Nordkvist
Felix Persson



CHALMERS

Institutionen för Elektroteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024

Utveckling av skalmodell som testbädd för autonoma lastbilssystem

Design och konstruktion av två stycken dragfordon-semitrailer kombinationer med hög körprecision för att möjliggöra tester av själv- och samkörning

OSKAR HÖGLUND
HAMPUS JOHANSSON
LUKAS KARLHAGER
ARVID LARSSON
WILLIAM NORDKVIST
FELIX PERSSON

© OSKAR HÖGLUND, HAMPUS JOHANSSON, LUKAS KARLHAGER, ARVID LARSSON, WILLIAM NORDKVIST, FELIX PERSSON, 2024.

Handledare: Pavel Anistratov, Institutionen för Elektroteknik
Examinator: Jonas Fredriksson, Institutionen för Elektroteknik

Kandidatuppsats 2024, EENX16-24-05
Institutionen för Elektroteknik
Avdelningen för system- och reglerteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telephone +46 31 772 1000

Omslag: De två lastbils ekipagen som projektet resulterar i sammankopplade.

Abstract

In a world with rising demands for goods, the transportation industry faces increasing pressure. In Sweden, trucks constitute a significant portion of domestic transportation, making their efficiency pivotal in the transformation of the transport sector into a sustainable one. This project focused on designing and constructing two scale models of truck and semitrailer combinations, intended as a testbed for future research on autonomous trucks. Precision driving was prioritized to ensure consistent and dependable test results. Additionally, a docking solution was developed to facilitate testing road train configurations comprising independent, autonomous trucks.

The final model, scaled at 1:12, could travel at speeds between 2.1 cm/s and 28 cm/s. It featured a carrying capacity of 10 kg, the ability to dock with another vehicle, and a maximum steering angle of 42.5° , with a $\pm 2.0^\circ$ margin of play. Designed as a testbed, it has been equipped with computer vision and lane detection capabilities, successfully achieving its intended goal.

Keywords: Autonomous, Truck, Scale model, Research platform, Sustainable development, Transport, High precision, Docking, Ackermann steering.

Förord

Denna rapport är resultatet av kandidatarbete EENX16-24-05 vid institutionen för elektroteknik på Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg. Examinator för arbetet är Jonas Fredriksson, professor i forskargruppen Mekanik vid avdelningen för System- och reglerteknik. Handledare för arbetet är Pavel Anistratov, som är postdok i forskargruppen Mekanik vid avdelningen för System- och reglerteknik.

Gruppen som arbetat med detta projekt vill först och främst tacka vår handledare, Pavel Anistratov, för all hjälp genom hela projektet. Vi vill även tacka Fredrik Von Corswant på Chalmers Revere Lab för ett givande och informativt studiebesök. Dessutom vill vi tacka Rikard Karlsson för all hjälp vid tillverkningen av hjulen. Ett stort tack riktas även till Filip Djäknegren och Marcus Börne för all hjälp vid tillverkningen av karossen. Slutligen vill vi tacka Reine Nohlberg och Jan Bragée vid Prototyplabbet för all deras hjälp och engagemang under tillverkningsprocessen.

Oskar Höglund, Hampus Johansson, Lukas Karlhager,
Arvid Larsson, William Nordkvist, Felix Persson

Göteborg, maj 2024

Lista över förkortningar och benämningar

Nedan finns en lista på vanligt förekommande förkortningar samt benämningar på tekniska termer som förekommer i projektet.

Förkortningar

CAD	(Computer-Aided Design) Datorstödd konstruktion av modeller.
ESC	(Electronic Speed Controller) Elektrisk komponent som styr elmotorers hastighet genom spänningsreglering.
MPC	(Model Predictive Control) Avancerad reglerteknisk metod som använder sig av ett systems dynamiska modell för att förutse framtida händelser.
PWM	(Pulse Width Modulation) En teknik för att generera ett kontinuerligt pulståg genom att snabbt växla mellan hög och låg nivå på en digital signal.

Benämningar

Draganordning	En komponent som gör att fordonet kan låsa fast och dra bakomgående fordon.
Dragfordon	Ett fordon avsett att dra last, utrustat med kopplingsanordning för att ansluta till semitrailer.
Dragstång	En stel arm som ansluter in i draganordningen för att koppla bakre fordon men främre fordon.
Lastbilsekipage	Kombination av dragfordon och släpkärria som är ihopkopplade för att transportera gods.
Pivåkoppling	En koppling bestående av en vändskiva och en pivåtapp.
Pivåtapp	En komponent som ansluts i vändskivan och låser semitrailern med dragfordonet.
Raspberry Pi	En kraftfull enkortsdator med programmerbara GPIO (General Purpose Input/Output) pinnar som möjliggör anslutning och styrning av externa enheter och sensorer.
Semitrailer	Synonymt med påhängsvagn. Typ av släpkärria vars vikt endast delvis stöds på sina egna hjul.
Vändskiva	En komponent bak på ett dragfordon varpå semitrailern vilar.

Variabeldeklaration

Nedan presenteras de variabler som förekommer i rapporten.

Tillstånd

v_0	Starthastigheten för dragfordonet vid uppmätning av dragfordonets arbetsområde
$v_{\text{dragfordon,max}}$	Dragfordonets maximala hastighet
v_{max}	Maximalt hastighetskrav från kravspecifikationen
v_T	Sluthastigheten för dragfordonet vid uppmätning av dragfordonets arbetsområde
x_S	X-koordinat för semitrailers bakkant
x_D	X-koordinat för fäste mellan dragfordon och semitrailer
y_S	Y-koordinat för semitrailers bakkant
y_D	Y-koordinat för fäste mellan dragfordon och semitrailer
x	Position i x-led för dragfordonet
\dot{x}	Hastighet i x-led för dragfordonet
\ddot{x}	Acceleration i x-led för dragfordonet
$\delta_{\text{inner}}, \delta_{\text{ytter}}$	Vinkel från cirkelcentrum för inner- respektive ytterhjul
ω_{motor}	Motorns vinkelhastighet
$\omega_{\text{motor,max}}$	Motorns maximala vinkelhastighet
$\omega_{\text{hjul,max}}$	Dragfordonets hjuls maximala vinkelhastighet
φ_v	Vinkel mellan dragfordon och semitrailer

Fysikaliska storheter

A	Avstånd mellan främre hjulaxel till yta vid vinkelmätning
B	Dragfordonets spårbredd
d	Dragfordonets hjulbas
E_{total}	Batteriets totala upplagade energi
F_D	Dragfordonets luftmotstånd
F_{fr}	Dragfordonets rullmotstånd från däckfriktion
F_{max}	Maximal kraft för dragfordonets arbetsområde
F_{rull}	Dragfordonets rullmotstånd från drivlinans friktion
$F[k]$	Sampling av kraften $F(t)$

$F(t)$	Applicerad kraft på dragfordonet
I_{\max}	Motorns maximala ankarström
I	Motorns ankarström
$l_{\text{inner}}, l_{\text{ytter}}$	Avstånd mellan ljuspunkt och mätskalans mittpunkt vid vinkelmätning för inner- respektive ytterhjul
L_S	Längden mellan pivåtappen till semitrailerns bakkant
m	Dragfordonets totala massa inklusive semitrailer och last
M_{rull}	Dragfordonets rullmotstånd från drivlinans friktion i vridmoment
P_{\max}	Maximal effekt för dragfordonets arbetsområde
$P_{\text{motor,max}}$	Motorns maximalt kontinuerligt utvecklade effekt
P_{total}	Ett dragfordons uppskattade effektförbrukning
Q	Batteriets kapacitet
R	Ankarkretsens resistans i motorn
$t_{\text{batteritid}}$	Ett dragfordons beräknade batteritid
$T_{\text{dragfordon,max}}$	Maximalt vridmoment från beräknat maximalt kraftkrav för dragfordonet
T_{effekt}	Motorns maximala vridmoment vid en specifik arbetspunkt givet av ω_{motor} och maximala effekten P_{\max}
$T_{\text{elektrisk}}$	Vridmoment från motorn vid en specifik arbetspunkt givet ω_{motor} och U_{motor}
T_{kippt}	Motorns kippmoment
T_{motor}	Motorns vridmoment
$T_{\text{motor,max}}$	Motorns maximala vridmoment
U_{motor}	Motorns ankarspänning
U_{nominell}	Batteriets nominella spänning
W	Avstånd mellan pivotpunkter för höger och vänster hjul
α	Styrarmens vinkel
ϵ	Längd av styrarmar
λ_t	Motorns spänningskonstant

Parametrar

h	Samplingsintervallet till samplingsfrekvensen för uppmätning av dragfordonets arbetsområde
i	Utväxling
k	En specifik tidpunkt över det diskreta intervallet $[0 : N]$
$n_{\text{utväxling}}$	Drivlinans totala utväxling
N	Totalt antal samplingspunkter över uppmätningar av dragfordonets arbetsområde
t	En specifik tidpunkt över det kontinuerliga intervallet $[0 : T]$
T	Samplingstid för uppmätning av dragfordonets arbetsområde

Innehåll

Förkortningar	vii
Variabler	ix
Figurer	xv
Tabeller	xvii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.1.1 Tidigare arbeten	2
1.1.2 Brister hos den tidigare skalmodellen	2
1.1.3 Vikten av en förutsägbar modell	3
1.2 Syfte	3
1.3 Problembeskrivning	4
1.4 Avgränsningar	4
1.5 Interaktion med parallell projektgrupp	4
2 Teori	7
2.1 Ackermann-styrning	7
2.2 Differentialväxel	9
2.3 Semitrailerns position relativt dragfordonet	9
3 Konstruktion av skalmodell	11
3.1 Arbetsgång	11
3.2 Kravspecifikation	11
3.3 Konstruktion av dragfordon	12
3.3.1 Dragfordonets chassi	13
3.3.2 Layout av komponenter	14
3.3.3 Dragfordonets kaross	15
3.4 Mekaniskt styrsystem	16
3.5 Drivlina	17
3.5.1 Dragfordonets arbetsområde	17
3.5.2 Motordimensionering och estimering av motorparametrar	22
3.5.3 Drivlinans initiala utväxling	22
3.5.4 Drivlinans utväxling med plantväxel	25
3.5.5 Konstruktion av drivlinan	25

3.6	Dragfordonets och semitrailerns hjul	26
3.6.1	Konstruktion av hjulen	26
3.7	Konstruktion av semitrailer	29
3.7.1	Semitrailerns bärande konstruktion	29
3.7.2	Semitrailerns hjulupphängning	30
3.7.3	Semitrailerns lastutrymme	31
3.8	Koppling mellan dragfordon och semitrailer	32
3.8.1	Konstruktion av pivåkoppling	32
3.8.2	Pivåkopplingens funktion	33
3.9	Automatiskt dockningssystem	33
3.9.1	Konstruktion av dockningssystemet	34
3.9.2	Dockningssystemets ihop- och isärkoppling	35
3.10	Elkonstruktion	36
3.10.1	Designval och komponenter	36
3.10.2	Koppling av komponenter	36
3.10.3	Sensorer	37
4	Testmetodik	39
4.1	Skala och vikt	39
4.2	Hastighet	39
4.3	Däckfriktion	39
4.4	Mekaniskt styrsystem	40
4.5	Elektronik	41
5	Resultat	43
5.1	Färdig skalmodell	43
5.2	Skala och vikt	44
5.3	Mekaniskt styrsystem	44
5.4	Maxlast och hastighet	45
5.5	Däckfriktion	45
5.6	Dockningsanordning	46
5.7	Elektronik	46
5.8	Kostnad	46
6	Diskussion	47
6.1	Utvärdering av resultat	47
6.1.1	Skala och vikt	47
6.1.2	Mekaniskt styrsystem	47
6.1.3	Hastighet	47
6.1.4	Däckens friktion	48
6.1.5	Elektronik	48
6.1.6	Kostnad	48
6.2	Vidareutveckling	49
6.2.1	Hastighetsmätning och reglering	49
6.2.2	Vinkelgivare	49
6.2.3	Styrbar dragstång	49
6.2.4	Fjädring	50

6.2.5	Utökad funktionalitet hos semitrailer	50
6.2.6	Automatisk på- och avkoppling av trailer	50
6.3	Sociala och etiska aspekter	50
6.3.1	Sociala aspekter	51
6.3.2	Etiska aspekter	51
7	Slutsats	53
	Referenser	55
A	Komponentlista	I
B	Metod vid gjutning av däck	III

Figurer

1.1	Illustration av två sammankopplade ekipage bestående av dragfordon och semitrailer.	4
2.1	Illustration av problemet med linjär styrning.	7
2.2	Illustration av det geometriska villkoret för ideal styrning.	8
2.3	Illustration av två olika Ackermann-styrningskonfigurationer.	9
2.4	Illustration av vinkeln mellan dragfordonet och semitrailern och den relativa positionen mellan dem.	10
3.1	Den radiostyrda bilen <i>Axial SCX10</i>	13
3.2	Dragfordonets bottenplatta i CAD.	13
3.3	3D-modell av dragfordonet i CAD.	14
3.4	Schematisk bild över dragfordonets olika komponenter.	15
3.5	Färdig kaross i vakuumformad plast.	16
3.6	Främre hjulupphängningen innan och efter modifieringar.	16
3.7	Förenklad friläggning av dragfordonet.	18
3.8	Uppmätta värden av kraften som krävdes för att dra dragfordonet i en konstant hastighet	19
3.9	Tio skattade värden av dragfordonets rullmotstånd	20
3.10	Jämförelse av dragfordonets arbetsområde beroende på accelerationskrav.	21
3.11	Elmotorns initiala arbetsområde.	24
3.12	Elmotorns och dragfordonets arbetsområden med den initiala utväxlingen.	25
3.13	Elmotorns och dragfordonets arbetsområden med tillagd planetväxel.	26
3.14	3D-modell av fälgarnas baksida i CAD.	27
3.15	Gjutform för både dragfordon- och semitrailerdäck med fälg och tillhörande trattar	28
3.16	Ett färdigt hjul till dragfordonet.	28
3.17	Den delen av semitrailerns stomme som tillverkats i 20 mm x 20 mm fyrkantör.	29
3.18	Exploderad vy av hjulupphängningen i CAD.	30
3.19	Demonstration av boggikonstruktionens funktion i CAD.	31
3.20	Containern i skala 1:12 av en verklig 40 fots container.	31
3.21	Pivåkopplingens delar i CAD.	32
3.22	Placering av pivåkoppling mellan dragfordon och semitrailer.	33
3.23	Dockningssystemets två huvuddelar.	34

3.24	Skiss över hur dockningssystemet fungerar.	36
3.25	Blockschema av dragfordonets elektronik.	37
3.26	Dragfordonets sensorfäste med monterad kamera och ultraljudssensor.	38
4.1	Illustration av uppställningen som användes vid mätning av styrvinklar.	41
5.1	Modell av semitrailer i skala 1:12 som projektet har lett fram till.	43
5.2	Modell av dragfordon, utan kaross, i skala 1:12 som projektet har lett fram till.	43
5.3	Två sammankopplade ekipage.	43
5.4	Båda däckens vinklar i förhållande till varandra för dragfordonets styrsystem.	44

Tabeller

3.1	Skalmodellens kravspecifikation.	12
3.2	Sammanställning över dragfordonets huvudsakliga komponenter.	15
3.3	Utväxling för respektive komponent i drivlinan.	23
5.1	Viktmätning av den färdiga skalmodellen.	44
5.2	Tabell över uppmätt glapp kring ett antal styrvinklar.	45
5.3	Maximal hastighet med och utan last.	45
5.4	Minimal hastighet med och utan last.	45
5.5	Däckens statiska respektive dynamiska friktionskraft.	46

1

Inledning

Lastbilar används flitigt för att transportera varor inom Sverige. År 2022 utfördes 43 miljoner sådana transporter, med en total godsvikt på 477 miljoner ton [1]. Dessutom har antalet inrikes lastbilstransporter ökat med 10 % mellan 2012 och 2022. Utav dagligvaruhandelns transporter inom Sverige utförs hela 99 % med lastbil och mängden av denna godstyp förväntas öka [2]. Denna stora och ökande mängd lastbilstransporter ställer krav på transportsektorn.

För att möta den ökande efterfrågan blir fordon för godstransport allt längre. Sverige började år 2023 tillåta lastbils kombinationer som är 34,5 meter långa, vilket förväntas resultera i effektivare transporter då längre lastbils ekipage kan transportera samma mängd gods med färre lastbilar [3]. Det förväntas även att utsläppen från den tunga lastbilstrafiken minskar med mellan 4–6 % som en följd av detta.

Transportsektorn befinner sig i ett utvecklingsstadium där effektivisering och elektrifiering är centralt i att driva branschen framåt. Därför studeras och testas en mängd nya lösningar inom området. Utöver de längre lastbils kombinationerna utforskas även självkörande lastbilar som en av lösningarna. Målet med detta är att eliminera den mänskliga faktorn vid körningen.

Ur effektiviseringssynpunkt erbjuder autonoma lastbilar flera fördelar jämfört med lastbilar som körs av mänskliga förare. En betydande fördel är att transportföretag inte behöver ta hänsyn till lagstadgade viloperioder med autonoma lastbilar, vilket är nödvändigt med mänskliga förare [4]. Genom att eliminera behovet av viloperioder kan transportavbrott minimeras, vilket i sin tur kan leda till kortare leveranstider.

Elektrifieringen av transportflottan ställer höga krav på energieffektivitet. När lastbilar blir självkörande öppnas nya spännande möjligheter för att öka energieffektiviteten genom autonom konvojbildning. Längre lastbils kombinationer minskar det totala luftmotståndet och därmed energiförbrukningen. Om ekipagen kan utföra denna dockning autonomt möjliggörs dessutom scenarion där lastbilar med olika start- och slutpunkter kan bilda längre fordonståg på större vägar där de färdas gemensamt.

1.1 Bakgrund

På senare tid har nya, autonoma lastbils lösningar framförts. Ett exempel på detta är Volvo Lastvagnars forskningsprojekt Vera, där ett helautonomt dragfordon har

konstruerats [5]. Syftet med forskningsprojektet Vera är att utforska möjligheterna för tillämpning av självkörning inom transportsektorn. Forskningsprojektets fordon förväntas att både öka effektiviteten och kapaciteten för godstransporter [6].

1.1.1 Tidigare arbeten

Detta arbete bygger bland annat på de tidigare kandidatarbeten som utförts på institutionen för elektroteknik, E2, på Chalmers tekniska högskola inom detta område.

I projektets första iteration år 2020 skapades en skalmodell av en lastbil i form av en dolly och ett släp [7]. Där dolly är en typ av släpkärria som är avsedd att vara styraxel för en påhängsvagn. Arbetet syftade till att underlätta manövrering av lastbilar i skarpa kurvor, vilket gjordes genom att simulera linjeföljning. Simuleraingarnas resultat applicerades sedan på dollyns reglersystem bestående av en PID-regulator. Med reglersystemet och IR-sensorer testades linjeföljning och kurvtagning på skalmodellen. Slutsaten blev att en dolly med styregenskaper kan underlätta för lastbilar att klara av snäva kurvor och därmed kan längre lastbilskombinationer användas.

Projektet året därefter använde samma skalmodell som byggts år 2020 med mindre modifikationer [8]. Fokus låg nu istället på att utveckla en algoritm för backning längs en förutbestämd vägbana. Vid simulering av backning längs en förutbestämd vägbana kunde banan följas med hög precision. Vid fysisk testning på skalmodellen bekräftades resultat för simuleringen dock med svårigheter att identifiera vägbanan vid längre körning av skalmodellen. Optiska flödessensorer och en magnetisk rotationsensor användes för positionering.

2022 års projekt hade samma fokus som 2021 års projekt, att utveckla en algoritm för backning längs en förutbestämd vägbana [9]. Skalmodellen modifierades detta året med nya däck och nya komponenter, bland annat batteri, kamera och potentiometer, vilket är ett slags reglerbar motstånd som främst används för spänningsreglering i kretsar men som även kan tillåta vinkelmätning. En kamera används för att bestämma dollyns position genom att läsa av AruCo-markörer. Simuleringar gjordes återigen för backning längs en förutbestämd vägbana och de var lyckade. Fysisk testning på skalmodellen verifierade resultaten men med större osäkerhet och funkade inte som tänkt vid längre avstånd från AruCo-markörerna. Dessutom kunde inte släpet följa vägbanan.

Året därefter uppdaterades positioneringssystemet genom att använda tre kameror istället för en [10]. För att manövrera skalmodellen från den givna positionen användes tidigare en PID-regulator, men i detta projektet undersöktes istället *Model Predictive Control* (MPC). Modifikationer på skalmodellen gjordes också för att förbättra styrningen. På grund av tidsbrist hans inte tester på positioneringssystemet och skalmodellens styrning med.

1.1.2 Brister hos den tidigare skalmodellen

Ett återkommande problem med den tidigare skalmodellen var den mekaniska styrningen. Styrningen hade ett mekaniskt glapp vilket ledde till att prototypens förmå-

ga att ta kurvor och manövrerbarhet vid backning försämrades. Detta var ett stort problem när prediktiva reglersystem som exempelvis MPC skulle användas. Dessutom var det maximala styrutslaget endast 27° , vilket var lägre än det önskade 45° . Prototypen som byggts och använts i föregående arbeten byggdes utifrån ett färdigt chassi till en radiostyrd monstertruck. Denna typ av bil är designad med kraftig stötdämpning och för att gå fort vilket inte överensstämmer med detta projektets planerade egenskaper.

Dragfordonets dimensioner i de tidigare arbeten stämmer inte överens med dimensionerna av en riktigt lastbil. När dimensionerna är skalenliga kan sedan tester och beräkningar som gjorts på prototypen lättare implementeras i verkligheten. Därför är korrekta dimensioner av stor vikt.

Den ursprungliga skalmodellen bestod enbart av ett dragfordon och en semitrailer. Som nämns tidigare i Kapitel 1, är det en fördel med längre fordonskombinationer och därför är ökningen av antalet ekipage en viktig aspekt att utveckla vidare.

1.1.3 Vikten av en förutsägbar modell

En central del av reglerteknik är det reglerade systemets dynamik. Dynamiken för ett system beskrivs ofta med differentialekvationer som försöker förklara hur systemets tillstånd kommer förändras med tiden. Inom området reglerteknik är utvecklingen av robusta reglersystem beroende av kvaliteten på de underliggande fysiska modellerna då säkerhetsmarginalerna kommer vara annorlunda från beräknade säkerhetsmarginaler givet fel fysisk modell. Därför är det till exempel viktigt att styrningen av skalmodellen har ett så litet mekaniskt glapp som möjligt för att tillåta ett så bra reglersystem för styrningen som möjligt.

Modellernas trovärdighet kan variera på grund av bland annat glapp och dålig byggkvalitet, då blir även representationen av den verkliga dynamiska processen sämre vilket leder till osäkerheter eller felaktigheter vid simulering av systemet. En osäker dynamisk modell kan även bli ett större problem vid mer invecklad reglering.

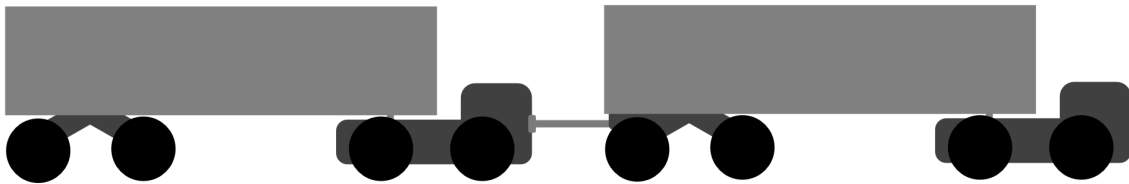
Robusta reglerstrategier, såsom MPC, är starkt beroende av förutsägbara modeller för effektiv systemreglering. MPC använder den dynamiska modellen för att simulera systemets beteende iterativt baserat på en given styrsignal och strävar efter att optimera en kostnadsfunktion för att generera en optimal styrningssignal.

Om modellen inte lyckas fånga systemets dynamik korrekt så minskas prestandan för MPC och liknande regulatorer. I sådana scenarier kan regulatorn producera suboptimala eller till och med instabila lösningar, eftersom den verkar under antagandet att modellen korrekt representerar systemets dynamik. Därför är det av yttersta vikt att säkerställa förutsägbarheten och trovärdigheten hos fysiska modeller för att tillåta tillämpningen av mer avancerade reglerstrategier i praktiska system.

1.2 Syfte

Projektet syftar till att konstruera och utvärdera två skalmodeller av lastbils ekipage bestående av dragfordon och semitrailer. Dessa ekipage ska fungera som testplatt-

formar för framtida själv- och samkörningsfunktioner vars mål ännu är okända. Samkörning mellan två ekipage illustreras i Figur 1.1.



Figur 1.1: Illustration av två sammankopplade ekipage bestående av dragfordon och semitrailer.

1.3 Problembeskrivning

För att projektet ska uppfylla sitt syfte behöver en mängd utmaningar hanteras. Den övergripande utmaningen är att få ekipagens alla komponenter att fungera enskilt men även som del av ett sammansatt system. Den mekaniska styrningen behöver konstrueras för att möjliggöra noggrann styrning efter en referenssignal med god manövrerbarhet och svängförmåga. Drivlinan måste dimensioneras för att tillåta körning i lämpliga hastigheter och med önskad last. För att möjliggöra samkörningsfunktioner ska en automatisk dockningslösning konstrueras. Dessutom behöver skalmodellerna utformas för att tillåta enkel ombyggnation och användning av olika komponenter för att möta framtida projektarbetens behov.

1.4 Avgränsningar

Avgränsningarna i projektet har valts för att säkerställa att projektet är genomförbart inom dess tidsram och de resursbegränsningar som finns. Projektets avgränsningar är:

- Ekipaget kommer endast att framföras på plana inomhusgolv.
- Ekipaget kommer endast att framföras i låga hastigheter.
- Automatisk sammankoppling av de två ekipagen genomförs endast på raksträckor.
- Ekipagets plastiska materialdeformationer kommer inte att studeras.

1.5 Interaktion med parallell projektgrupp

Utvecklingen av den nödvändiga mjukvaran för autonom körning av dragfordonen utförs av en annan projektgrupp. Detta projekt lägger således inget fokus på mjukvaruutveckling, utan fokuserar endast på hårdvaran. Båda projektgrupperna arbetar

mot ett gemensamt mål: att utveckla två skalmodeller av autonoma lastbilar som kan köra självständigt och interagera med varandra.

Under arbetsprocessen har en kontinuerlig dialog funnits mellan hårdvarugruppen och mjukvarugruppen. För att säkerställa ett effektivt samarbete och framgångsrik arbetsgång har båda projekt grupperna gemensamma och individuella mål. Vid fördelningen av uppgifter inom projektet har hårdvarugruppen ansvarat för konstruktion och tillverkning två skalmodeller, som innefattar ett dragfordon och en semitrailer per skalmodell.

När alla mekaniska och elektroniska komponenter fungerar korrekt markerar det gränsen mellan hårdvara och mjukvara i projektet. Hårdvarugruppen ansvarar för att säkerställa så denna del av projektet blir korrekt utförd. Därefter tar mjukvarugruppen över projektet genom att implementera mjukvara på de färdiga ekipagen.

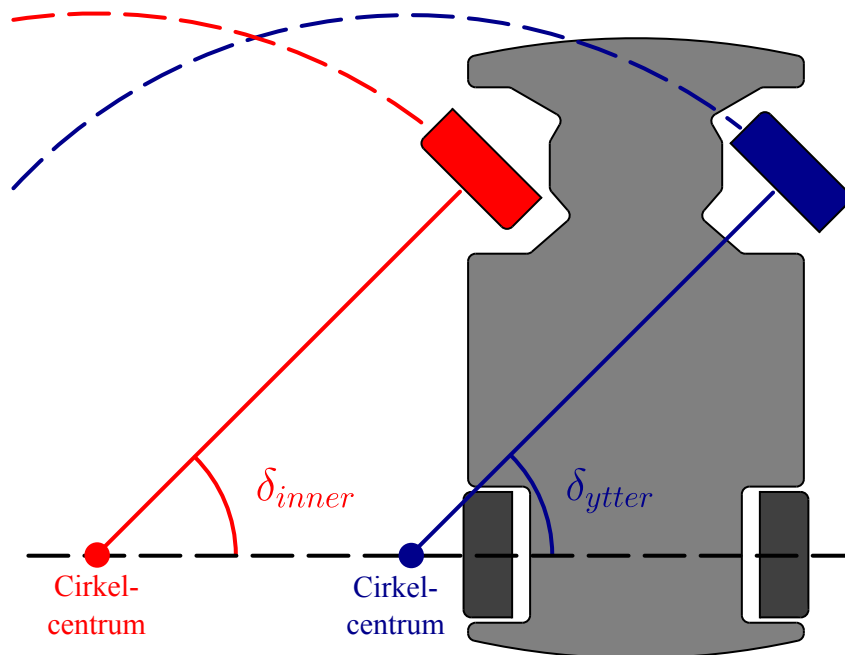
2

Teori

I detta kapitel förklaras relevanta teoretiska grunder som har använts i projektet. Teorierna har använts som grund för konstruktionsval genom projektet.

2.1 Ackermann-styrning

Ett fyrhjuligt fordon som likt Figur 2.1 har ett linjärt styrsystem kommer med ett problem. Höger- respektive vänsterhjul kommer att vinklas lika mycket vid svängar vilket leder till att ett av hjulen då kommer glida mot underlaget. Detta beror på att hjulen idealt sett behöver dela cirkelcentrum i en sväng, vilket linjära styrsystem inte är anpassade för.



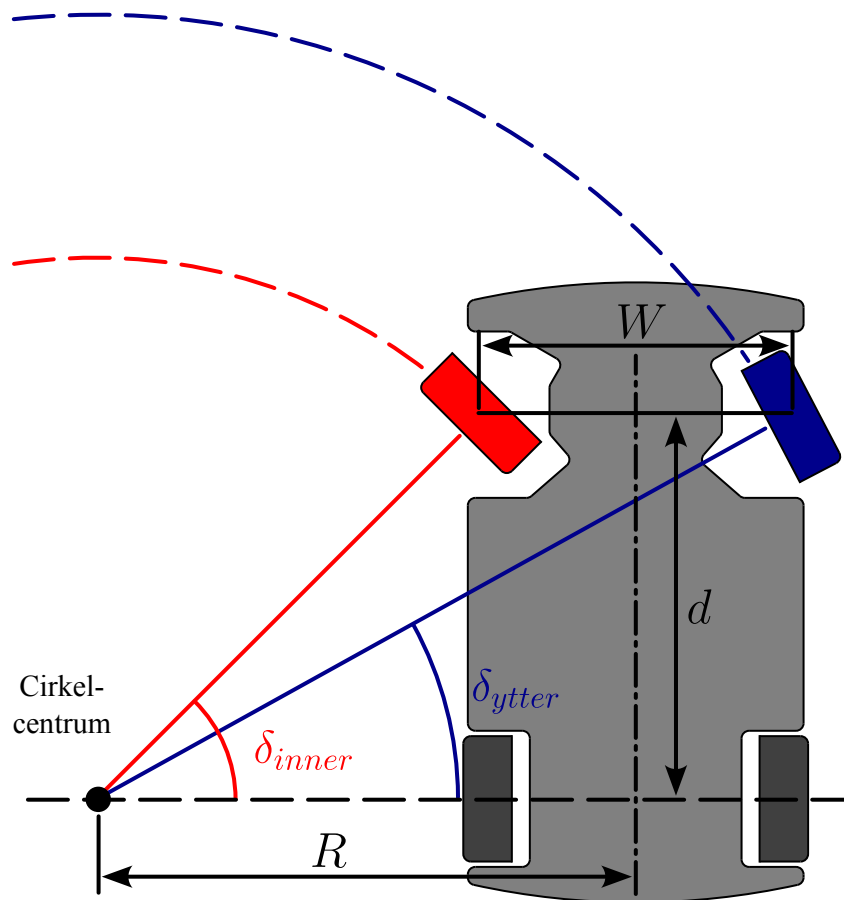
Figur 2.1: Illustration av problemet med linjär styrning. Hjulen delar inte cirkelcentrum i en sväng.

För att uppnå ideal styrning behöver villkoren för de ideala svängvinklarna uppfyllas. Med trigonometrin i Figur 2.2 och givet en svängradie R , kan de optimala svängvinklarna för ytter- respektive innerhjul räknas ut enligt

$$\delta_{\text{inner}} = \arctan\left(\frac{d}{R - \frac{W}{2}}\right) \quad (2.1)$$

$$\delta_{\text{ytter}} = \arctan\left(\frac{d}{R + \frac{W}{2}}\right) \quad (2.2)$$

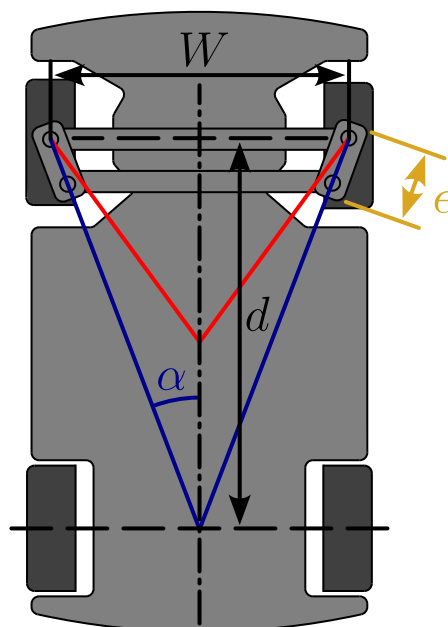
där d är längden mellan hjulaxlarna och W är avståndet mellan framhjulens respektive rotationsaxlar.



Figur 2.2: Illustration över det geometriska villkoret för ideal styrning. Hjulen delar cirkelcentrum i en sväng.

Att konstruera en styrgeometri som får hjulen att följa de optimala vinklarna är dock inte helt trivalt [11]. För att underlätta konstruktionen kan den så kallade Ackermann styrgeometrin användas, vilket ger en approximation av den ideala styrgeometrin. Den mekaniska konstruktionen liknar den i Figur 2.3, där styrparametrarna α , W och ϵ kan anpassas för att önskade egenskaper ska erhållas. Denna typen av styrgeometri är relativt enkel att konstruera, på bekostnad av att det inte går att åstadkomma ideal styrning.

Hur bra styregenskaper som kan åstadkommas beror på hur väl anpassade styrparametrarna är till styrningens användningsområde. Den traditionella Ackermann



Figur 2.3: Illustration av två olika Ackermann-styrningskonfigurationer. Blå linje motsvarar den traditionella konfigurationen.

konfigurationen illustreras med de blåa linjerna i Figur 2.3, och innebär att styrparametrarna anpassas så att styrsystemets pivotpunkter bildar två linjer som skär varandra vid centrum på den bakre hjulaxeln [11]. Styrvinklarna som erhålls med denna konfigurationen har ett relativt jämnt fel i relation till den ideala styrvinklarna, även över stora styrutslag. Om man ändrar styrparametrarna så att skärningspunkten flyttas, och således frångår den traditionella geometrin, får man ett annat beteende. Ett exempel på en sådan geometri illustreras med den röda linjen i Figur 2.3, där felet jämfört med de ideala styrvinklarna är mindre för små styrutslag, men blir väldigt stort när utslaget ökar.

2.2 Differentialväxel

En differentialväxel, eller differential, används för att dela upp ett drivande moment på två eller flera axlar. I ett fyrhjulsdrivet fordon tillåter detta att även drivande inner- och ytterhjul har olika hastigheter under svängningar. Minst ett hjul per axel hade annars behövt glida mot underlaget, vilket medför tröghet i styrning och förluster i drivningen.

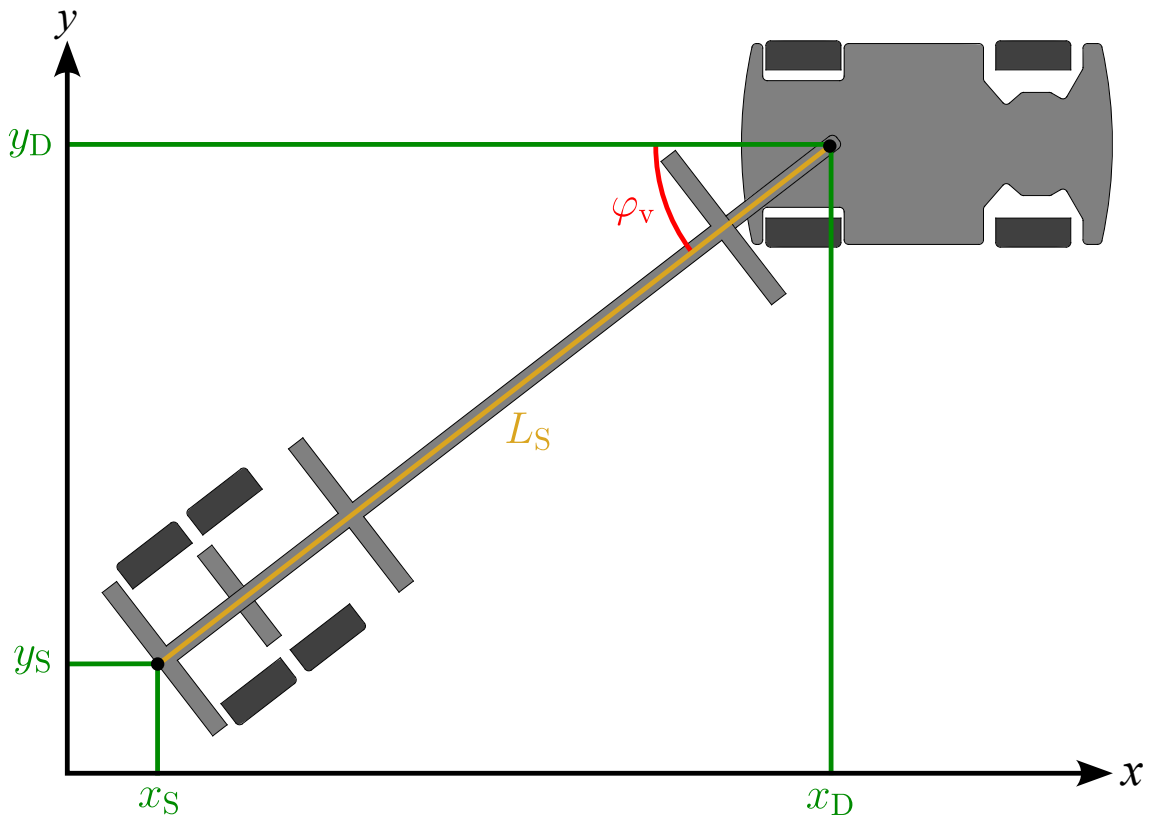
2.3 Semitrailerns position relativt dragfordonet

Vinkelmätningen mellan dragfordonet och semitrailern möjliggör övervakning av semitrailerns position i förhållande till dragfordonet. Detta är avgörande för att semitrailerns position ska kunna påverka planeringen av dragfordonets körbana. Genom att känna till vinkeln i pivåkopplingen räcker det att ha information om semitrailerns längd för att beräkna den relativa positionen mellan dem.

Om semitrailerns längd L_S är känd och vinkeln φ_v mellan den och dragfordonet är uppmätt, kan deras relativa position beräknas enligt

$$\begin{aligned}x_S &= x_D - \cos(\varphi_v) \cdot L_S, \\y_S &= y_D - \sin(\varphi_v) \cdot L_S\end{aligned}\tag{2.3}$$

där (x_D, y_D) är dragfordonets position och (x_S, y_S) semitrailerns. En geometrisk illustration av detta samband visas i Figur 2.4.



Figur 2.4: Illustration av vinkeln mellan dragfordonet och semitrailern och den relativa positionen mellan dem.

3

Konstruktion av skalmodell

Detta kapitel beskriver projektets planerings- och konstruktionsprocess. Här presenteras även skalmodellens komponenter och viktiga designval som har gjorts under projektets gång.

3.1 Arbetsgång

I projektets inledande skede låg fokus på att utforska olika plattformar lämpliga för konstruktionen av skalmodellerna, samt att bestämma vilka komponenter som skulle köpas in alternativt egentillverkas. Efter att plattformen och komponenterna hade valts, riktades uppmärksamheten mot att konstruera ett fungerande dragfordon tillsammans med tillhörande semitrailer. Detta steg var av betydelse för att upptäcka eventuella fel eller potentiella förbättringsmöjligheter innan båda modellerna byggdes. När ett fungerande ekipage hade färdigställts, återupprepades processen för att skapa en identisk modell. Efter detta steg riktades arbetet mot att utforma en kaross för dragfordonet och en container för semitrailern för att efterlikna en verklig lastbil. En detaljerad lista över de inköpta komponenterna som användes för att bygga modellerna kan ses i Bilaga A.

3.2 Kravspecifikation

För att säkerställa att projektets syfte skulle uppnås, sammanställdes en rad krav och önskemål som skalmodellen behöver uppfylla, vilka redovisas i Tabell 3.1. Kraven angående storlek, vikt och maximal respektive minimal hastighet grundade sig på att skalmodellen bör vara hanterbar att använda och kunna köras inomhus. De krav som rör differentialväxeln och styrningen är baserade på identifierade problem med modellen från tidigare års arbeten. Kravet gällande batteritid syftar till att möjliggöra nödvändiga tester av modellen. Kostnadskravet grundar sig på projektets tillgängliga budget. Skalmodellen bör uppfylla alla satta krav, medan önskemålen är riktmärken som eftersträvas.

Vikt för olastat ekipage syftar till den totala vikten av ett dragfordon och en tom semitrailer. Maxlasten avser den, på semitrailern, lastade vikt vid vilken ekipaget fortfarande klarar av att driva sig själv med. Osäkerhet i styrvinkel avser det glapp som finns i hjulvinkeln när styrservons vinkel är konstant.

Tabell 3.1: Skalmodellens kravspecifikation.

Kriterier	Krav/Önskemål	Målvärde
1. Storlek		
1.1 Skala	Krav	1:10 – 1:14
2. Vikt		
2.1 Vikt olastat ekipage	Krav	<10 kg
2.2 Vikt olastat ekipage	Önskemål	<5 kg
2.3 Maxlast	Krav	>10 kg
3. Drivning		
3.1 Maximal hastighet	Krav	50 cm/s
3.2 Minimal hastighet	Krav	2 cm/s
3.3 Dragfordonets batteritid	Krav	30 minuter
3.4 Differentialväxlad drivning	Krav	Se Avsnitt 2.2
4. Styrning		
4.1 Maximalt styrutslag	Krav	>35°
4.2 Maximalt styrutslag	Önskemål	>45°
4.3 Osäkerhet styrvinkel	Krav	<±3°
4.4 Osäkerhet styrvinkel	Önskemål	<±1°
4.5 Ackermann styrgeometri	Krav	Se Avsnitt 2.1
5. Kostnad		
5.1 Kostnad per ekipage	Önskemål	<4 000 SEK

3.3 Konstruktion av dragfordon

Dragfordonet byggdes på en plattform av den radiostyrda bilen *Axial SCX10*, se Figur 3.1. Denna modell är en så kallad *crawler* och är avsedd för terrängkörning. Bilen är i skala 1:10 av en verklig terrängbil, vilket motsvarar skalan 1:12 av en verklig lastbil. De egenskaper som en radiostyrd terrängbil besitter, såsom fyrhjulsdrift, hög utväxling i drivlinan och liten svängradie, ansågs passande för det dragfordon som skulle konstrueras.

Dock fanns det egenskaper med denna modell som inte var lämpliga för dragfordonet, såsom överdriven fjädring, icke-optimal Ackermann-geometri och avsaknad av differentialväxlar. Dessutom fanns det många delar på en komplett *Axial SCX10* som inte skulle passa till dragfordonet, såsom kaross och hjul. Dess chassi skulle inte heller passa överens med de mått som dragfordonet skulle kräva.

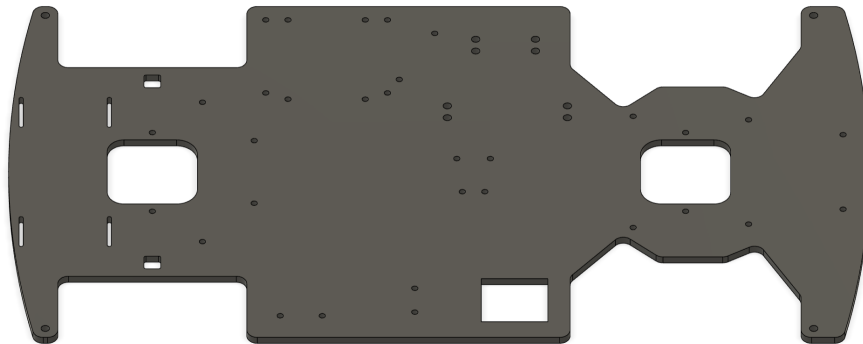
Ett alternativ till att köpa en färdig radiostyrd bil skulle vara att bygga flera delar till dragfordonet från grunden. Det skulle dock vara utmanande och mycket tidskrävande att tillverka egna komponenter för styrning och drivlina som har likvärdig precision och hållfasthet som ett färdigtillverkat alternativ. Mot denna bakgrund bedömdes det mest rimliga alternativet vara att köpa vissa enskilda komponenter i form utav reservdelar från en *Axial SCX10*, samtidigt som andra delar egentillverkades.



Figur 3.1: Den radiostyrda bilen *Axial SCX10*. [12], CC BY-NC-ND.

3.3.1 Dragfordonets chassi

Dragfordonets huvudsakliga bärande konstruktion utgörs främst av en laserskuren bottenplatta tillverkad i 5 mm tjock akrylplast som kan ses i Figur 3.2. Alla komponenter är sedan monterade på denna bottenplatta genom att skruvas fast igenom hål. Denna konstruktionstyp gör det enkelt att byta individuella komponenter utan att behöva göra stora ingrepp i hela modellen. En bottenplatta i akrylplast har fördelar i form av att det är smidigt att tillverka, enkelt att borra nya hål vid behov och god elektriskt isolerande förmåga.

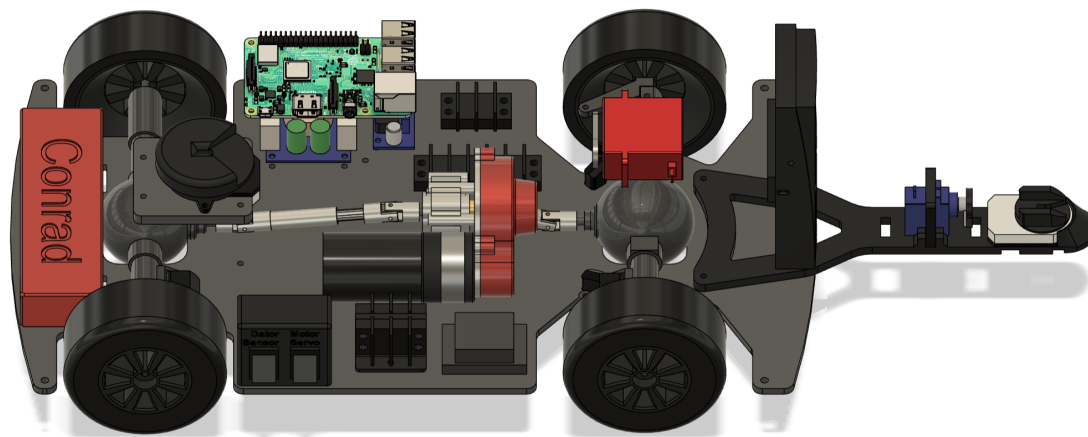


Figur 3.2: Dragfordonets bottenplatta i CAD. Den verkliga bottenplattan är tillverkad av 5 mm tjock, svart akrylplast.

Fram- och bakaxlarna är gjorda av metall och utgör en del av den bärande konstruktionen. Dessa sitter dels skruvade direkt i bottenplattan, dels skruvade i 3D-utskrivna fästen som i sin tur är skruvade i bottenplattan. Användningen av dessa extra fästpunkter bidrar till att öka styvheten hos axlarna runt hjulets rotationsaxel.

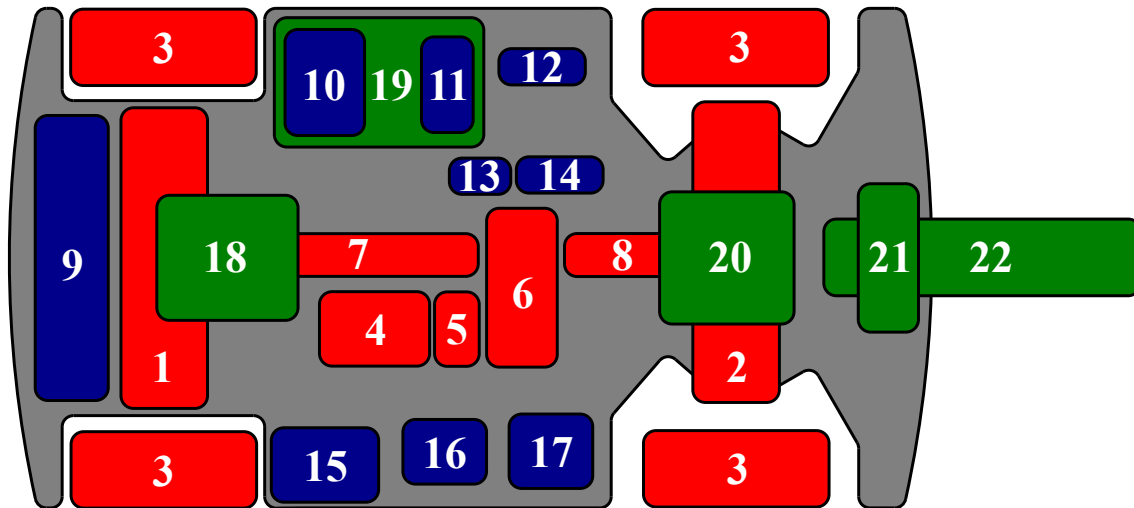
3.3.2 Layout av komponenter

Innan den fysiska konstruktionen av dragfordonet påbörjades skapades en 3D-modell av bottenplattan och alla komponenterna i CAD (se Figur 3.3). Det primära syftet med 3D-modellen var att visualisera komponenterna och planera deras layout på bottenplattan för att säkert sälla att alla komponenter fick tillräckligt med plats. 3D-modellen användes även för att ta reda på positionerna av skruvhålen i bottenplattan och för att korrekt designa de delar som tillverkades.



Figur 3.3: 3D-modell av dragfordonet i CAD.

Bottenplattans storlek valdes för att motsvara rätt skala av en verklig lastbil, och alla komponenter behövde placeras effektivt för att få plats. En schematisk bild som visar positionerna för dragfordonets komponenter visas i Figur 3.4, med en tillhörande komponentlista i Tabell 3.2. De komponenter som är markerade med rött utgör en del av dragfordonets drivlina, medan de blåmarkerade komponenterna representerar det elektriska systemet. De grönmärkta komponenterna inkluderar sensorer, styrdon och enkortsdatorn.



Figur 3.4: Schematisk bild över dragfordonets olika komponenter. Se tillhörande komponentlista i Tabell 3.2.

Tabell 3.2: Sammanställning över dragfordonets huvudsakliga komponenter. En utförligare lista över de inköpta komponenterna återfinns i Bilaga A.

Drivlina	Elektiska komponenter	Övriga komponenter
1. Bakaxel	9. Batteri	18. Pivåkoppling
2. Framaxel	10. Spänningsregulator 5 V	19. Enkortsdator
3. Hjul	11. Spänningsregulator 3,3 V	20. Styrservo
4. Drivmotor	12. Kopplingsplint jord	21. Sensorsystem
5. Planetväxel	13. Kopplingsplint 3,3 V	22. Dragarm
6. Fördelningslåda	14. Kopplingsplint 5 V	
7. Drivaxel bak	15. Strömbrytare	
8. Drivaxel fram	16. Kopplingsplint 12 V	
	17. ESC	

3.3.3 Dragfordonets kaross

En kaross till dragfordonet tillverkades genom att vakuumforma plast runt en 3D-utskrivna avgjutningsform. Eftersom vakuumformningen kräver både värmetålighet och hållfasthet, tillverkades formen i värmetålig plast med 40 % ifyllnad. För att säkerställa att vakuumet verkade över hela plasten gjordes en mängd små hål i formen, med fler hål kring skarpa kanter och små detaljer.

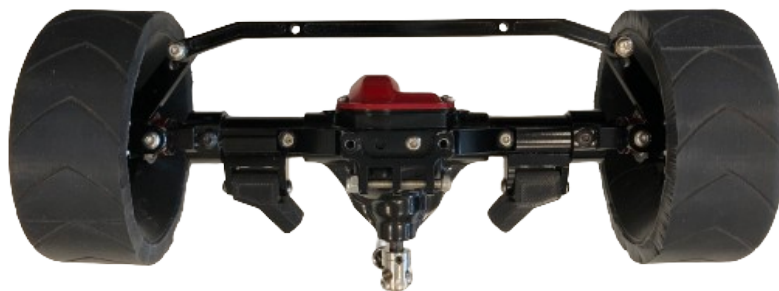
Efter vakuumformningen genomförts skars hål ut i karossen för hjulen, sensorfästet, vändskivan och strömknapparna. Den färdiga karossen till ett av dragfordonen kan ses i Figur 3.5. Karossen monterades på dragfordonet genom att klämmas fast i 3D-utskrivna fästen monterade i bottenplattans hörn.



Figur 3.5: Färdig kaross i vakuumformad plast.

3.4 Mekaniskt styrsystem

Vid konstruktionen av dragfordonets styrsystem var lärdomarna från tidigare års arbeten centrala. Det framgick tydligt att den typen av manövreringar som ekipagen är ämnade att utföra kräver en väl genomtänkt och robust styrning. Tidigt i projektet beslutades det därför att så få länkar som möjligt skulle ingå i styrningskonstruktionen men även att den skulle vara byggd i stål. För att möjliggöra detta designval inom projektets tidsram krävdes det att styrmekanismen köps in, istället för att egentillverkas. Det beslutades att hjulupphängningen, med tillhörande styrkonstruktion i Figur 3.6a skulle användas efter modifiering, vilken illustreras i Figur 3.6b. Modifieringen innebar att flytta på styrstagen till att vara bakom framaxeln.



(a) Hjulaxel innan modifiering sedd ovanifrån.



(b) Hjulaxel efter modifiering sedd ovanifrån.

Figur 3.6: Främre hjulupphängningen innan och efter modifieringar.

Tillsammans med ytterligare justeringar av styrparametrarna, som presenterats i Avsnitt 2.1, skulle det då vara möjligt att uppnå önskade styregenskaper. Men eftersom hjulupphängningen, och därmed styrgeometrin, inte designats i detta projekt finns ingen möjlighet att justera styrparametrarna α , ϵ och w . Detta leder till att det endast är möjligt att ändra styregenskaperna genom att ändra hjulbasen d . Även här finns det dock begränsningar då ekipagen skall vara skalenliga.

För att undersöka hur hjulbasen d ska justeras för att uppnå så bra approximation av den ideala geometrin som möjligt behöver styrningens användningsområde undersökas. Sidkrafter som uppstår och påverkar styrningen vid svängar är ingenting som behöver beaktas, då ekipaget endast rör sig i låga hastigheter. Att däremot anpassa geometrin för det relativt stora styrutslaget som krävs av dragfordonet är allt viktigare.

I och med att Ackermann-geometrin endast är en approximation av den ideala styrgeometrin så kommer styrvinklarna som produceras avvika från de ideala styrvinklarna. Om man studerar hur avvikelsen ser ut för hela styrutslaget, beroende på styrparametrarna, kan man se att den traditionella Ackermann-geometrin har relativt låga fel även för de stora styrutslag som dragfordonet krävs ha [11]. Detta faktum ledde till att den konfigurationen valdes.

För att ta fram hjulbasen d som resulterar i att den traditionella Ackermann-geometrin uppnås behöves därför avståndet mellan pivotpunkterna w och vinkeln på styrarmarna α mätas (se Avsnitt 2.1). Vinkeln α mättes upp till $73,1^\circ$ och bidrar till att beräkningen för avståndet d kan beräknas fram enligt

$$d = \frac{154}{2} \cdot \tan(\alpha) \approx 254 \text{ mm.} \quad (3.1)$$

3.5 Drivlina

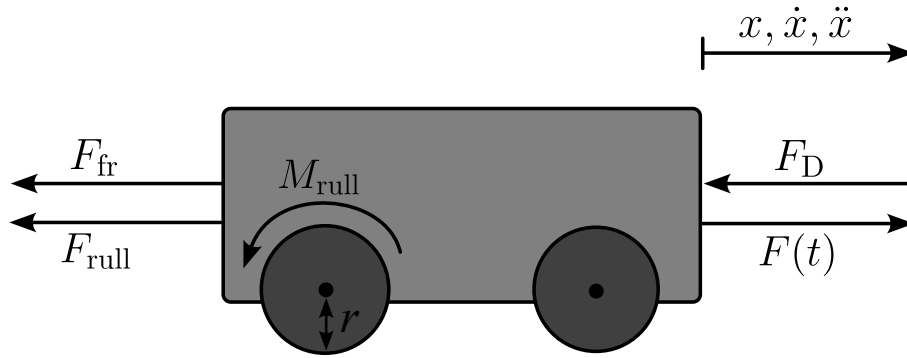
Dragfordonets drivlina består av sex huvudkomponenter. Dessa är, i ordning från motor till underlag; motor, planetväxel, fördelningslåda, drivaxlar, differentialväxlar och hjul. Målet med drivlinan var att möjliggöra precisionskörning i låga hastigheter samt ha en topphastighet strax under gångfart på $0,5 \text{ m/s}$.

3.5.1 Dragfordonets arbetsområde

Dragfordonets arbetsområde bestäms av de hastigheter som det behöver uppnå och de krafter som krävs för att upprätthålla dessa hastigheter. Detta område är definierat av dragfordonets kravspecifikation och dess egna dynamik. För att uppskatta dragfordonets dynamik användes en experimentell metod där kraften som krävdes för att dragfordonet skulle bibehålla en konstant hastighet uppmättes. Dessa tester utfördes genom att dra fordonet över en bestämd sträcka med en dynamometer, vilket är ett mätinstrument för att mäta krafter. Vid utförandet av dessa tester var motorn ej monterad. En förenklad friläggning av dragfordonet visas i Figur 3.7.

Enligt friläggningen så kan rullmotståndet längs x uttryckas genom

$$\sum \vec{F}_x = -F_{\text{fr}} - F_{\text{rull}} - F_{\text{D}} + F(t) = m \cdot \ddot{x}, \quad (3.2)$$



Figur 3.7: Förenklad friläggning av dragfordonet.

där F_{fr} och F_{rull} bidrar till det konstanta rullmotståndet som dragfordonet upplever. Termen F_{D} beskriver luftmotståndet och är proportionell mot hastigheten i kvadrat och termen $F(t)$ är den applicerade kraften på systemet. Då dragfordonet endast kommer framföras i relativt låga hastigheter antas luftmotståndet vara försumbart.

För att göra dessa beräkningar kan (3.2) tillsammas med

$$\ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt},$$

ge följande omskrivningar

$$\begin{aligned} F(t) - F_{\text{fr}} - F_{\text{rull}} &= m \cdot \frac{d\dot{x}}{dt} \\ \implies \int_0^T F(t) - F_{\text{fr}} - F_{\text{rull}} dt &= \int_{v_0}^{v_T} m d\dot{x} = m \cdot (v_T - v_0) \\ \implies \int_0^T F(t) dt &= T \cdot (F_{\text{fr}} + F_{\text{rull}}) + m \cdot (v_T - v_0), \end{aligned} \quad (3.3)$$

där den applicerade kraften $F(t)$ har samplats i de diskret uppmätta värdena $F[k]$. Mätningarna utfördes med samplingsintervallet h för totalt N datapunkter över en tidsperiod T . En diskretisering av (3.3) kan göras genom att sätta

$$\int_0^T F(t) dt \approx \sum_{k=0}^N F[k] \cdot h$$

där $t = kh$ och $T = Nh$. Genom att approximera integralen som en summa kan nu impulsen från (3.3) approximeras som

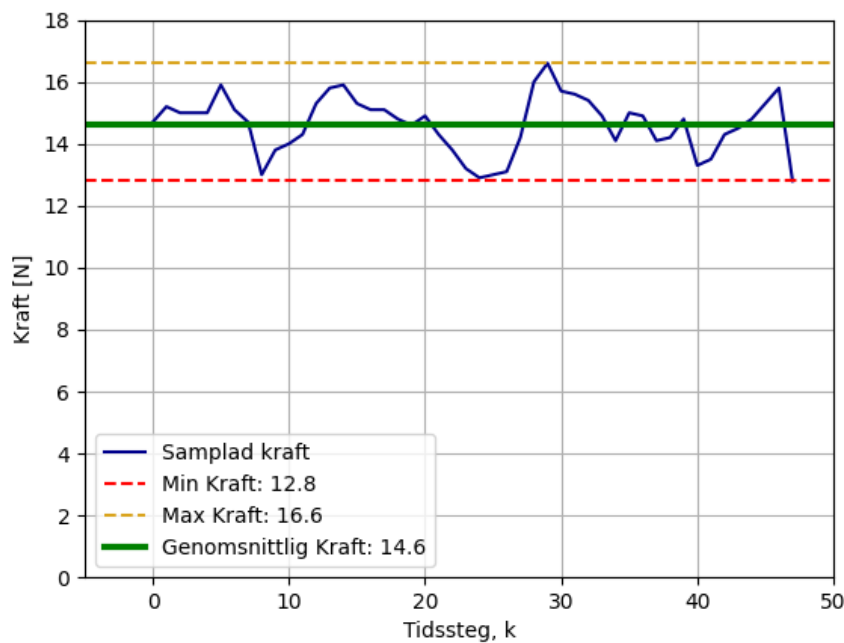
$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^N F[k] \cdot h &= T \cdot (F_{\text{fr}} + F_{\text{rull}}) + m \cdot (v_T - v_0) \\ \implies \sum_{k=0}^N F[k] \cdot \frac{h}{Nh} &= \mathbb{E}[F[k]] = F_{\text{fr}} + F_{\text{rull}} + \frac{m \cdot (v_T - v_0)}{T}, \end{aligned}$$

vilket leder till

$$\mathbb{E}[F[k]] = F_{\text{fr}} + F_{\text{rull}} + \frac{m \cdot (v_T - v_0)}{T}. \quad (3.4)$$

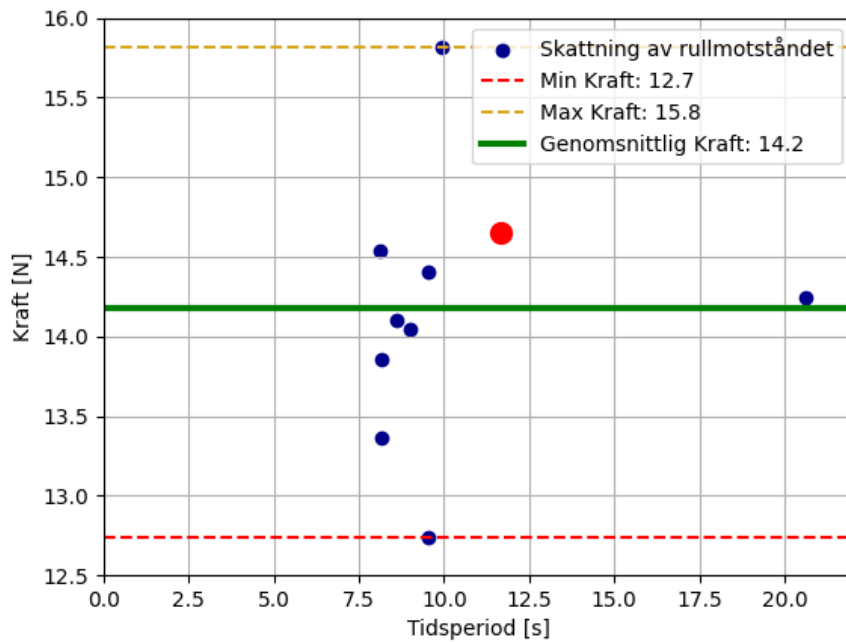
Detta ger insikten att det konstanta rullmotståndet kan uppskattas som medelvärdet av de samplade krafterna. Om antagandet $v_0 = v_T$ görs, alltså att start- och sluthastigheten är densamma, kan rullmotståndet skattas enligt $\mathbb{E}[F[k]] = F_{\text{fr}} + F_{\text{rull}}$. Är däremot start- och sluthastigheterna olika leder det till en förskjuten skattning, vilket blir en felkälla. Felkällan minskar däremot genom att öka tidsperioden T med nackdelen att det leder till en ökad mängd data som behöver bearbetas.

I Figur 3.8 visas ett av testen där kraften $F(t)$ samplades över perioden 11,5 sekunder med samplingsintervallet $h = 0,25$ s över totalt $N = 46$ samplingsar. Skattningen $\mathbb{E}[F[k]]$ ger ett rullmotstånd på 14,6 N. För att få en bättre uppskattning av rullmotståndet utfördes testet tio gånger över olika tidsperioder T , vilket visas i Figur 3.9. Det genomsnittliga rullmotståndet av alla tio tester beräknades enligt (3.4) till $F_{\text{fr}} + F_{\text{rull}} = 14,2$ N.

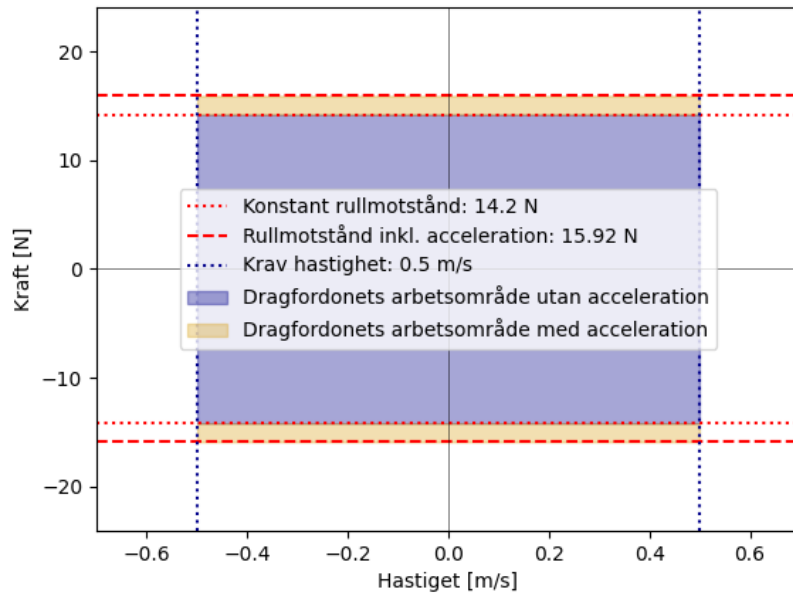


Figur 3.8: Uppmätta värden av kraften som krävdes för att dra dragfordonet i en konstant hastighet. Kraften $F(t)$ är samplad i 11,5 sekunder.

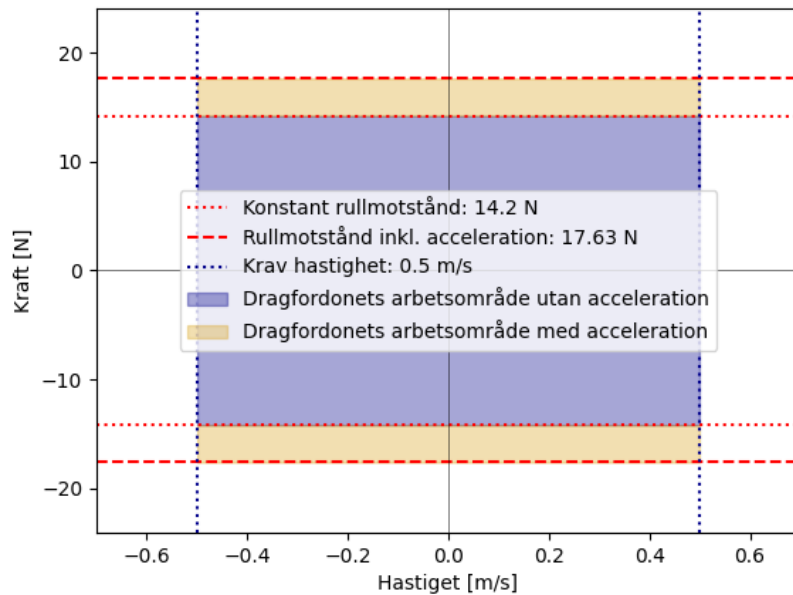
Utöver det konstanta rullmotståndet är även fordonets acceleration en del av dess dynamik. Genom att variera fordonets accelerationskrav ändras dess arbetsområde. Detta leder till förändrade krav på utväxlingen mellan motorn och däcken, vilket illustreras i Figur 3.10.



Figur 3.9: Tio skattade värden av dragfordonets rullmotstånd. Röd punkt representerar testet som visas i Figur 3.8.



(a) Arbetsområdet för dragfordonet lastat med 10kg och med accelerationskrav på $0,1 \text{ m/s}^2$.



(b) Arbetsområdet för dragfordonet lastat med 10kg och med accelerationskrav på $0,2 \text{ m/s}^2$.

Figur 3.10: Jämförelse av dragfordonets arbetsområde beroende på accelerationskrav.

3.5.2 Motordimensionering och estimering av motorparametrar

Dimensioneringen av dragfordonets motor innefattar flera viktiga komponenter, där varje enskild del spelar en avgörande roll för dess funktion. Efter att arbetsområdet har beräknats enligt Figur 3.10b, kan effekten för motorn uppskattas enligt

$$P_{\max} = F_{\max} \cdot v_{\max} = 8,82 \text{ W}.$$

För att säkerställa att motorn skulle vara tillräckligt stark för att hantera alla för-luster användes en säkerhetsfaktor på tre. Detta resulterar i ett approximativt effektkrav på 26,5 W, vilket resulterade i att en motor med effekten 25 W valdes. Spänningskonstanten för den valda motorn var dock okänd och behövde beräknas manuellt. Detta gjordes genom att mäta motorns maximala varvtal och använda sambandet

$$\begin{aligned} U_{\text{motor}} &= IR + \lambda_t \omega_{\text{motor}} \\ T_{\text{motor}} &= I \cdot \lambda_t \\ \implies T_{\text{motor}} &= \frac{(U_{\text{motor}} - \lambda_t \omega_{\text{motor}}) \lambda_t}{R}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

där antagandet $T_{\text{motor}} = 0$ görs eftersom motorn är olastad. Motorns maximala varvtal blev uppmätt till 1013 rad/s. Med en nominell motorspänning på 12 V kan spänningskonstanten beräknas enligt

$$\lambda_t = \frac{U_{\text{motor}}}{\omega_{\text{motor,max}}} = 0,0118 \text{ V/rad s}^{-1}.$$

Genom att sätta $\omega_{\text{motor}} = 0$ kan kippmomentet

$$T_{\text{kip}} = \frac{U_{\text{motor}} \lambda_t}{R} = 0,56 \text{ N m}$$

uppskattas.

3.5.3 Drivlinans initiala utväxling

Dragfordonets drivlina består av de komponenter som är markerade med rött i Figur 3.4, och utväxlingen hos varje komponent påverkar den totala utväxlingen för drivlinan. Komponenternas respektive utväxling är angivna i Tabell 3.3. För att projektarbetet skulle vara möjligt avgränsades arbetet till att köpa in färdiga komponenter med fast utväxling, vilket gav den initiala utväxlingen $n_{\text{utväxling}} = 35,8$. Denna utväxling ger dragfordonet en beräknad topphastighet på

$$v_{\text{dragfordon,max}} = \frac{\omega_{\text{motor,max}} \cdot r}{n_{\text{utväxling}}} = 1,17 \text{ m/s}.$$

Tabell 3.3: Utväxling för respektive komponent i drivlinan.

Drivlina	Utväxling
1. Bakaxel	3,17:1
2. Framaxel	3,17:1
3. Hjul	1:1
4. Elmotor	1:1
5. Planetväxel	3:1
6. Fördelningslåda	11,31:1
7. Drivaxel bak	1:1
8. Drivaxel fram	1:1

För att undersöka om motorns arbetsområde täcker dragfordonets arbetsområde behöver motorns arbetsområde först plottas. Motorns arbetsområde kommer att beräknas från hjulens referenspunkt för att möjliggöra jämförelse med dragfordonets arbetsområde. Först kan den maximala kontinuerliga effekten som motorn kan leverera beaktas, och den är 25 W enligt tidigare val. Om spänningen antas vara nära batteriets nominella spänning på 12 V kan den kontinuerliga strömmen beräknas enligt

$$i_{\max} = \frac{P_{\max}}{U_{\max}} \quad (3.6)$$

och från DC motorns standarkekvationer vet vi därmed att motorns arbetsområde kommer vara begränsat i dess kontinuerliga vridmoment enligt

$$\begin{aligned} T_{\text{motor,max}} &= i_{\max} \cdot \lambda_t, \\ \implies T_{\text{motor,max}} &= \frac{P_{\max}}{U_{\max}} \cdot \lambda_t, \end{aligned} \quad (3.7)$$

och behöver därefter skalas till däckens perspektiv enligt

$$T_{\text{hjul,max}} = T_{\text{motor,max}} \cdot n_{\text{utväxling}}. \quad (3.8)$$

Anmärkningsvärt är att vridmomenttsekvationen gäller för både positiva och negativa strömmar, och arbetsområdet kommer därmed bli begränsat symetriskt runt ω -axeln.

Motorns maximala vinkelhastighet begränsar också arbetsområdet, och den maximala hastigheten vid hjulen kan beräknas enligt

$$\omega_{\text{hjul,max}} = \omega_{\text{motor,max}} / n_{\text{utväxling}}.$$

Vidare begränsar även motorns inducerade spänning dess arbetsområde, och vridmomentet som funktion av vinkelhastigheten härledes redan i ekvation (3.5). Kompensationen för att beskriva vridmomentet vid hjulen görs enligt

$$T_{\text{elektrisk}} = \frac{(U_{\text{motor}} - \frac{\lambda_t}{n_{\text{utväxling}}}\omega_{\text{motor}})\frac{\lambda_t}{n_{\text{utväxling}}}}{R}, \quad (3.9)$$

där spänningen U_{motor} antas vara nominell och ω_{motor} är kontinuerlig och varieras för att få fram en linje.

Slutligen kan den maximala kontinuerliga effekten för motorn ytterligare begränsa arbetsområdet enligt

$$\begin{aligned} P_{\text{motor,max}} &= T_{\text{effekt}} \cdot \omega_{\text{motor}}, \\ \implies T_{\text{effekt}} &= \frac{P_{\text{motor,max}}}{\omega_{\text{motor}}}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

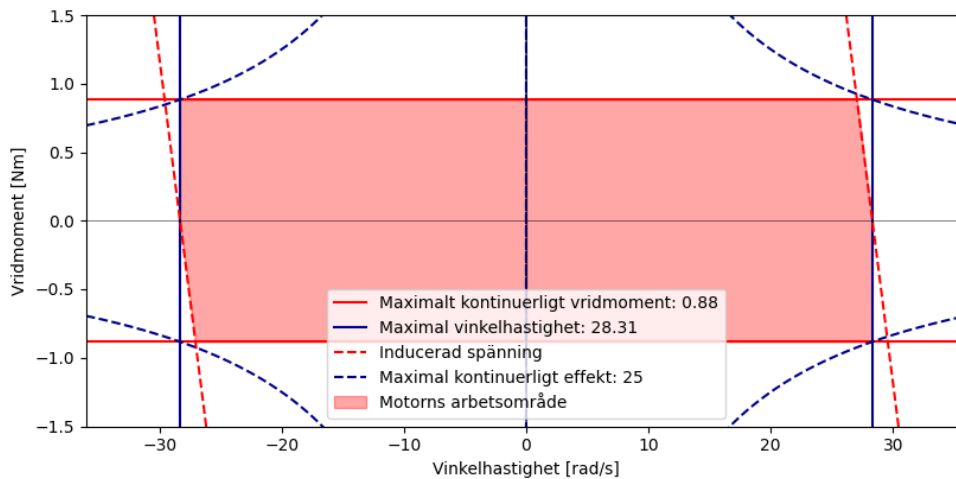
och även här varieras ω_{motor} för ge den begränsande kurvan.

Elmotorns arbetsområde med den initiala utväxlingen är plottat i Figur 3.11. I grafen kan det konstateras att dragfordonet ligger inom motorns arbetsområde. Med den initiala utväxlingen kan säkerhetsfaktorn för vridmomentet beräknas till en faktor på

$$\frac{T_{\text{motor,max}}}{T_{\text{dragfordon,max}}} = 1.21 \quad (3.11)$$

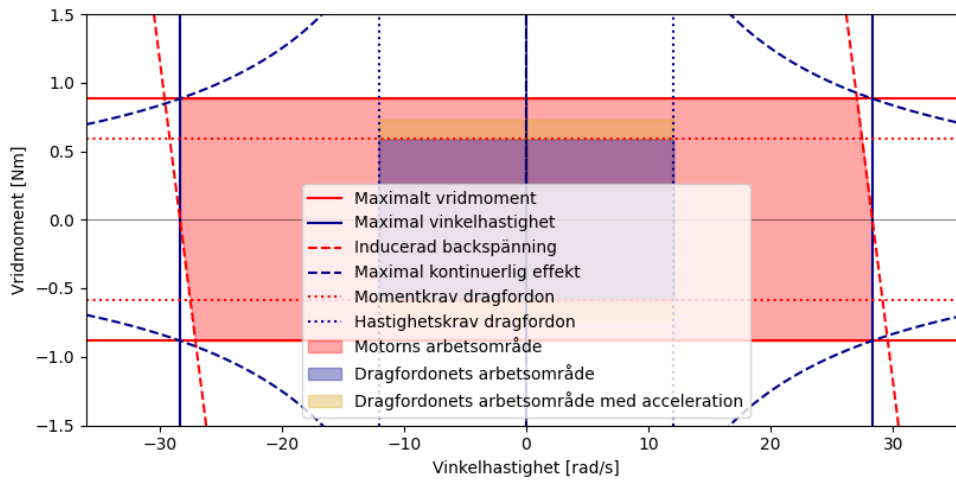
och säkerhetsfaktorn för hastigheten kan beräknas till en faktor på

$$\frac{v_{\text{motor,max}}}{v_{\text{dragfordon,max}}} = 2.35.$$



Figur 3.11: Elmotorns initiala arbetsområde vid en utväxling $n_{\text{utväxling}} = 35.8$.

För att avgöra hur väl motorns och dragfordonets arbetsområden passar överens plottas dessa tillsammans i Figur 3.12.



Figur 3.12: Elmotorns och dragfordonets arbetsområden vid den initiala utväxlingen $n_{\text{utväxling}} = 35.8$.

3.5.4 Drivlinans utväxling med plantväxel

I verkliga tester med den initiala utväxlingen visade det sig att ESC:n inte kunde driva motorn med väldigt låga spänningar. Detta ledde till att dragfordonet hade en instabil körning i form av att samma PWM-signal kunde ge en varierande hastighet. Om dragfordonets utväxling ökade med en faktor tre skulle det nya arbetsområdet för dragfordonet och motorn förändras till det i Figur 3.13. Den nya utväxlingen gav dragfordonet den nya beräknade topphastigheten på

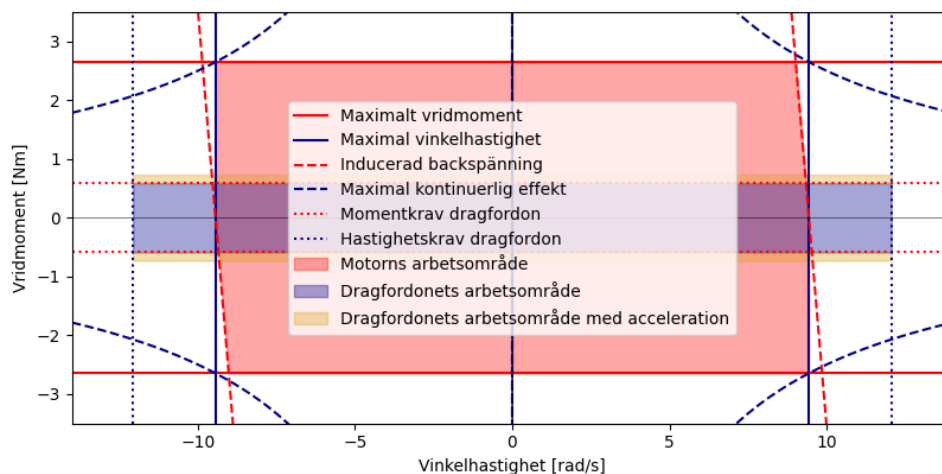
$$v_{\text{dragfordon,max}} = \frac{\omega_{\text{motor,max}} \cdot r}{n_{\text{utväxling}}} = 0,39 \text{ m/s.}$$

Därför utvärderades en planetväxel som kunde monteras mellan motorn och fördelningslådan vidare.

Det visade sig i tester att trots att planetväxeln med en utväxling på 1:3 inte uppfyllde hastighetskraven enligt beräkningarna, så gav den ökade nivån av kontroll vid låga hastigheter en betydande fördel. Detta ledde till beslutet att behålla planetväxeln trots dess lägre maxhastighet. Med den nya utväxlingen kunde säkerhetsfaktorn beräknas på liknande sätt som i Avsnitt 3.5.3. Den blev då en faktor 3.62 för vridmomentet samt en faktor 0.78 för hastigheten.

3.5.5 Konstruktion av drivlinan

Drivlinans slutgiltiga konstruktion efter hela dimensioneringen resulterade i att en planetväxel blev placerad mellan motorn och fördelningslådan. Drivlinans totala förluster uppskattades till 50% i ovanstående grafer och beräkningar eftersom ingen djupare analys på dess faktiska verkningsgrad hade utförts. Målet med antagandet var att analysen då skulle ge en bild som var värre eller lika med sanningen för att säkerställa att systemet inte blev underdimensionerat. För att konstruktionen av drivlinan skulle vara möjlig behövde även hjulaxlarna modifieras då fasta axlar var



Figur 3.13: Elmotorns och dragfordonets arbetsområden med tillagd planetväxel. Utväxlingen är då $n_{\text{utväxling}} = 107.4$.

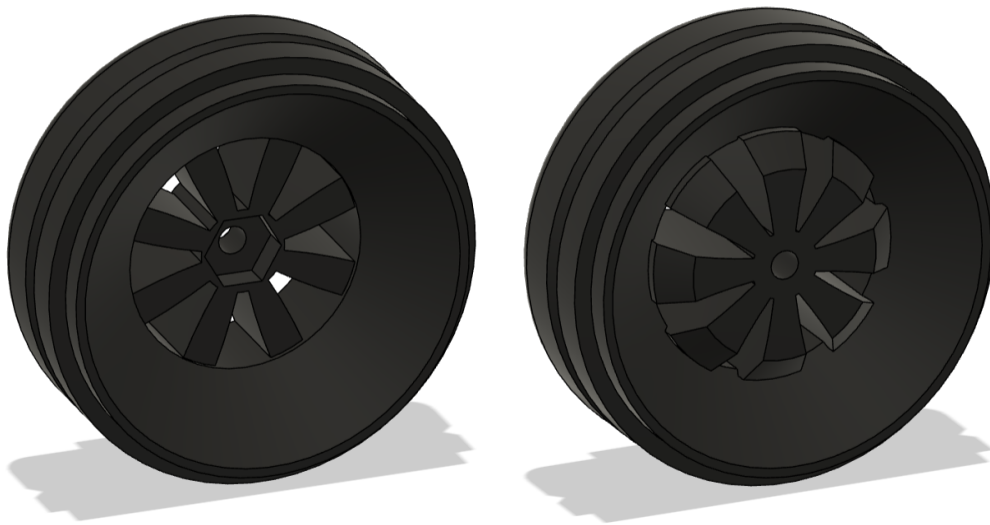
installerade från fabriken. Detta resulterade i att differentialaxlarna som införskaffades behövde få dess diameter nersvarvad för att de skulle passa. Utöver detta så behövde inga andra modifikationer ske på drivlinans komponenter vilket var en av anledningarna vid komponentvalen. Drivlinans nuvarande konstruktion tillåter även enkelt byte mellan utväxling genom att behålla eller montera bort planetväxeln. Båda dragfordonen är fyrhjulsdrivna.

3.6 Dragfordonets och semitrailerns hjul

Tidigare års projektarbeten hade problem med för låg däckfriktion på färdigköpta däck, vilket ledde till tillverkning av egna hjul med plastfälgar och gjutna silikon-däck [9]. Dessa egentillverkade däck visade sig ha bra friktion mot underlaget. Dock var dessa befintliga hjul inte i skala 1:12 av verkliga lastbilsdäck och det fanns bara tillräckligt med hjul för att bygga ett dragfordon. Därför beslutades det att konstruera nya, skalengliga, hjul utefter samma konstruktionsprincip till både dragfordonen och semitrailerna.

3.6.1 Konstruktion av hjulen

Hjulens fälgar designades i CAD och tillverkades sedan genom 3D-utskrift i plast. 3D-skrivaren användes för att kunna utforma designen exakt som tänkt och CAD möjliggjorde smidiga justeringar, som bland annat innefattade en skåra i fälgen för att förbättra fästet för silikonet. Fälgarna till dragfordonet och semitrailern är mycket lika, med den enda skillnaden i hur de konstruerats för att fästas på respektive axel. Denna skillnad illustreras i Figur 3.14. Hjulets däck, som är identiska för både dragfordon och semitrailer, har gjutits i silikon med en hårdhet på 40 Shore (se Bilaga A).



(a) Fälg till dragfordonet.

(b) Fälg till semitrailern.

Figur 3.14: 3D-modell av fälgarnas baksida i CAD. Skillnaden är i fästet till axlarna.

Silikonet runt fälgarna har gjutits i gjutformar. På fälgarna och gjutformerna gjordes tunna trattar som lätt gick att knäcka av efter gjutningen var klar. Syftet med trattarna var att kunna hålla ner silikonet i gjutformarna smidigare och undvika spill. Gjutformarna till dragfordonets respektive semitrailerns däck gjordes också i CAD och skrevs ut i en 3D-skrivare. En gjutform tillsammans med en fälg med tratt kan ses i Figur 3.15.

Vid gjutningen av silikonet blandades silikon med svart färg först. När färgen blandades med silikonet, bildades ett stort antal luftbubblor. Dessa bubblor avlägsnades genom att placera koppen i en vakuumkanare. Därefter blandas härdningsmedel ner i silikonet vilket ledde till att silikonet började stelna.

Silikonet hölls sedan ner av en person i gjutformarna samtidigt som gjutformarna roterades av en annan person för att få en jämn silikonnivå på hela däcket. När härdningsmedlet blandats i och silikonet höllts i gjutformarna uppkom det nya luftbubblor. Därför placerades gjutformarna med silikon i vakuumkanaren igen för att få ut de sista luftbubblorna. Sedan fick silikonet stelna. Ett färdigt däck till dragfordonet kan ses i Figur 3.16.

Vid testkörningen av däcken på både dragfordonet och semitrailern krängdes silikonet av vid pålagd vikt, trots skåran i fälgen. Detta gjorde det svårare för motorn att driva. Därför applicerades lim på varje hjul mellan fälg och däck.



Figur 3.15: Gjutform för både dragfordon- och semitrailerdäck med fälg och tillhörande trattar. Bilden är gjord i CAD.



Figur 3.16: Ett färdigt hjul till dragfordonet. Fälgan är gjord i plast och däcken är gjutna i silikon.

3.7 Konstruktion av semitrailer

För att utföra tester som fokuserar på lastbilsmanövrering var det nödvändigt att konstruera en semitrailer. Semitrailern konstruerades i samma skala som dragfordonet, det vill säga skala 1:12 av en verklig lastbil, och avgränsades från att inkludera elektronik och andra aktiva komponenter. Dessa avgränsningar motiverades av två huvudsakliga skäl. För det första möjliggör detta användningen av befintliga semitrailers för ett eventuellt fullskaligt system. För det andra möjliggör uteslutandet av dessa komponenter framtida arbeten där semitrailern autonomt kan kopplas av och på utan att behöva implementera system för att hantera kablar, vilket annars skulle ha varit utmanande att implementera.

3.7.1 Semitrailerns bärande konstruktion

Vid utformningen av semitrailerns bärande konstruktion var det viktigt att ta hänsyn till flera krav från kravspecifikationen, särskilt kraven om maxlast, ekipagets vikt och kostnad. Detta innebar att materialet för semitrailern behövde vara styvt men ändå relativt lätt och billigt. Därför valdes semitrailerns stomme att byggas av 20 mm x 20 mm fyrkantör i stål vilket visas i Figur 3.17. Valet av fyrkantör i stål grundar sig främst i dess höga styvhet och att det är lätt att bearbeta och forma. Dessutom fanns det, ur projektets perspektiv, tillgång till detta material kostnadsfritt, vilket gjorde det till ett ekonomiskt fördelaktigt alternativ.



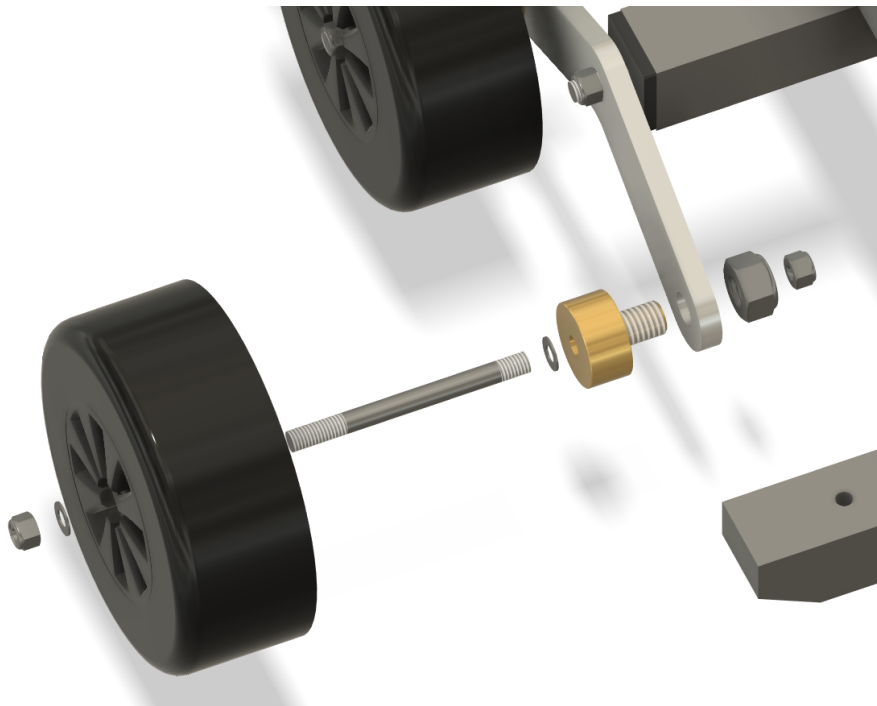
Figur 3.17: Den delen av semitrailerns stomme som tillverkats i 20 mm x 20 mm fyrkantör.

I den främre delen av stommen övergår fyrkantsprofilen till plattjärn. Detta val gjordes för att ge semitrailern en så låg profil som möjligt samtidigt som tillräckligt med frigång till dragfordonets kaross bibehålls. Eftersom plattjärn inte är lika styvt som fyrkantsprofilerna begränsas dess användning till den kortaste möjliga delen av stommen.

3.7.2 Semtrailerns hjulupphängning

För att säkerställa att semitrailern klarar den krävda maxlasten är det inte bara stommen som måste kunna hantera belastningen, utan också hjulupphängningen. Utan lämpliga hjullager riskerar lasten att orsaka högt rullmotstånd. Detta i sin tur kan leda till energiförluster och krav på överdimensionering av dragfordonets drivlina, vilket både ökar kostnaden och minskar batteritiden. Det är därför avgörande att hjulupphängningen på semitrailern konstrueras för att minimera rullmotståndet.

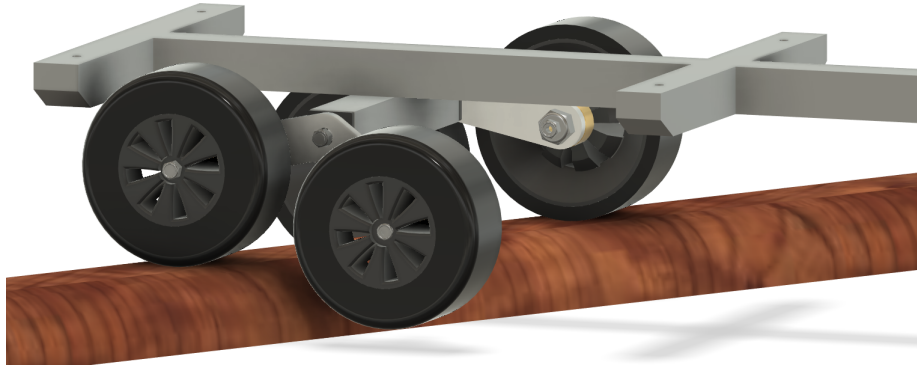
Två alternativa tekniska lösningar till hjullager som utforskades var bussningar och rullager. Rullager är fördelaktiga på grund av deras låga rullmotstånd. Dock fanns det inga lämpliga rullager tillgängliga under konstruktionsfasen av semitrailern, och de som eventuellt kunde fås tag på var dyra. Å andra sidan fanns det tillgängliga material och tillverkningsmetoder för att tillverka egna bussningar. Dessutom var materialet, liksom stommen, kostnadsfritt utifrån projektets perspektiv. Detta sammantaget resulterade i att egna bussningar i mässing med tillhörande axlar i silverstål svarvades. Dessa material valdes på grund av deras låga glidfriktion mellan varandra [13]. För att minimera glappet mellan bussning och hjulaxel svarvades de med hög precision, med en tolerans på 0,01 mm. I Figur 3.18 illustreras hur bussningen och hjulaxeln monteras tillsammans med hjulet för att konstruera hela hjulupphängningen.



Figur 3.18: Exploderad vy av hjulupphängningen i CAD. Bussning och hjulaxel är svarvade ur mässing respektive silverstål.

Ett ytterligare sätt att minska rullmotståndet är genom att öka antalet hjul på semitrailern. Genom att fördela lastens vikt på fler hjulaxlar minskar friktionen både i hjullagren och i kontakten med marken. Att bara lägga till fler hjul, stelt monterade på stommen, skulle emellertid inte vara tillräckligt. Detta då lasten skulle fördelas

på enskilda axlar vid minsta lilla höjdskillnad mellan dragfordonet och semitrailern. Därför utformades hjulupphängningen med en boggi, som illustreras i Figur 3.19. Denna lösning säkerställer att alla fyra hjulen alltid har kontakt med marken oavsett underlag.



Figur 3.19: Demonstration av boggikonstruktionens funktion i CAD. Hjulpåren på vardera sida kan röra sig oberoende av varandra.

3.7.3 Semitrailerns lastutrymme

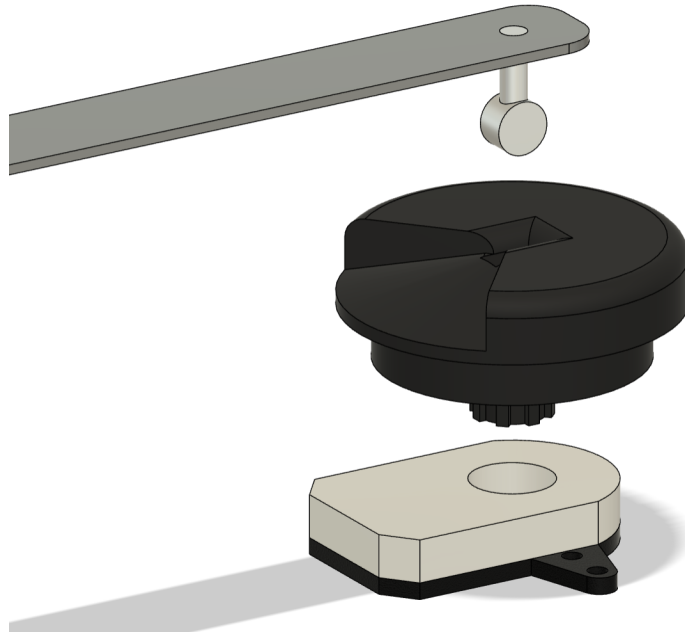
För att kunna belasta semitrailern och utföra nödvändiga tester krävs en anordning att placera lasten i. Till riktiga lastbilar används ofta containrar av olika slag för detta ändamål. Därför konstruerades en modell i skala 1:12 av en verklig 40 fots container, vilken presenteras i Figur 3.20. Den är byggd av akrylplast, som har laserskurits i delar och sedan satts ihop. Containern har lämnats öppen för att möjliggöra enkel i- och urlastning av testvikter.



Figur 3.20: Containern i skala 1:12 av en verklig 40 fots container. Den är byggd av akrylplast.

3.8 Koppling mellan dragfordon och semitrailer

Kopplingen mellan dragfordonet och semitrailern har som huvudsyfte att förena dessa två delar till ett enhetligt ekipage. Det är en typ av pivåkoppling som består av en pivåtapp på semitrailern och en vändskiva samt en vinkelgivare på dragfordonet. Pivåkopplingen och dess delar illustreras i Figur 3.21.

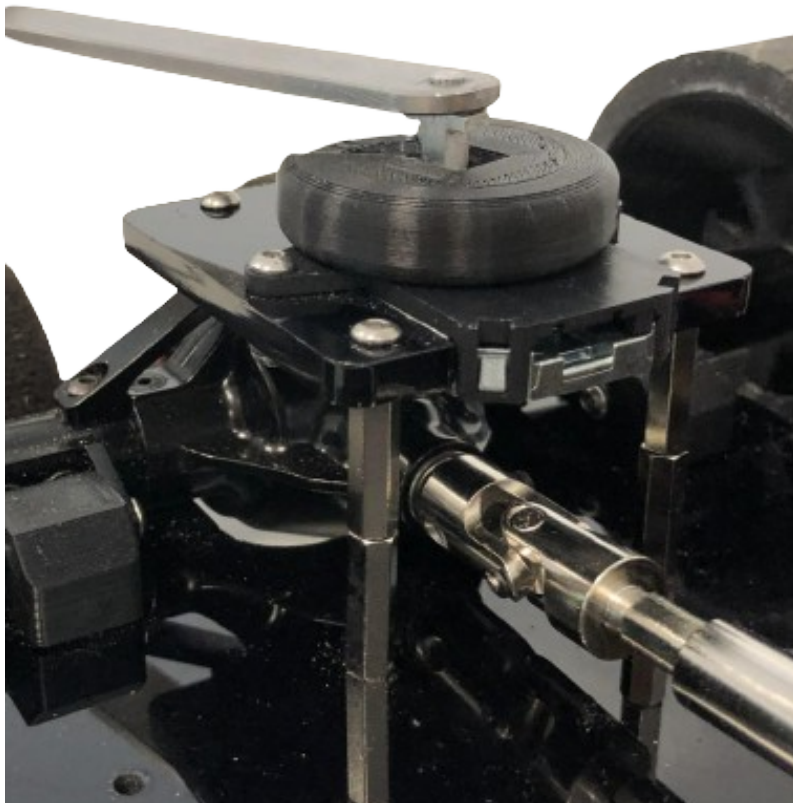


Figur 3.21: Pivåkopplingens delar i CAD. Pivåtappen placeras i vändskivan, som i sin tur sitter i vinkelgivaren.

3.8.1 Konstruktion av pivåkoppling

Pivåtappen är placerad i vändskivan, som i sin tur sitter i vinkelgivarens hål och kan rotera fritt. Vändskivan är 3D-utskrivet och designat för att på dess övre del passa ihop med pivåtappen och i dess undre del passa ihop med vinkelgivaren. Passformen i båda dessa delar är tajt för att säkerställa en pålitlig koppling och en korrekt vinkelmätning. Pivåtappen är vattenskuren ur aluminium och är pressmonterad i semitrailerstommens plattjärn.

Vinkelgivaren är fastsatt i en platta som är laserskuren ur akrylplast. Denna platta är monterad över dragfordonets bakre axel, som illustreras i Figur 3.22. Plattan är både skruvad direkt i infästningspunkter på bakaxeln och fastsatt med distansskruvar som i sin tur är förankrade i bottenplattan. Genom att placera monteringsplattan direkt på bakaxeln fördelas en betydande del av semitrailerns vikt direkt på den bakre axeln i metall, vilket minskar risken för att dragfordonets chassi ska börja svikta under belastning.



Figur 3.22: Placering av pivåkoppling mellan dragfordon och semitrailer.

3.8.2 Pivåkopplingens funktion

Semitrailern och dragfordonet kopplas enkelt ihop genom att pivåtappen manuellt placeras i vändskivan. När ekipaget är ihopsatt tillåter konstruktionen en viss höjdskillnad mellan dragfordonet och semitrailern utan risk för att pivåkopplingen ska lossna eller skadas. Detta möjliggörs tack vare pivåtappens cirkelformade design. Semitrailerns rotation runt dragfordonet möjliggörs genom att vändskivan har förmågan att rotera i vinkelmätaren. Vridande rörelser i ekipaget förhindras av pivåkopplingen, vilket stabiliserar semitrailern under körning.

3.9 Automatiskt dockningssystem

För att möjliggöra längre fordonståg bestående av autonoma lastbilar krävs förmågan för ett ekipage att automatiskt koppla ihop med ett annat ekipage. Denna förmåga kräver ett fungerande mekaniskt system. Konstruktionen av ett sådant system har flera utmaningar som behöver lösas:

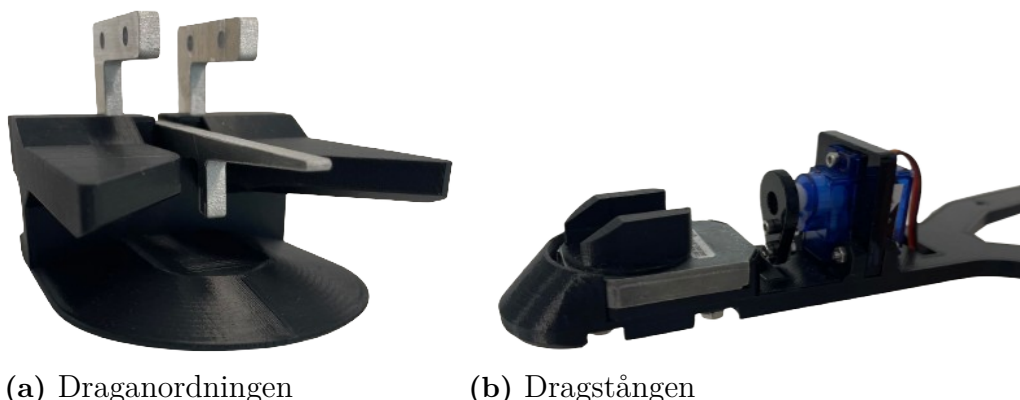
- Systemets delar på de två olika ekipagen som ska kopplas samman behöver vara utformade för att hantera positioneringsfel mellan ekipagen. Även om de två ekipagen endast ska framföras på plana golv finns det risk för höjdskillnader mellan dem. Dessutom, trots att ekipagen endast ska sammankopplas på raka sträckor, kan det finnas skillnader mellan dem i sidled. Avståndsmätningar mellan ekipagen kan också vara felaktiga, liksom eventuella skillnader i has-

tighet. Dessa avvikelser måste kunna hanteras av systemet för att möjliggöra dockning.

- För att systemet ska fungera till helautonoma lastbilar krävs det att konstruktionen för ihop- och isärkoppling av de olika ekipagen är helt automatisk. Denna kopplingsmekanism behöver dessutom klara relativt stora dragkrafter för att ekipagen ska kunna köra ihopkopplade eller bogsera varandra. Ur energiperspektiv bör kopplingen dessutom vara passiv och inte kräva kontinuerlig energitillförsel för att vara sammankopplade, eftersom själva syftet med dockningssystemet är att uppnå energieffektiviseringar. Dessutom bör möjligheten att skilja ekipagen åt inte kräva betydande energi och ska kunna utföras automatiskt efter signal från styrdatorn.
- Precis som vid pivåkopplingen mellan dragfordon och semitrailer kräver även dockningssystemet noggrann vinkelmätning (se Avsnitt 2.3). Detta är nödvändigt för att ekipagen ska kunna bestämma sin relativa position till varandra och tillsammans kunna manövrera på ett effektivt och kontrollerat sätt. Utmaningen för dockningssystemet är att minimera glappet mellan delarna på de två olika ekipagen för att uppnå noggrann och korrekt vinkelmätning.
- Eftersom semitrailern inte har någon kontakt med styrdatorn (se Avsnitt 3.7) behöver all elektronik och alla aktiva komponenter som krävs för ett fungerande dockningssystem vara placerade på dragfordonet.

3.9.1 Konstruktion av dockningssystemet

Det färdiga dockningssystemet består av två huvuddelar: draganordningen och dragstången. Draganordningen sitter monterad längst bak på semitrailern, mellan hjulen, och visas i Figur 3.23a. Dragstången som visas i Figur 3.23b sitter monterad på och sticker ut framför dragfordonet. Dessa två delarna fungerar tillsammans för att tillåta automatisk ihop- och isärkopplingen av ekipagen.



Figur 3.23: Dockningssystemets två huvuddelar.

Draganordningens huvudfunktion är att styra in och låsa fast dragstången. Styrningen åstadkoms genom en trattformad geometri som tillåter och korrigerar för fel både i vertikalled och i sidled. Styrningen i vertikalled sker genom de avfasningar som finns

på draganordningens under- och ovansida, medan styrningen i sidled sker genom den stora fångmunnen på draganordningens övre del. Låsningen av dragstången utförs med hjälp av en hasp som hakar i dragstången.

Draganordningen på semitrailern består uteslutande av passiva, mekaniska komponenter. Den största komponenten i draganordningen är en 3D-utskrivna del vars huvudsakliga funktion är att korrigera de ovan nämnda positioneringsfelen. Denna del är fastsatt i två fästen som är tillverkade av vattenskuren aluminium, vilka i sin tur är monterade i stommen på semitrailern. Haspen, som också är tillverkad av aluminium, kan rotera fritt kring en skruv som även går genom aluminiumfästerna. Detta säkerställer att alla de stora dragkrafterna i dockningssystemet fördelas på komponenter i aluminium.

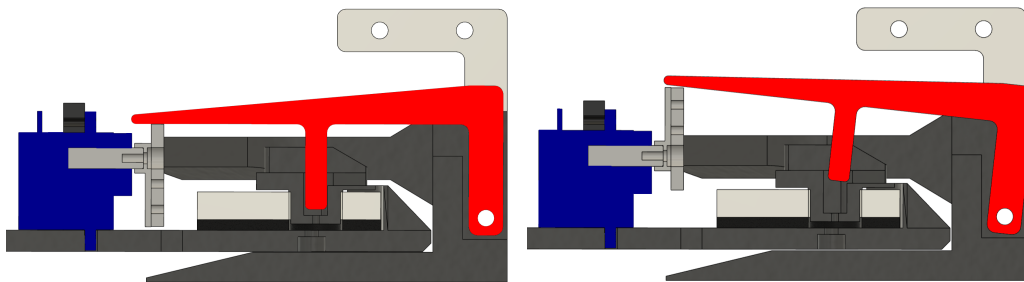
Dragstången på dragfordonet är utrustad med de två aktiva komponenterna i dockningssystemet: en liten servomotor och en vinkelgivare (se Bilaga A). Dessa komponenter är monterade på en 3D-utskrivna del som utgör dragstångens bärande konstruktion.

Servomotorn är monterad i ett fäste, laserskuret ur akrylplast, som sitter fast i den bärande konstruktionen. På servomotorns arm sitter en kamformad del vars uppgift är att lyfta upp haspen. Även denna del är tillverkad av akrylplast. I vinkelgivaren sitter en 3D-utskrivna adapter som är designad för att fungera som hake till haspen och för att passa in i draganordningens tratt. Adaptern till vinkelgivaren sitter löst fastskruvad i den bärande konstruktionen. Detta tillåter adaptern att rotera fritt, medan den samtidigt hålls tillräckligt fast för att förhindra att den lossnar eller oavsiktligt roterar.

3.9.2 Dockningssystemets ihop- och isärkoppling

När dragstången förs in i draganordningen, förs adaptern på vinkelgivaren till en position där den sitter inklämd i fångmunnen på draganordningen, vilket minimerar glappet vid vinkelmätningen. Samtidigt, när dragstången trycks in i draganordningen, höjs haspen upp på grund av avfasningen längst fram på dragstången. När dragstången är helt inne i draganordningen tar det stopp, varvid haspen faller ned i haken tack vare gravitationen (se Figur 3.24a). På detta sätt kan dockningssystemet hantera fel i avståndet mellan ekipagen, då dessa helt enkelt kan köras ihop tills det tar stopp.

När det är dags för ekipagen att koppla isär så roterar servomotorn och den kamformade servoarmen 180° , vilket lyfter haspen ur haken. Detta illustreras i Figur 3.24b. Denna åtgärd möjliggör för dragstången att föras ut ur draganordningen, vilket resulterar i att ekipagen är isärkopplade.



(a) Haspen hakar i dragstångens (b) När servon pekar uppåt åker
hasp. Ekipagen är ihopkopplade. haspen ur. Ekipagen är isärkopplade.

Figur 3.24: Skiss över hur dockningssystemet fungerar. Haspen är markerad i rött och servomotorn är markerad i blått.

3.10 Elkonstruktion

För att dragfordonet ska kunna framföras behövs ett antal elektriska system. Detta avsnitt kommer att behandla de centrala komponenter som ingår i det elektriska systemet, designval och uppkoppling.

3.10.1 Designval och komponenter

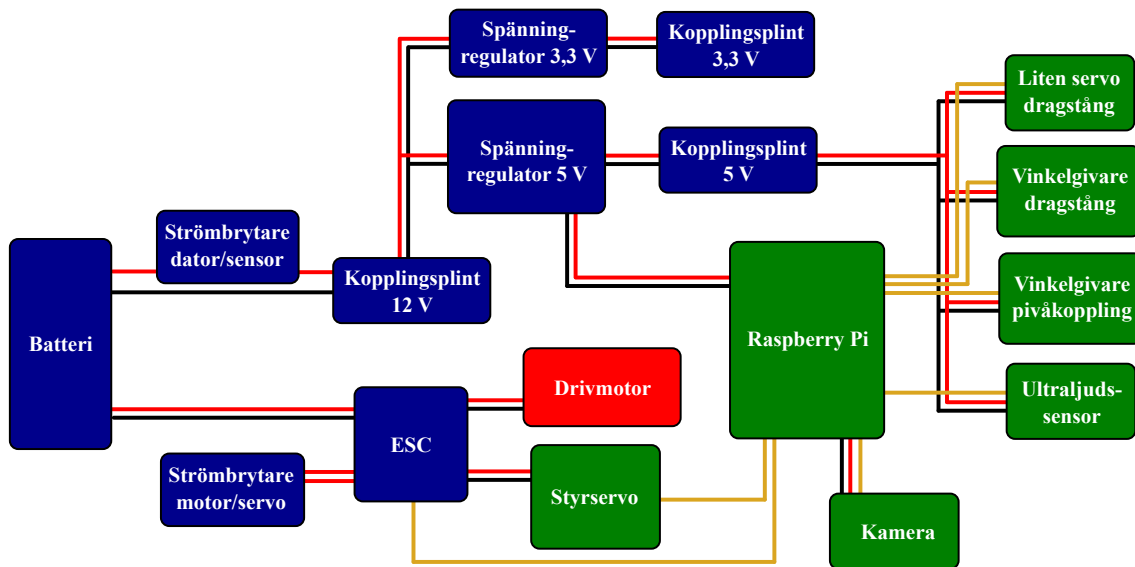
Det elektriska systemet består i sin helhet av ett antal mindre system med olika spänningsnivåer. Strömkällan som används är ett litium polymer batteri med nominell spänning på 11,1 V och en kapacitet på 3800 mAh. Detta används då denna modell av batteri fanns tillgänglig från tidigare års arbeten. Utöver 12 V systemet som spänningssätts direkt från batteriet finns två stycken spänningsregulatorer som reglerar spänningen till 5 V respektive 3,3 V likspänning. Datorn som används för att styra dragfordonet är en Raspberry Pi 5 som drar maximalt 5 A vid 5 V och har därmed en maximal effektförbrukning på 25 W. På grund av denna relativt stora effektförbrukning och känsligheten hos Raspberry Pi för spänningsfall valdes en mer kraftfull regulator för 5 V systemet. Denna regulator är utrustad med kylflänsar och kan leverera 8 A kontinuerligt utan extern kylning. Regulatorn för 3,3 V finns för att möjliggöra framtida utbyggnad med nya sensorer och kan leverera maximalt 20 W. Anslutet till 12 V systemet finns även en ESC som förser både drivmotorn och styrservot med ström.

3.10.2 Koppling av komponenter

Kopplingen av de elektriska systemen på dragfordonen har gjorts på ett så modulerat sätt som möjligt. Med detta menas att ändringar eller påbyggnader med nya enheter går att göra relativt enkelt utan att påverka de existerande systemen. Detta har gjorts bland annat genom användningen av skruvterminaler istället för fastlödda anslutningar. Ett blockschema för uppkopplingen finns att se i Figur 3.25. Från batteriet finns även två brytare kopplade där den ena bryter 5 V- och 3,3 V systemen som går till datorn och sensorerna, medan den andra bryter ESC:n som driver

motorn och styrservot. Detta gör det lättare att arbeta med fordonet och göra tester i kontrollerade former.

Från batteriet kopplas ESC:n parallellt med en kopplingsplint med skruvterminaler för 12 V systemet. Från denna plint försörjs spänningsregulatorerna för de andra spänningsnivåerna med ström. Även 5 V nivån och jord har kopplingsplintar där Raspberry Pi, sensorer och ställdon ansluts.



Figur 3.25: Blockschema av dragfordonets elektronik.

3.10.3 Sensorer

Sensorerna som används för dragfordonets navigering är en kamera för att detektera väglinjer och markörer samt en ultraljudssensor för att mäta avstånd till hinder och framförvarande fordon. Dessa sensorer sitter monterade på ett upphöjt fäste, se Figur 3.26, som gör det möjligt att justera kamerans vinkel uppåt och nedåt efter mjukvarugruppens behov. Att sensorerna placeras högt resulterar också i att ultraljudssensorn är riktad mot semitrailerns plana baksida istället för däcken och boggikonstruktionen. Detta är fördelaktigt då ljudvågorna reflekterar bättre mot en plan yta, vilket resulterar i mer tillförlitliga mätvärden från sensorn.



Figur 3.26: Dragfordonets sensorfäste med monterad kamera och ultraljudssensor.

4

Testmetodik

I detta kapitel beskrivs hur projektets tester har utförts för att verifiera att skalmodellerna uppfyller de krav och önskemål som presenterades i Tabell 3.1.

4.1 Skala och vikt

För att verifiera den fysiska skalan så har hjulbasen och spårvidden på både dragfordonet och semitrailern mäts upp. När det gäller semitrailern har skalan jämförts med dimensionerna för en semitrailer anpassad för 40-fots container. Dessutom har den totala längden på ekipaget uppmätts, inklusive längden på de ekipagen då de var sammankopplade. Modellens skala baserades på en verklig tung lastbil, där bredden är 260 cm och totalvikten är minst 3500 kg [14]. Beräkningarna i resultatet har jämförts med en verklig totalvikt på 7500 kg, för att få en mer realistisk uppskattning. Längden har jämförts med den maximalt tillåtna längden för en lastbil på svenska vägar, vilket är 34,5 m.

Vikten på både dragfordonet och semitrailern verifierades genom att ekipaget vägdes. Maxlasten är den vikt som maximalt kan lastas på semitrailern utan att försämra dess köregenskaper.

4.2 Hastighet

För att verifiera hastigheten har ekipaget körts en känd strecka och tiden uppmätts. Genom upprepning av denna metodik erhålls ett genomsnittligt resultat, vilket ökar testets trovärdighet. Denna testmetod har tillämpats både med och utan last, samt i både fram- och bakåtgående riktning. Detta görs för att kunna identifiera hastigheterna beroende på de olika förutsättningarna.

4.3 Däckfriktion

En viktig aspekt för ekipagets prestanda är den friktion som uppnås mellan däcken och underlaget, vilket är anledningen till att detta evalueras. Eftersom projektet är begränsat till körning inomhus görs testerna på en ren och plan golvyta. Då smuts från marken lätt fastnar på de mjuka silikondäcken är det också av intresse att undersöka hur smutslagret påverkar friktionen.

Innan mätningarna kunde påbörjas vägdes dragfordonet för att avgöra med vilken kraft däcken pressas mot marken, då detta påverkar friktionen. Det rullades även mot en smutsig golvyta för att däcken skulle bli belagda med ett lager smuts. Hjulen på dragfordonet låstes och en kraftmätare fästes i fordonets framända. Mätaren drogs parallellt med underlaget tills dragfordonet började flyttas. Denna statiska friktion antecknades och mätningen upprepades fem gånger där däcken roterades mellan varje mätning för att däcken skulle vara fortsatt smutsiga. Kraftmätaren och fordonet drogs sedan i en konstant hastighet och kraften avlästes och antecknades. Även den dynamiska friktionsmätningen upprepades fem gånger. Däcken rengjordes och mätningarna för både statisk och dynamisk friktion upprepades.

4.4 Mekaniskt styrsystem

För att verifiera de olika kraven ställda på dragfordonets styrning behövde vinkelutslagen på de båda hjulen mätas. Detta gjordes, enligt Figur 4.1, genom att placera dragfordonet vinkelrät mot en plan yta på ett känt avstånd. Laserpekare monterades på båda framhjul på så vis att den strålar längs hjulriktningen. På den plana ytan placerades en mätskala för att kunna avgöra avståndet mellan ljuspunkten och mittenpunkten av mätskalan. Svängvinklarna kunde sedan beräknas enligt

$$\delta_{\text{inner}} = \arctan \left(\frac{l_{\text{inner}} + \left(\frac{B}{2} + \sigma\right)}{A} \right) \quad (4.1)$$

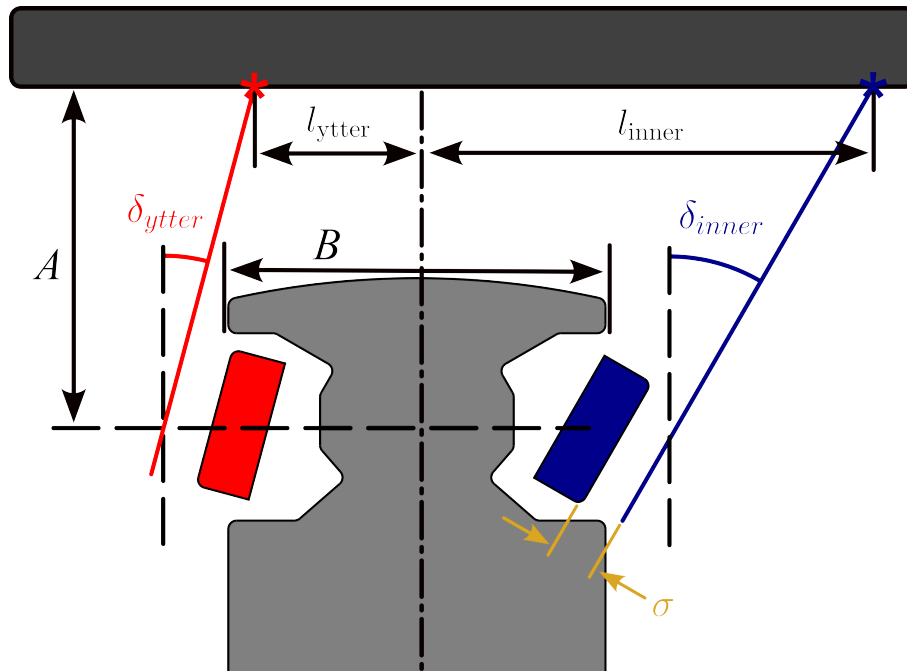
och

$$\delta_{\text{ytter}} = \arctan \left(\frac{l_{\text{ytter}} - \left(\frac{B}{2} + \sigma\right)}{A} \right), \quad (4.2)$$

där l_{ytter} och l_{inner} är de uppmätta avstånden från mittpunkten, alltså 0-punkten, av mätskalan till laserpunkten för ytter- respektive innerhjul. B är dragfordonets bredd, A är avståndet från främre hjulaxeln till mätytan och σ är avståndet från laserns fästpunkt till ljuskällan.

Vid mätning av styrvinklarna användes en mikrodator för att med jämna steg vrida styrservot och därmed båda hjulen. Avståndsvärdena antecknades för varje styruslag i ett höger- respektive vänstersvep. Detta för att kunna verifiera att styrningen är konsekvent åt båda håll. Ur datan kan förhållandet mellan de två hjulens svängvinklar studeras, vilket kan användas för att utvärdera Ackermann-geometrin hos dragfordonet. Även de maximala styrvinklarna kan bestämmas.

För att avgöra hur stort glappet är vid olika styruslag användes samma mättrigg. Genom att försiktigt vicka på hjulet kunde förflyttning av ljuspunkten uppmätas och vinkeln för glappet beräknas.



Figur 4.1: Illustration av uppställningen som användes vid mätning av styrvinklar.

4.5 Elektronik

Batteritiden för dragfordonen beräknades genom att summera de elektriska komponenternas uppskattade effekt. Endast effekten från motorn och Raspberry Pi:n inkluderas då alla andra effekter antas vara försumbara i jämförelse. Bägge komponenter antas drivas vid högsta last, och därmed 25 W vardera. Därefter kan batteritiden beräknas ur batterikapaciteten Q enligt

$$\begin{aligned}
 E_{\text{total}} &= U_{\text{nominell}} \cdot Q = P_{\text{total}} \cdot t_{\text{batteritid}} \\
 \Rightarrow t_{\text{batteritid}} &= \frac{U_{\text{nominell}} \cdot Q}{P_{\text{total}}}.
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

5

Resultat

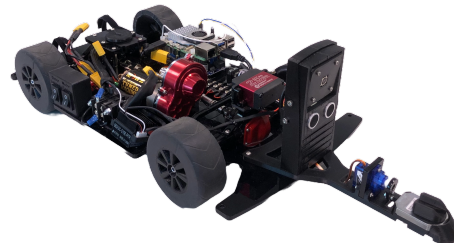
I detta avsnitt presenteras den slutgiltiga skalmodellen av både dragfordon och semitrailer tillsammans med resultaten från testning av de fysiska modellerna.

5.1 Färdig skalmodell

Två skalmodeller av lastbils ekipage i skala 1:12 har designats och konstruerats. Semitrailern visas i Figur 5.1 och dragfordonet visas i Figur 5.2 för semitrailern. Båda ekipagemodellerna är framställda på samma sätt, vilket gör dem identiska till varandra. Detta möjliggör för tester av konvojkörning där ordningen av fordonsmodellerna inte spelar någon roll. Figur 5.3 illustrerar de två ekipagen när de är ihopkopplade med ett sammankopplingsystem på ena ekipaget.



Figur 5.1: Modell av semitrailer i skala 1:12 som projektet har lett fram till.



Figur 5.2: Modell av dragfordon, utan kaross, i skala 1:12 som projektet har lett fram till.



Figur 5.3: Två sammankopplade ekipage.

5.2 Skala och vikt

Vid mätningar av dragfordonets bredd uppmättes den till 22,2 cm, vilket innebär att dragfordonets skala ligger mellan 1:11 och 1:12. Semitrailerns längd mättes till 100 cm, bredden 20 cm och höjden 21,5 cm, vilket motsvarar en skala på 1:12. Längden på ett ekipage var 125 cm, medan båda ekipagen med sammankopplingsystemet på ena ekipaget uppmättes till 258 cm. Skalan på de sammankopplade ekipagen var mellan 1:13 och 1:14 i förhållande till maximala längden för en lång lastbil.

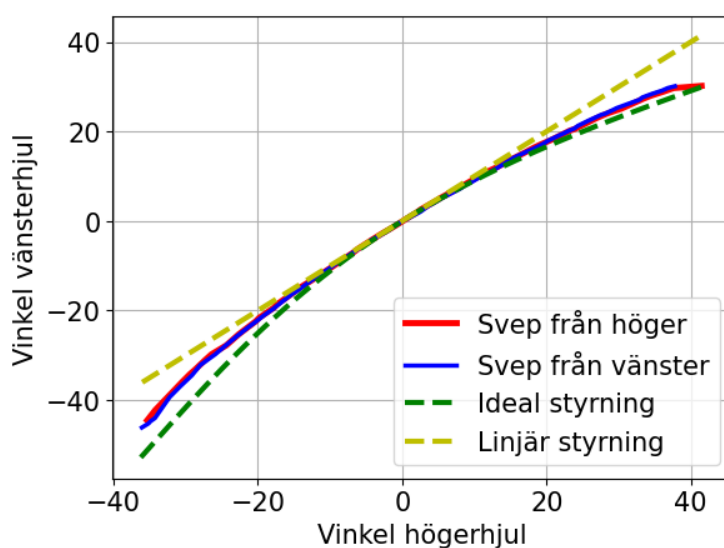
I Tabell 5.1 ser man vikten som uppmättes på de olika delarna av ekipaget. Vikten på ekipaget uppfyllde kravet men inte önskemålet. Vid jämförelse av den verkliga vikten på en tung lastbil jämfört med dragfordonets vikt, blir skalan 1:14.

Tabell 5.1: Viktmätning av den färdiga skalmodellen.

Del	Vikt
Dragfordon	$2787.0 \pm 0,3$ g
Semitrailer	$4369.4 \pm 0,3$ g
Ekipage	$7156,4 \pm 0,6$ g

5.3 Mekaniskt styrsystem

Vid mätning av den mekaniska styrningens egenskaper erhöles det maximala styrutslaget för innerhjulet till $42,5^\circ$ där nollvinkeln är rakt fram. Förhållandet mellan höger- och vänsterhjulens vinklar genom hela styrutslaget finns att se i Figur 5.4, där ideal styrning motsvarar de önskade vinklarna för optimal placering av hjulbarnornas cirkelcentrum. Med linjär styrning menas ett styrsystem där vinklarna på båda hjulen alltid är lika.



Figur 5.4: Båda däckens vinklar i förhållande till varandra för dragfordonets styrsystem, ett linjärt styrsystem och ett idealt styrsystem.

Det uppmätta glappet i styrningen redovisas i Tabell 5.2. Riktinkeln är den vinkeln som mätningen av glappet gjordes kring, där glappet är angett som avvikelser från riktinkeln.

Tabell 5.2: Tabell över uppmätt glapp kring ett antal styrvinklar.

Riktinkel	Glapp i styrning
0°	± 1,7°
10°	± 2,0°
20°	± 2,4°
30°	± 1,7°
40°	± 1,9°
Genomsnitt	± 1,9°

5.4 Maxlast och hastighet

Den maximala vikten som testades att lasta semitrailern med var 14 kg. Med denna vikt applicerad påverkades inte köregenskaper som styrförmåga och drivning av ekipaget. Vid mätningar för hastigheten applicerades en vikt på 10 kg för tester med last. Resultaten av de minimala och maximala hastigheterna finns i Tabeller 5.3 respektive 5.4.

Tabell 5.3: Maximal hastighet med och utan last.

Ekipage	Hastighet
Utan last	28,1 cm/s
Med last	27,5 cm/s
Backning utan last	20,9 cm/s
Backning med last	17,4 cm/s

Tabell 5.4: Minimal hastighet med och utan last.

Ekipage	Hastighet
Utan last	2,1 cm/s
Med last	2,1 cm/s

5.5 Däckfriktion

Vid mätning av däckfriktion vägde dragfordonet 2679,2 g. Resultaten av mätningarna med smutsiga och rena däck ses i Tabell 5.5. Vid konstant hastighet, skapade smutsiga däck en medelvärdeskraft på 27,28 N och medelvärdeskraften för statisk friktion 11,08 N. Rena däck skapade en medelvärdeskraft vid konstant fart på 37,4 N och medelvärdeskraften vid statisk friktion 13,52 N.

Tabell 5.5: Däckens statiska respektive dynamiska friktionskraft.

(a) Smutsiga däck.

(b) Rena däck.

Mätning	Dynamisk	Statisk	Mätning	Dynamisk	Statisk
1	28 N	12 N	1	33 N	13 N
2	27 N	11 N	2	37 N	14 N
3	26 N	11 N	3	40 N	14 N
4	29 N	11 N	4	38 N	13 N
5	27 N	10 N	5	39 N	14 N
Medelvärde	27,4 N	11,0 N	Medelvärde	37,9 N	13,6 N

5.6 Dockningsanordning

Det slutgiltiga dockningssystemet löste framgångsrikt alla de utmaningar som identifierades i Avsnitt 3.9. Genom tester där ett ekipage manövrerades manuellt visade det sig att det kunde kopplas ihop och isär med ett framförvarande, självkörande ekipage. Däremot utfördes inga tester med två helt autonoma ekipage eftersom mjukvaran för detta ändamål ännu inte hade implementerats. Tester av vinkelmätningen utfördes inte heller av liknande anledning.

5.7 Elektronik

Den slutgiltiga elkonstruktionen uppfyller de krav som ställs. Spänningsregulatorerna kan leverera 8 A kontinuerligt för 5 V systemet och 2,5 A för 3,3 V systemet, vilket är betydligt mer än vad som krävs i nuläget. Utöver detta har Raspberry Pi 26 stycken användbara anslutningar och samtliga spänningsnivåer är kopplade till skruvterminaler, vilket tillåter enkel utbyggnad av elektroniksystemet i framtiden. Givet den nominella batterispänningen på 12 V, batterikapaciteten på 3,8 A h och den uppskattade totala effekten på 50 W så beräknas batteritiden till strax under 1 h, vilket innebär att dragfordonets batteritid teoretiskt sett uppfyller kravet vid körning.

5.8 Kostnad

Totalkostnaden av delarna i Bilaga A för de två ekipagen summerades till 9959 kr exklusive moms. Eftersom ett batteri från tidigare års projekt användes blev det faktiska utlägget för projektet 9 584 kr. Utan kostnaden för de två enkortsatorerna, som inte gick under projektgruppens budget, uppgick kostnaden för de två ekipagen till 7 884 kr exklusive moms. Det innebär att kostnaden för ett enskilt ekipage var 3 942 kr, vilket är under kostnadskravet.

6

Diskussion

I detta kapitel diskuteras de olika delarna som projektet har innefattat och även framtida utmaningar med projektet. Det innefattar utvärdering av resultaten och vidareutveckling för projektet, samt de sociala och etiska aspekterna.

6.1 Utvärdering av resultat

I detta avsnitt diskuteras resultaten från testerna på skalmodellen. Här bedöms de olika testerna utifrån deras resultat och möjlighet till förbättring, men även diskussion utifrån faktorer som kan ha påverkat resultaten.

6.1.1 Skala och vikt

Den resulterande skalan för ekipagen är lämplig och uppfyller kraven i kravspecifikationen. Vikten hamnade också på en lämplig nivå, då den mest realistiska jämförelsen är med en verklig lastbil som väger 7500 kg. Att utgå ifrån lägsta möjliga vikten på 3500 kg skulle inte varit en rimligt då vikten för en tung lastbil generellt sett är betydligt högre.

6.1.2 Mekaniskt styrsystem

Den mekaniska styrningen är en avgörande komponent i att uppnå en konsekvent och pålitlig skalmodell. De kriterierna som tagits i beaktning i detta projekt är det maximala styrutslaget, glappet i styrningen och implementationen av Ackermann-geometri. Det maximala styrutslaget uppfyllde kravet som ställts och kom även nära att uppfylla önskemålet på 45° . Även glappet uppfyllde kravet med marginal, men uppfyllde inte det högre ställda önskemålet. Genom att avläsa Figur 5.4 kan även vinklarna som erhålls med dragfordonets Ackermann-geometri jämföras med de ideala vinklarna. Viss avvikelser kan ses vilket är förväntat då Ackermann-geometrin endast är en approximation, men en förbättring från det linjära styrsystemet är uppenbar.

6.1.3 Hastighet

De resulterande lägsta respektive högsta hastigheterna uppfyller inte helt de krav som var ställda (se Tabell 3.1). Under testning av ekipagen blev det tydligt att det

inte gick att uppnå både de lägsta och högsta hastigheterna med samma konfiguration av drivlinan. Då ett stort fokus riktades till manövrar i låg hastighet, exempelvis dockning mellan ekipagen, ansågs kravet för lägsta hastighet viktigare än att uppnå en hög topphastighet. I och med detta justerades utväxlingen i drivlinan och lägsta körbara hastighet blev mycket nära det uppsatta kravet. På grund av detta uppnås endast drygt halva det uppsatta kravet för maximal hastighet. Att mätningarna genomfördes manuellt genom längdmätning och tidtagning innebär en viss osäkerhet i mätningen. Denna osäkerhet hade troligtvis kunnat minskas med precisionsverktyg som exempelvis laserhastighetsmätare.

6.1.4 Däckens friktion

Däckens grepp på vägen påverkar fordonets förmåga att accelerera, bromsa och svänga vilket i sin tur påverkar dragfordonet prestanda. Det är tydligt från resultaten av friktionsmätningen att smuts på däcken leder till mindre friktion mot underlaget. Detta beror troligtvis på att smutsen skapar ett lager på däcken som minskar kontaktytan mellan silikonen och marken. Rena däck har mer kontakt mellan det mjuka silikonet och underlaget och ger därför högre friktion.

En intressant observation är att den statiska friktionen genom alla mätningar är betydligt lägre än den dynamiska. Detta skulle kunna bero på att de mjuka silikon-däcken sträcks ut då de släpas mot marken med högre hastighet och därmed får en större kontaktyta.

6.1.5 Elektronik

Den teoretiskt beräknade batteritiden är en rimlig uppskattning om hur länge ekipaget kan framföras. Det är viktigt att beakta att detta värde endast är baserat på teoretiska beräkningar och inte verifierats med praktiska tester. Hade det gjorts mer praktiska tester skulle ge mer tillförlitliga och realistiska värden på batteritiden, eftersom alla faktorer som påverkar tiden blir inkluderade.

6.1.6 Kostnad

Kostnaderna som sammanställdes i projektet hölls inom budgeten. Komponentlistan i Bilaga A omfattar de delarna som gruppen har fått köpa in. Det är viktigt att notera att det även finns komponenter och material som har tillhandahållits gratis och som inte har inkluderats i den sammanställda kostnaden. Dessa komponenter och material har finansierats separat av Chalmers-avdelningarna, C.A.S.E lab och Prototypplabbet, och har därför inte tagits med i resultatredovisningen.

Komponenterna som har finansierats av dessa avdelningar inkluderar bland annat, infästningsmaterial, elektriska komponenter som kablar, kontakter och brytare. Dessutom har material i form av stål, mässing, plåt, infillament till 3D-utskrivare och akrylplast använts för att tillverka skalmodellerna.

6.2 Vidareutveckling

I fallet av vidare arbeten med detta projekts skalmodeller finns det en del områden att arbeta vidare på. Detta avsnitt behandlar de områden som hade varit av intresse att vidareutveckla i kommande projekt.

6.2.1 Hastighetsmätning och reglering

Det finns flera orsaker till att noggrann hastighetsreglering av drivmotorn är viktigt. Om dragfordonets framdrivning styrs genom spänningsreglering utan återkoppling på den faktiska motorhastigheten eller med undermålig hastighetsreglering kommer fordonet inte kunna framföras med en konsekvent hastighet om yttre omständigheter varierar. Exempel på yttre omständigheter skulle kunna vara lastad vikt, lutning eller ojämnheter i underlaget. Detta försvårar styrning av ekipaget då exempelvis kameran kommer behöva hantera olika hastigheter beroende på de förutsättningar som finns. Ett annat problem med osäkerheter i hastighet är samkörning mellan de både ekipagen när de kopplats samman. Om det inte kan säkerställas att båda ekipagen förflyttas med samma hastighet finns risk att det bakre dragfordonet släpas alternativt att det bakre dragfordonet skuver på det främre ekipaget.

För att eliminera dessa problem behöver egenskaperna hos den monterade ESC:n undersökas för att utvärdera hur väl den reglerar hastigheten. Om hastighetsregleringen bedöms otillräcklig kan en varvtalsmätare placeras på motoraxelns baksida eller på annat lämpligt ställe på drivlinan. Med hjälp av denna mätdata och den kända utväxlingen från motorn till hjulen kan hastigheten mätas och därefter regleras.

6.2.2 Vinkelgivare

För att kunna modellera hela systemets tillstånd måste vinkeln mellan dragfordonen och deras tillhörande semitrailer mätas noggrant. Vid samkörning mellan två sammankopplade ekipage behöver även vinkeln mellan främre semitrailerns bakkant och bakre dragfordonens framsida mätas. Detta är för att kunna beräkna positionen av fordonstågets delar i förhållande till varandra. Vinkelgivare för dessa ändamål finns monterade på båda dragfordonen, men är ännu inte implementerade eller undersökta. Ett viktigt arbete för att kunna effektivt framföra fordonen autonomt är alltså att implementera mätningen av dessa vinklar och använda dem i regleringen av konvojen.

6.2.3 Styrbar dragstång

Dragstången är i nuläget en stel komponent som är fast monterad på dragfordonets framända. Detta innebär att den sticker ut och förlänger ekipaget vid körning då båda ekipagen inte är sammankopplade. En annan funktion hos systemet som är av intresse är att båda ekipagen ska kunna köra både längst fram och längst bak i fordonståget. Detta innebär att det främre ekipaget måste ha sin dragstång

monterad även om den inte används. För att undvika dessa problem och förkorta ekipaget är det intressant att undersöka möjligheten att göra en justerbar eller infällbar lösning för dragstången. Detta hade även gjort det möjligt att justera avståndet mellan ekipagen under körning. Detta kan exempelvis vara användbart ifall man vill köra närmre för att minska luftmotstånd på raksträckor i hög hastighet, men öka avståndet för ökad manövrerbarhet vid skarpa kurvor.

6.2.4 Fjädring

Ett beslut som togs tidigt i projektet var att utesluta fjädring ur den fysiska modellen. Detta beslut fattades för att förenkla konstruktionen, men även få mer förutsägbart beteende under körning utifrån de avgränsningar som upprättats. Ett sätt att bättre efterlikna dynamiken hos en verklig lastbil hade därmed varit att implementera fjädring i lämpligt anpassad skala. Att implementera fjädring hade också kunnat ge bättre väghållning och möjliggöra körning på ojämna underlag, exempelvis i utomhusmiljöer.

6.2.5 Utökad funktionalitet hos semitrailer

I detta projektet konstruerades semitrailern som en passiv komponent utan några aktiva funktioner. Med installation av sensorer, kameror eller annan elektronik kan ytterligare funktionalitet byggas. Exempelvis skulle avståndsmätning och en kamera riktad bakåt kunna möjliggöra mer avancerade manövrar vid backning längs en vägbana. Det är även möjligt att använda utrymmet i semitrailern för batterier för ökad räckvidd eller för kommunikationsutrustning.

6.2.6 Automatisk på- och avkoppling av trailer

Ett annat utvecklingsområde för semitrailern hade varit att bygga om infästningen till dragfordonet för att möjliggöra automatisk på- och avkoppling av en semitrailer till ett dragfordon. Genom att göra detta hade man möjliggjort för dragfordonet att autonomt köra och hämta en färdiglastad semitrailer och leverera den till en valfri plats. För att detta ska vara möjligt behöver både infästningen och semitrailern omarbetas. Detta då trailern måste kunna stå utan stöd av dragfordonet för att kunna autonomt påkopplas, vilket den i nuläget inte kan göra. En möjlig lösning är stödben som fälls ner då trailern inte är ansluten till sitt framförvarande dragfordon.

6.3 Sociala och etiska aspekter

Den tekniska utveckling har stort inflytande på dagens samhälle. Denna utveckling kan ge utslag i både positiva och negativa riktningar. Å ena sidan kan utvecklingen höja människans levnadsstandard och tillgängligheten för tekniken som utvecklas ökas. Å andra sidan blir tekniken mer avancerad och svårare att kontrollera för människan. I avsnitten sociala och etiska aspekter analyseras hur en autonom lastbil kan komma att påverka samhället.

6.3.1 Sociala aspekter

Vid användning av längre lastbils kombinationer kan antalet använda lastbilar minskas, vilket medför ekonomiska fördelar. När lastbilarna blir längre ökar dock riskerna för andra trafikanter i trafiken. Riskerna som medkommer är bland annat att både sikten och omkörningsmöjligheterna blir mer begränsade och till följd av detta blir omkörningstiden längre. Trots den ökade risken, betyder inte detta att den totala risken för kollision ökar, tvärtom, eftersom antalet lastbilar ute på vägarna minskar bidrar det till färre olyckor [3].

Nio av tio trafikolyckor uppstår på grund av mänskliga fel [15]. De autonoma lastbilarna möjliggör att transporter och leveranser inte påverkas av den mänskliga faktorn. Dessutom kan de autonoma lastbilarna transporteras dygnet runt då det inte finns någon förare som behöver stanna och vila, vilket gör att det blir mer effektiva leveranser. Det kan bidra till att minskad trängsel för andra trafikanter under dagen då större delen av transporterna kan ske under natten.

Då autonoma lastbilar teoretiskt sett skulle kunna köras dygnet runt kommer lastbilsförare som yrke påverkas av intåget av autonoma lastbilar. Trots oron att det nuvarande yrket som lastbilsförare står i risk för att bli utkonkurrerat av automatiseringen så betyder det inte att jobben kommer försvinna. Enligt Volvo lastvagnar så kommer förarna fortsätta arbeta som lastbilsförare men i mer kompetenskrävande situationer [16]. Till exempel nya arbetsmöjligheter inom service eller automations-teknik.

6.3.2 Etiska aspekter

En stor utmaning med autonoma fordon är säkerheten. Det autonoma fordonet måste kunna ta rätt beslut i stunden för att undvika person- och saksador. Systemet till det autonoma fordonet måste därför ständigt testas och utvecklas för att till så hög grad som möjligt eliminera risken för skador. För att användningen av autonoma fordon ska kunna rättfärdigas måste säkerheten vara minst lika hög som med mänskliga förare.

Vid en eventuell olycka är det svårt att avgöra vem som bär ansvaret. Är det tillverkaren av fordonet som bär ansvaret? Företaget som utvecklat systemet? Personen som äger fordonet? Personen som sitter i förarsätet? Det är en svår fråga som det inte finns något direkt svar på.

Det självkörande fordonet ska respektera mänskliga värdigheten och friheten att välja tillvägagångssätt i situationerna man ställs inför [17]. Skulle den autonoma lastbilen ställas inför ett dilemma där dödsfall är oundvikligt behöver fordonet kunna prioritera. Om scenariot är att antingen köra på ett äldre par eller krocka så att passagerarna i lastbilen omkommer, hur ska fordonet prioritera i ett sådant dilemma? Ska den prioritera minst antal dödsfall, ålder, kön eller social status?

7

Slutsats

I detta projektet har två skalmodeller av autonomt drivna lastbilsekipage bestående av dragfordon och semitrailer designats och tillverkats. Arbetet har berört konstruktion av mekanisk styrning med Ackermann-geometri och fokus på noggrannhet och manövrerbarhet. En drivlina har också dimensionerats och utformats för att kunna hantera önskade arbetsområden och kapabiliteter. Däck gjutna i silikon möjliggör effektiv kraftöverföring från drivlinan till underlaget. Dessutom konstruerades en dockningslösning för att kunna utföra både själv- och samkörningsfunktioner. För att verifiera att parametrarna uppfyller uppsatt kravspecifikation inom respektive område har tester genomförts.

Lastbilsekipagen som projektet resulterat i har uppnått majoriteten av de ställda kraven. Den mekaniska styrningen uppnådde ett maximalt styrutslag på $42,5^\circ$ och ett glapp i styrvinkeln på $\pm 1,9^\circ$. Drivlinan åstadkommer en minimal hastighet på $2,1 \text{ cm/s}$ och en maximal hastighet på ungefär 28 cm/s både med och utan last. Orsaken till att krav på hög noggrannhet i styrning och körning i låga hastigheter varit viktigt genom projektet är för att tillåta framtida själv- och samkörningsfunktioner. Något som i detta arbete beprövades genom att implementera och testa dockningsfunktioner mellan ekipagen. I kombination med resultaten från styrning och drivlinan visade sig dockningsanordningen vara lyckad, vilket tyder på att även framtida projekt skulle kunna nyttja ekipagen.

Syftet med projektet var att ta fram en testbädd för framtida själv- och samkörningsfunktioner. Från resultaten av de genomförda testerna kan det konstateras att vidare implementering av mer avancerade funktioner är möjliga.

Referenser

- [1] Trafikanalys. "Lastbilstrafik 2022," 2023. [Online]. Tillgänglig: <https://www.trafa.se/globalassets/statistik/vagtrafik/lastbilstrafik/2022/lastbilstrafik-2022.pdf> (hämtad 2024-04-30).
- [2] Trafikanalys. "Dagligvaruhandelns varutransporter," 2023. [Online]. Tillgänglig: https://www.trafa.se/globalassets/pm/2023/pm-2023_8-dagligvaruhandelns-varutransporter---en-kartlaggning.pdf (hämtad 2024-04-30).
- [3] Transportstyrelsen. "Grönt ljus för 34,5 meter långa lastbilar – minskar utsläppen med 4–6 procent," 2023. [Online]. Tillgänglig: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/om-transportstyrelsen/pressrum/nyhetsarkiv/2023/gront-ljus-for-345-meter-langa-lastbilar--minskar-utslappen-med-46-procent/> (hämtad 2024-02-28).
- [4] Peter Andersson och Pernilla Ivehammar. "Benefits and costs of autonomous trucks and cars," i: *Journal of Transportation Technologies*, vol. 9, nr. 2, (april 2019). [Online]. Tillgänglig: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=91048>, (hämtad 2024-05-10).
- [5] Volvo Trucks. "Veras första uppdrag: Volvo Lastvagnar presenterar en självkörande transportlösning mellan ett logistikcenter och en hamn," 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://www.volvogroup.com/se/news-and-media/news/2019/jun/news-3336098.html> (hämtad 2024-04-30).
- [6] Volvo Trucks. "The full potential of the transport industry is yet to be seen," 2018. [Online]. Tillgänglig: <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/stories/2018/sep/future-potential.html> (hämtad 2024-04-30).
- [7] Erik Andersson m. fl. *Optimering av kurvtagning för en aktivt styrd dolly*. Tekn. rapport. Chalmers tekniska högskola, 2020. DOI: 20.500.12380/301987.
- [8] Julius Bengtsson m. fl. *Utveckling, simulering och implementering av styrning till autonom dolly*. Tekn. rapport. Chalmers tekniska högskola, 2021. DOI: 20.500.12380/303576.
- [9] Emilia Frisk Jonsson m. fl. *Autonom styrning av en lastbilskombination*. Tekn. rapport. Chalmers tekniska högskola, 2022. DOI: 20.500.12380/304595.
- [10] Emil Aretorn m. fl. *Autonom styrning av en lastbil - Utveckling, simulering, samt implementering av ett styrsystem för backning av en dragbil med släp inom ett känt område*. Tekn. rapport. Chalmers tekniska högskola, 2023. DOI: 20.500.12380/306547.

- [11] The Contact Patch. "Ackermann geometry," 2015. [Online]. Tillgänglig: <https://the-contact-patch.com/book/road/c0504-ackermann-geometry> (hämtad 2024-04-30).
- [12] alco_dl500b. "Axial SCX10 Trail Honcho," Hämtad: 5 maj, 2024. [Fotografi]. Tillgänglig: <https://www.flickr.com/photos/22132463@N07/8509882326/>.
- [13] StructX. "Static Friction Coefficients," 2024. [Online]. Tillgänglig: https://structx.com/Material_Properties_005a.html (hämtad 2024-05-05).
- [14] Transportstyrelsen. "Lastbil". 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/fordon/fordonsregler/lastbil/> (hämtad 2024-04-18).
- [15] Arbetsmiljöverket. "Huvudsakliga risker i trafiken," Tillgänglig: <https://www.av.se/halsa-och-sakerhet/sakerhet-i-trafiken/huvudsakliga-risker-i-trafiken/> (hämtad 2024-02-28).
- [16] Volvo Trucks. "Hur påverkas mitt jobb som förare av automatiseringen?," 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.volvotrucks.se/sv-se/news/magazine-online/2020/automatisering-paverkan-foerarjobb.html> (hämtad 2024-02-28).
- [17] Europaparlamentet. "Självkörande bilar i EU: från science fiction till verklighet," 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://www.europarl.europa.eu/news/sv/headlines/economy/20190110ST023102/sjalvkorande-bilar-i-eu-fran-science-fiction-till-verklighet> (hämtad 2024-02-28).

A

Komponentlista

Komponent	Modell	St	Pris	Från
Akryl till containern	RS PRO 1000mm x 500mm x 3mm	1	901	RS Comp.
Bak- och framaxel	Dilwe axle for Axial SCX10	2	829	Amazon
Batteri	11,1 V 3800 mAh 20C LiPo	2	375	Conrad
Differentialväxel	Vbest life Differential for 1/10 RC Car	4	118	Amazon
Drivaxel bak	VGEBY Drive Shaft 90-125mm (2-pack)	1	177	Amazon
Drivaxel fram	Axspeed Drive Shaft for 1/14 RC Tamiya	2	138	Amazon
Drivmotor	540 Brushed Motor 80T for SCX10	2	201	Amazon
ESC	320A Speed Controller for Brushed Motor	2	129	Amazon
Fördelningslåda	Drfeify växellåda for Axial SCX10	2	253	Amazon
Liten servomotor	Servo 9 g	2	15	CASE
Planetväxel	Dilwe 1/3 Planetary Gearbox 540	2	279	Amazon
Raspberry Pi	RPI5-8GB-SINGLE	2	850	Farnell
Silikon	Flytande silikon - Hård (40 Shore A) 1 kg	2	351	Makemake
Silikonfärger	Svart	2	28	Makemake
Spänningsreg. 3,3 V	Buck - LM2596	2	10	CASE
Spänningsreg. 5 V	AZDelivery Buck 12A (3-pack)	1	200	Amazon
Strömbrytare	Switch AC 6A/250V	4	5	CASE
Styrservo	ZHITING 25KG Servo Metal (2-pack)	1	360	Amazon
Superlim	Technicqll Clear Super Glue for Silicone	1	159	Amazon
Vinkelgivare	CUI Devices AMT102-V	4	189	Mouser
			Totalkostnad:	9959 kr

B

Metod vid gjutning av däck

De två delarna till gjutformen skruvades först ihop med fyra stycken skruvar och muttrar. Sedan fästes fälgen med en skruv genom fälgens mitt med en mutter på framsidan av fälgen. Mellan fälgen och gjutformen lades en o-ring för att sluta helt tätt. En bricka användes mellan skruvhuvudet och fälgen och mellan muttern och fälgen.

Därefter blandades silikon med tillräckligt mycket färg för att bli helt svart i en kopp. 40 ml silikon behövs för varje däck men 70 ml används istället på grund av spill som uppkommer och för att säkerställa att hela däcket fylls med silikon. När färgen blandades med silikonet bildades ett stort antal luftbubblor. Dessa bubblor avlägsnades genom att placera koppen i en vakuumkanmare i fem minuter. Till en början användes inte maxtryck på vakuumkanmaren för att undvika att silikonet skulle bubbla över. Efter cirka två minuter ökades trycket till max för att snabbare få bort alla luftbubblor.

Sen blandades 1,5 g härdningsmedel per 70 g silikon i koppen, vilket påbörjade stelningen av silikonet. Koppen placerades återigen i vakuumkanmaren, nu i tre minuter. Silikonet hälldes sedan ner i en gjutform samtidigt som formen roterades. Detta för att få en jämn nivå av silikon över hela däcket. När silikonet hällts i gjutformerna uppkom det nya luftbubblor och därför placerades gjutformerna med silikon i vakuumkanmaren igen i tre minuter. Innan silikonet stelnade helt togs gjutformerna med silikon ut ur vakuumkanmaren.

När silikonet hade stelnat avlägsnas hjulet från gjutformen genom att lossa alla skruvar. För att inte skada däcket gnuggades de två delarna av gjutformen mot varandra försiktigt tills däcket lossnade. Överflödigt silikon på däcket skaras sedan av med en kniv.

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS