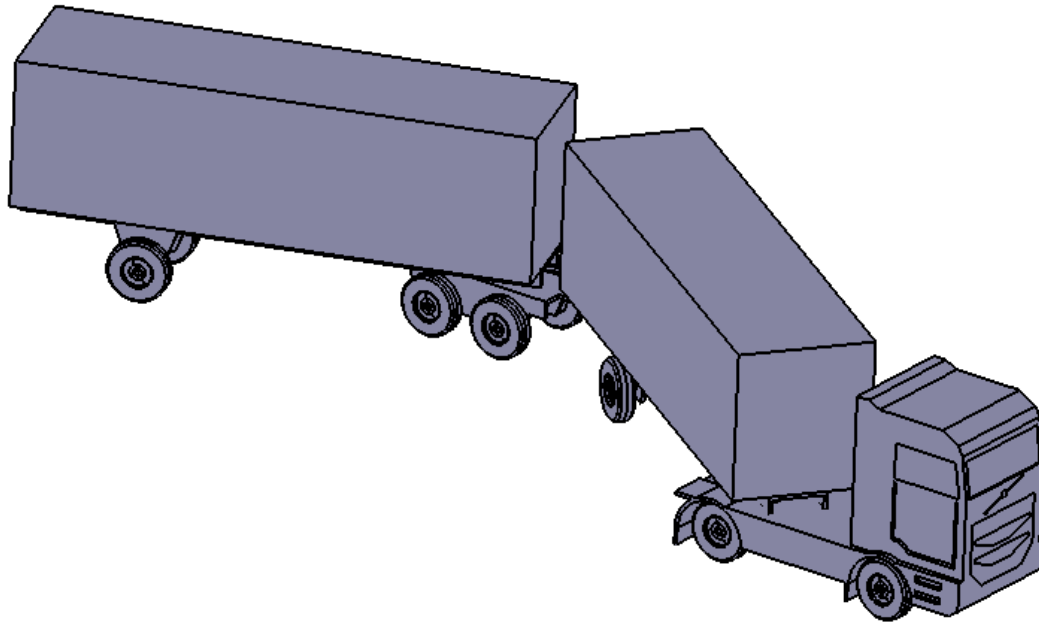


CHALMERS



Backning med långa fordonskombinationer

Kandidatarbete, SSYX02-15-25

Institutionen för Signaler och system

Alexander Börjesson
Jonatan Nilsson
Marcus Olsson

Abstract

This thesis examines the possibilities to develop a control system that aims to simplify the act of reversing with a long vehicle combination. In Sweden the overall length of a vehicle combination is 25.25 meters. However, recently the possibility of longer vehicle combinations has been investigated.

To simplify the reversing a modular control system has been developed. The control system will take input from sensors placed at the truck and interpret these inputs to create a output which will change the steering angle and in the end stabilize the system.

To be able to do stabilize the system it was necessary to know how the truck moved and the relation between the semitrailers and the truck. Therefore equations for the truck and semitrailer movement and the relation between them was calculated. These equations where then linearized to simplify the calculations. Using state feedback and the LQR-method, the system were made stable.

To verify that the control system is working, a physical model has been built to act as a test platform for the control system. During simulations with Simulink and the physical model we could verify that the control system is working. This means that we can conclude that the project was successful.

Sammanfattning

Denna rapport undersöker möjligheten att utveckla ett regelsystem som syftar till att underlätta vid backning med långa fordonskombinationer. I Sverige är för närvarande gränsen för de längsta fordonskombinationerna 25.25 meter. Diskussioner har börjat föras huruvida denna gräns borde ökas till 32 meter för att minska antalet lastbilar på vägarna. Dock ger längre fordonskombinationer ett system som är mer instabilt vilket innebär att det blir svårare att backa.

För att underlätta backningsprocessen har ett modulärt regelsystem utvecklats. Modulärt innebär här att det skall gå att applicera på ett oändligt antal släp. Reglersystemet tar insignaler ifrån sensorer som är placerade på lastbilen och tolkar de för att skapa utsignaler som reglerar styrningen på lastbilen för att stabilisera systemet.

Först ställdes ekvationer över hur lastbilen och släpen rör sig och hur de förhåller sig till varandra. För att förenkla dessa ekvationer, linjäriserades de vilket gav mer hanterbara ekvationer. Eftersom systemet i grunden är instabilt och ett stabilt system söktes, användes tillståndsåterkoppling för att stabilisera systemet. En återkopplingsvektor beräknades med LQR-metoden, när denna faktor multipliceras med den instabila insignalen erhålls ett stabilt system.

Under projektet tillverkades en fysisk modell i form av en lastbil som används som plattform för tester av regelsystemet.

Slutligen diskuteras möjligheterna att applicera det utvecklade regelsystemet på en riktig lastbil och förslag på fortsatt arbete presenteras.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Problembeskrivning	2
1.3.1	Krav	2
1.3.2	Delproblem	3
1.4	Avgränsningar	3
2	Matematisk modellbygge	5
2.1	Kinematik dragbil	5
2.2	Matematisk modell DRT-konfiguration	7
2.2.1	Kinematiskt modellbygge DRT-konfiguration	7
2.2.2	Kinematiska ekvationer	8
2.3	Olinjär tillståndsmo­dell DRT-konfiguration	9
2.4	Analys av det olinjära systemet	10
3	Reglerdesign	11
3.1	LQR	11
3.2	Linjärisering	12
3.3	Reglersystem för backning rakt bakåt	13
3.3.1	Tillståndsåterkoppling	13
3.3.2	Vinklar mellan moduler	14
3.3.3	Alla tillstånd	14
3.4	Reglersystem för backning efter cirkulär trajektoria	15
3.4.1	Cirkulär trajektoria	15
3.4.2	Reglersystem	17
4	Fysisk modell	18
4.1	Användning	18
4.2	Uppbyggnad	18
4.3	Material	19
5	Verifiering	25
5.1	Verifiering av reglersystemet i Simulink	25
5.1.1	Verifiering av backning rakt bakåt	25
5.1.2	Verifiering av backning efter cirkulär trajektoria	30

5.2	Verifiering av reglersystem i kombination med fysisk modell	33
6	Diskussion	37
6.1	Resultat	37
6.2	Reflektioner	38
6.2.1	Fortsatt arbete	38
6.2.2	Kommersiellt bruk	40
7	Slutsats	41
A	Appendix	43
A.1	Ritningar	43

1 Inledning

Det här kapitlet behandlar bakgrunden till varför projektet genomförs och kontextualiserar problemet.

1.1 Bakgrund

Ur miljösynpunkt är det fördelaktigt att köra färre lastbilar, eftersom det leder till mindre utsläpp. Av den anledning har diskussioner börjat föras om att tillåta längre fordonskombinationer. I Sverige är för närvarande den längsta fordonskombinationen så kallad nordisk kombination. Den ser ut som figur 1 med layouten en lastbil plus en semitrailer, vilken får vara 25,25 meter lång och väga maximalt 60 ton [7].



Figur 1: Nordisk Kombination

Det nya förslaget på tillåten maximal lastbils kombination är en så kallad “Double Road Train”, hädanefter DRT, med layouten: dragbil, semitrailer, dolly, semitrailer se figur 2. Ekipaget i DRT-utförande ekipaget har en totallängd på 32 meter och totalvikt upp till 90 ton [2]. Eftersom DRT-kombinationen kan transportera mer än den nordiska kombinationen blir utsläppen enligt fältprover som gjorts ungefär 20-30 procent mindre. Detta eftersom det i många fall räcker med en lastbil istället för två.



Figur 2: Double Road Train

Flera transport- och logistikföretag ser även en ekonomisk vinst som ett incitament för att införa längre fordonskombinationer då de behöver färre förare. Det här skulle medföra reducerade lönekostnader vilket skulle gynna företagen.

Vid längre fordonskombinationer uppstår det dock problem med manövrering då ett längre ekipage är otympligare och det är svårare att förutspå hur det kommer röra sig. Speciellt tydligt är det vid backning då en lastbil med flera släp är ett system med flera ledade punkter vilket kommer vara svårt att manövrera bakåt säkert och precis. Om chauffören inte har full kontroll på sitt ekipage kan skador på lastbil, last och personer i omgivningen uppstå.

1.2 Syfte

I den här rapporten beskrivs utvecklingen av ett modulärt system för att underlätta vid backning med långa fordonskombinationer. Systemet utvecklas för att möta de krav som är beskrivna i avsnitt 1.3.1. Att systemet är modulärt innebär att det är designat för att det enkelt ska gå att modifiera för flera olika fordonskombinationer utan att reglersystemet behöver förändras.

1.3 Problembeskrivning

Problemet med långa fordonskombinationer är att det är svårt att manövrera då det tar upp mycket plats och det är inte uppenbart hur fordonet kommer att röra sig. I sin tur kan det leda till att skador på fordon och omgivning kan uppstå. I projektet kommer ett system att skapas för att underlätta vid backning med långa fordonskombinationer för att göra det mer säkert.

1.3.1 Krav

För att ha möjlighet att verifiera projektet har ett antal krav definierats som kommer fungera som olika test under verifieringsfasen. Det finns även krav på utformningen av den fysiska modellen.

- Systemet ska vara modulärt i den bemärkelsen att det ska vara konstruerat så att det går att applicera flera olika fordonskombinationer, nuvarande och framtida. Tester i projektet kommer att göras på två släp men systemet ska alltså fungera för fler än så.
- Systemet ska klara av att se till att ekipaget kan backa rakt bakåt och korrigera vid störningar så som ojämnheter i vägplan utan att avvika mer än en halv lastbilsbredd åt sidan.

- Systemet ska klara av att backa runt ett hörn utan att lastbilen rör sig mer än en halv lastbilsbredd från den ideala rутten.
- Systemet ska klara av att backa efter en förutbestämd bana utan att avvika mer än en lastbilsbredd åt sidan från den förutbestämda banan.

Kraven nedan är specifika för den fysiska modellen.

- Den fysiska modellen ska klara av att styras från en kontroll där hastighet och styrning kan regleras.
- Den fysiska modellen ska kunna backa i 0.2 m/s.
- På den fysiska modellen ska det finnas möjlighet att fästa de sensorer som behövs för att det skall gå att reglera systemet.

1.3.2 Delproblem

Problemet delas upp i flera mindre delproblem för att det ska vara lättare att ha översikt över vad som behöver göras.

1. Matematiskt modellbygge: Matematisk modell över hur lastbilen och släpen kommer att röra sig. Implementera den beräknade matematiska modellen i MATLAB/-Simulink
2. Reglerdesign
3. Fysiskt modellbygge: Bygga fysisk modell av en fordonskombination bestående av en dragbil, dolly och två semitrailers.
4. Verifiering: Implementera det reglersystem som skapades i Matlab/Simulink på den byggda modellen och utföra tester.

1.4 Avgränsningar

I det modulära system som utvecklas ska ingen hänsyn behöva tas till hur många släp som är kopplade till lastbilen. Projektet begränsas till DRT-kombinationen dels av praktiska skäl, det är ett rimligt antal släp att utföra tester på, dels är det den kombination som utreds för svenska förhållanden.

Projektet kommer att utföras under en specificerad tid där det inte kommer att finnas möjlighet att gå utanför de angivna tidsramarna, 20/1-2015 till den 26/5-2015. Inom projektet har gruppen 5000 kronor att använda för att skapa den fysiska modell som behövs för att kunna verifiera de krav som är beskrivna i 1.3.1.

Den produkt vi utvecklar med hårdvara och mjukvara kommer inte vara testad för att applicera direkt på ett riktigt ekipage utan kommer vara skräddarsytt för den lastbil

som kommer att byggas inom projektet. Dock är det inte osannolikt att den metod som har används och de formler som tagits fram kan omsättas för kommersiella syften.

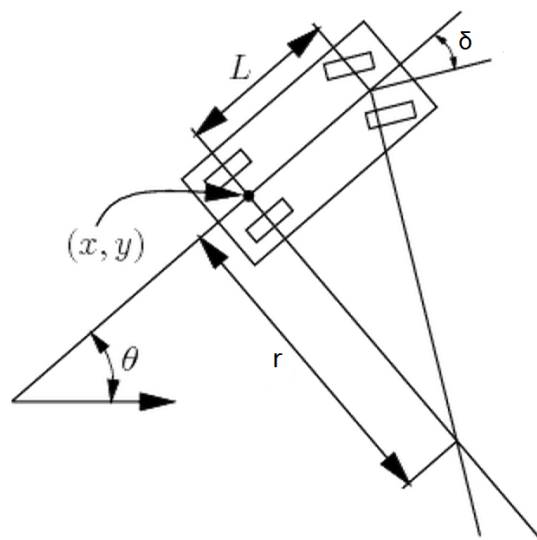
2 Matematisk modellbygge

Detta kapitel beskriver arbetet med att göra det matematiska modellbygge som ligger till grund för reglersystemet. Först presenteras den teori som har använts i projektet för att ställa upp det kinematiska systemet. Vidare presenteras hur teorin har använts för att skapa det kinematiska systemet. Därefter ställs systemet upp på tillståndsform för att underlätta reglering.

2.1 Kinematik dragbil

För att kunna beskriva hur en lastbil med släp rör sig måste man först visa hur lastbilen rör sig med hjälp av trigonometri och använda sig av redan uträknade förhållanden för att visa hur släpen i sin tur förhåller sig till dragbilen.

Enligt Stephen Lavalle [3] rör sig en bil i samma riktning som framhjulen har och oftast följer bakhjulen efter i ungefär samma spår. Enligt Lavalle [3] beror detta på att bakhjulen inte har någon möjlighet att ändra riktning då de saknar styrning. Istället följer de den riktningen som resten av bilen tagit. Med dessa antaganden i baktanke går det enligt Lavalle [3] att ställa upp matematiska formler för hur positionen i x-,y-led på bilen kommer att flytta sig i XY-planet vid en förändring av infallsvinkeln δ .



Figur 3: Trigonometrisk modell backande bil [3]

I figur 3 är δ infallsvinkeln, θ vinkeln mellan bilens y -axeln och XY -planet, x, y är positionen på mitten av bakaxeln och L är bilens hjulbas. Bilens hastighet är inte utmärkt men kommer att benämnas v härnäst. När lastbilen svänger kommer den att röra sig i en cirkulär rörelse där radien på cirkeln benämns r .

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f_1(x, y, \theta, v, \delta) \\ \dot{y} &= f_2(x, y, \theta, v, \delta) \\ \dot{\theta} &= f_3(x, y, \theta, v, \delta)\end{aligned}\quad (2.1)$$

Lavalle [3] menar att under ett väldigt kort ögonblick, $\delta(t)$, kan man approximera bilen att röra sig i samma riktning som bakhjulen. Det här ger att när t går mot noll:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dy} &= \tan(\theta) \\ \frac{dx}{dy} &= \frac{\dot{x}}{\dot{y}} \\ \tan(\theta) &= \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)}\end{aligned}\quad (2.2)$$

$$-\dot{x} \sin(\theta) + \dot{y} \cos(\theta) = 0 \quad (2.3)$$

För att (2.3) skall vara uppfyllt måste:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \cos(\theta) \\ \dot{y} &= \sin(\theta)\end{aligned}\quad (2.4)$$

Vilket ger uttryck för förändringen i x - och y -led.

För att erhålla ett förhållande mellan infallsvinkeln och vinkeln som lastbilen rör sig görs enligt Lavalle [3] följande antagande.

$$\begin{aligned} d\omega &= r d\theta \\ r &= \frac{L}{\tan(\delta)} \\ d\theta &= \frac{\tan(\delta)}{L} d\omega \end{aligned} \quad (2.5)$$

Genom att sedan dividera med dt på båda sidor för att få förändringen över tid samt använda sig av $\dot{\omega} = v$ erhålls ett uttryck över vinkeln:

$$\dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan(\delta) \quad (2.6)$$

Ur (2.4) och (2.6) erhåller Lavalle [3] positionsförändringen där förändringsvektorn \mathbf{u} delas upp i två komponenter, hastighet \mathbf{u}_v och vinkel \mathbf{u}_δ :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{u}_v \cos(\theta) \\ \dot{y} &= \mathbf{u}_v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \frac{\mathbf{u}_v}{L} \tan(\mathbf{u}_\delta) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Där positionen på mittpunkten på bakaxeln är beroende på bilens hastighet \mathbf{u}_v och förhållandet mellan bilens y -axel och XY -planet.

2.2 Matematisk modell DRT-konfiguration

När kinematiken för dragbilen är definierad kan den kinematiska modellen för DRT-konfigurationen ställas upp. Varje del i DRT-konfigurationen behandlas som en modul där samma kinematik gäller för alla enheter utom dragbil och sista semitrailer då de är specialfall.

2.2.1 Kinematiskt modellbygge DRT-konfiguration

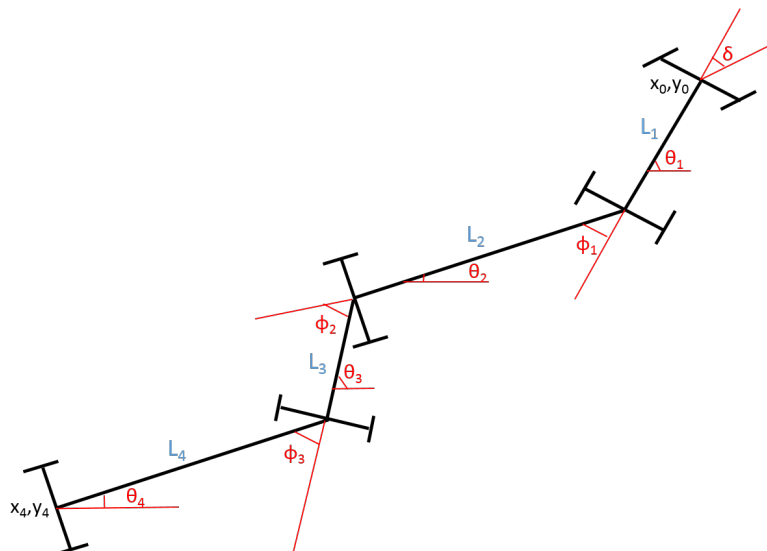
För att förenkla de matematiska formlerna görs följande antagande:

I DRT-konfigurationen sitter det flera axlar på ungefär samma ställe för att minska axeltrycket på varje individuell axel. Ett exempel på detta är på semitrailern, vilken har tre axlar tätt efter varandra, se figur 2. För att förenkla beräkningarna approximeras de fall med multipla axlar på ungefär samma ställe till att vara en enda axel enligt [1].

Då systemet är modulärt kommer de ekvationer som används för varje modul att vara likadana i systemet. Ekvationerna är oberoende av vilken sorts modul det är och tar ingen hänsyn till ifall modulen är en semitrailer eller dolly. Dock är de parametrar som används i ekvationerna annorlunda för de olika modulerna. Detta eftersom parametrarna är individuella för varje modul och är beroende av var de är positionerade i kombinationen.

2.2.2 Kinematiska ekvationer

En modell över det förenklade systemet kan ses i figur 4. Här har parametrarna som skall beskriva systemet satts på varje modul i DRT-konfigurationen.



Figur 4: Cykelmodell över systemet

Varje modul har fyra parametrar, Längd L_i , position på bakaxel x_i, y_i , vinkel till x-axeln θ_i och vinkel till framförvarande modul ϕ_i . Med dessa fyra parametrar går det att ställa upp en kinematisk modell för systemet. Alla fyra parametrar behövs inte till varje modul men till den sista modulen i systemet behövs alla fyra parametrar. Eftersom ett krav i 1.3.1 var att reglersystemet skall vara modulärt används samma ekvationer för varje modul. Därav erhålls mer information än vad som är nödvändigt för några av modulerna. De kinematiska ekvationerna för de moduler som inte är dragbil och sista modul skrivs enligt:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}_i &= v_i \frac{\tan \phi_{i-1}}{L_i} \\
 \dot{\phi}_i &= v_i \left(\frac{\tan \phi_{i-1}}{L_i} - \frac{\sin \phi_i}{L_{i+1}} \right) \\
 \dot{x}_i &= v_i \cos \theta_i \\
 \dot{y}_i &= v_i \sin \theta_i \\
 v_i &= v_{i-1} \cos \phi_{i-1}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Då dragbilen särskiljer sig från resten av modulerna används ekvationer som skiljer sig till viss del från de övriga. Eftersom dragbilen inte har någon framförvarande modul används istället infallsvinkeln på framhjulen δ . En annan parameter som skiljer sig mellan dragbilen och de andra modulerna är hastigheten v_1 som på dragbilen är en konstant.

Detta innebär att dragbilen kommer köras med en kontinuerlig hastighet. De kinematiska ekvationerna för dragbilen blir då:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}_1 &= v_1 \frac{\tan \delta}{L_1} \\
 \dot{\varphi}_1 &= v_1 \left(\frac{\tan \delta}{L_1} - \frac{\sin \varphi_1}{L_2} \right) \\
 \dot{x}_1 &= v_1 \cos \theta_1 \\
 \dot{y}_1 &= v_1 \sin \theta_1 \\
 v_1 &= v_1
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Där det går att se hur infallsvinkeln δ används som insignal och hur hastigheten v_1 sätts till att vara det förutbestämde värdet som är lika med sig självt, v_1 .

Även den sista modulen i systemet är parametermässigt ett specialfall då det inte finns någon bakomvarande modul, vilket för projektet innebär att φ_4 inte behöver beräknas då det i DRT-kombinationen 2 endast finns fyra ingående element. För sista semitrailern blir därför de kinematiska ekvationerna:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}_4 &= v_4 \frac{\tan \varphi_3}{L_4} \\
 \dot{x}_4 &= v_4 \cos \theta_4 \\
 \dot{y}_4 &= v_4 \sin \theta_4 \\
 v_4 &= v_3 \sin \varphi_3
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

2.3 Olinjär tillståndsmodell DRT-konfiguration

För att styra systemet behövs först en matematisk modell att utgå ifrån, som sedan skrivs på en form som går att reglera. Här används en tillståndsmodell eftersom den kan modellera ett olinjärt system och kan skrivas med matrisnotation vilket fungerar bra tillsammans med MATLAB/Simulink [4].

Utifrån de kinematiska modellerna går det enkelt att ställa upp en olinjär sådan. Den olinjära tillståndsmodellen använder de parametrar från varje modul som är nödvändiga för att kunna skapa en regulator för systemet, dessa är (2.9),(2.10),(2.8). Eftersom modellen ska styra systemet på två olika sätt ställs systemet upp på två olika sätt, med olika tillstånd.

Det första alternativet använder fem tillstånd enligt:

$$\begin{aligned}
 \dot{y}_4 &= v_4 \sin \theta_4 \\
 \dot{\theta}_4 &= v_4 \frac{\tan \varphi_3}{L_4} \\
 \dot{\varphi}_3 &= v_3 \left(\frac{\tan \varphi_2}{L_3} - \frac{\sin \varphi_3}{L_4} \right) \\
 \dot{\varphi}_2 &= v_2 \left(\frac{\tan \varphi_1}{L_2} - \frac{\sin \varphi_2}{L_3} \right) \\
 \dot{\varphi}_1 &= v_1 \left(\frac{\tan \delta}{L_1} - \frac{\sin \varphi_1}{L_2} \right)
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

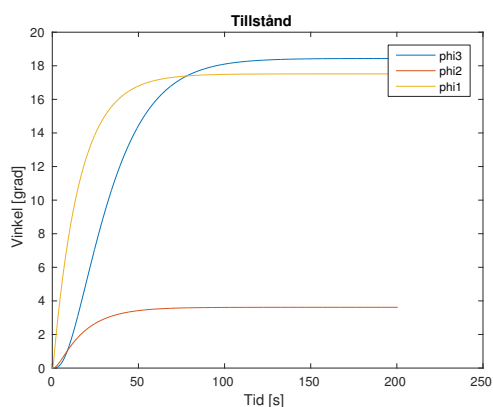
Där y_4 och θ_4 kommer från sista modulen medan $\varphi_{1,2,3}$ kommer från resterande moduler. Ett alternativ till detta är att endast återkoppla $\varphi_{1,2,3}$ så att systemet ser ut som följande

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}_3 &= v_3 \left(\frac{\tan \varphi_2}{L_3} - \frac{\sin \varphi_3}{L_4} \right) \\ \dot{\varphi}_2 &= v_2 \left(\frac{\tan \varphi_1}{L_2} - \frac{\sin \varphi_2}{L_3} \right) \\ \dot{\varphi}_1 &= v_1 \left(\frac{\tan \delta}{L_1} - \frac{\sin \varphi_1}{L_2} \right)\end{aligned}\quad (2.12)$$

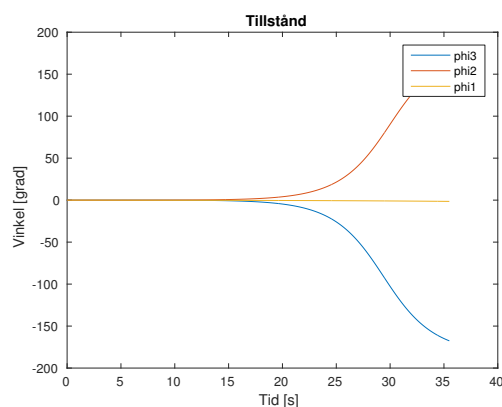
Då blir det ett enklare system att modellera och reglera.

2.4 Analys av det olinjära systemet

Vid en analys av det olinjära systemet verifieras antagandet att systemet är stabilt vid körning framåt och instabilt vid backning. Detta är helt i linje med de intuitiva tankarna runt manövrering framåt och bakåt. En simulering med de tre tillstånden $\varphi_{1,2,3}$ görs med både backning och körning framåt för att verifiera den matematiska modellen. Det syns tydligt i figur 5 att om systemet körs framåt så följer alla moduler med och systemet stabiliserar sig utmed några jämviktpunkter som beror på styrsignalen. Om systemet istället körs bakåt är det instabilt vilket bekräftas i figur 6 där $\varphi_{2,3}$ snabbt skenar iväg.



Figur 5: Framåt med 0.1rad styrsignal



Figur 6: Bakåt med 0.1rad styrsignal

3 Reglerdesign

För att backa systemet krävs en regulator, här används en tillståndsåterkoppling som beräknas med LQR. Systemmatriserna ställs upp för systemet och återkopplingen används för att styra systemet efter en fördefinierad trajektoria.

3.1 LQR

LQR betyder Linear-Quadratic Regulator och är en regulator som bygger på teori som är till för att optimera styrningen av ett dynamiskt system samtidigt som det försöker minska förlusterna. För att kunna använda sig av teorin bakom LQR behöver differentialekvationerna linjäriseras vilket beskrivs i avsnitt 3.2.

LQR är en iterativ process som går ut på att lösa *Riccati*-ekvationen $P(t)$ för att dimensionera återkopplingsvektorn K enligt

$$K = -R^{-1}B^T P(t) \quad (3.1)$$

Där R är en parameter i LQR och B är systemmatrisen[5]. LQR använder två parametrar Q, R för att beräkna K . Detta kan göras med *MATLAB*.

Om ett system är givet enligt $\dot{x} = f(x, u)$ så dimensioneras återkopplingsvektorn enligt

$$u = -Kx \quad (3.2)$$

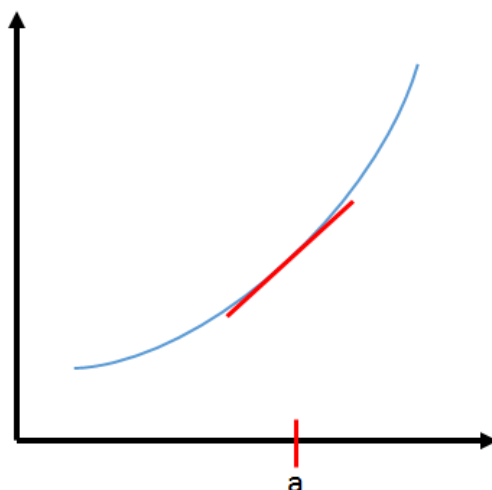
vilket ger den nya insignalen till systemet. Detta driver tillstånden mot noll, vilket inte alltid begärs så därför kan systemet anpassas efter en trajektoria med begärda tillstånd (x_d, u_d) . Det ger en ny återkoppling enligt

$$u = -K(x - x_d) + u_d \quad (3.3)$$

vilket används för att styra tillstånden mot de begärda referenserna. När återkopplingsvektorn är beräknad upprepas beräkningarna med anpassade Q, R faktorer vilket ger en ny återkopplingsvektor. Detta upprepas till en tillräckligt god prestanda har uppnåtts.

3.2 Linjärisering

Då en linjär approximation av systemet ska användas måste systemet först linjäriseras vilket innebär att lutningen på en kurva i en specifik punkt går att approximera med en rak linje. I figur 7 nedan går det att se hur en tangent anläggs vinkelrätt mot normalvektorn i en punkt. Det här ger en lutning på tangenten som är samma som den på kurvan i just den punkten.



Figur 7: Linjärisering

Detta ger att värdet på funktionen i punkten kan beräknas mycket enklare enligt definitionen av linjärisering.

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) \quad (3.4)$$

är a är avståndet från origo till den undersökta punkten i x-led. Det ekvation 3.4 ger oss är en funktion för lutningen i den specifika punkten a som är enklare att använda då det är funktionen för tangenten och inte kurvan.

Linjäriseringen görs för hand med Taylorapproximation kring jämviktpunkterna där alla vinklar är noll och avvikelsen i y-led är noll. Jämviktpunkterna väljs med avseende på att systemet används för att backa rakt bakåt i x-axelns riktning, vilket medför att tillstånd x_4 inte är ett tillstånd vi vill reglera, därför tas det bort från beräkningar härfter.

Efter att modellen är linjäriserad används en småvinkelapproximation enligt ?? för att få fram systemmatriserna A och B . Då återstår C och D som ger utsignalerna från systemet. Eftersom en full tillståndsåterkoppling kommer att användas väljs varje tillstånd

som utsignal för att kunna användas för att styra systemet senare, här görs C till en enhetsmatris och D till en nollvektor.

$$\begin{aligned}\Delta\dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u\end{aligned}\quad (3.5)$$

Där Δx och Δu är

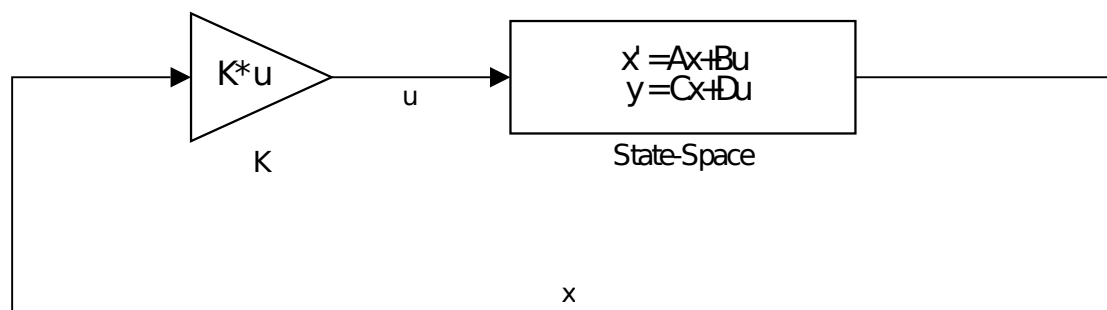
$$\begin{aligned}\Delta x &= \varphi_i - \varphi_r \\ \Delta u &= \delta - \delta_r\end{aligned}\quad (3.6)$$

3.3 Reglersystem för backning rakt bakåt

För backning rakt bakåt finns två alternativ. Att använda alla tillstånd beräknade i (2.11) eller att endast använda vinklarna mellan modulerna (φ) beräknade i 2.12. Båda alternativen används här. En linjär tillståndsåterkoppling används för reglering.

3.3.1 Tillståndsåterkoppling

För att styra tillstånden används en tillståndsåterkoppling. För att använda en tillstånd-återkoppling måste alla tillstånd som ska styras komma in i regulatorn. Det här kan skapa problem om man inte kan mäta alla tillstånd, men här antas att alla tillstånd är mätbara. Då återkopplas systemet enligt figur 8.



Figur 8: Tillståndsåterkoppling för att styra tillstånden till 0

Den här återkopplingen ger som följd att alla tillstånd drivs mot referensen $\varphi_r = 0$ eftersom det inte är angivet någon annan referens. Det här är perfekt när systemet används för backning rakt bak.

Återkopplingsvektorn K dimensioneras med hjälp av LQR-metoden som beskrivs i 3.1.

3.3.2 Vinklar mellan moduler

Först används metoden att endast mäta vinklarna mellan modulerna för att reglera systemet. Därmed blir systemet enklare med endast tre tillstånd att återkoppla. Att endast använda vinklarna mellan modulerna (φ_i) ger fördelen att det blir ett enklare system att reglera och även att praktiskt bygga systemet med sensorer. Nackdelen är att endast ett lokalt koordinatsystem används och därmed finns ingen global referens att följa. Med det här alternativet erhålls systemmatriserna A, B enligt följande:

$$A = -1 \begin{bmatrix} \frac{-1}{L_4} & \frac{1}{L_3} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{L_3} & \frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} \end{bmatrix}, B = -1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_1} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Systemmatriserna beskriver det linjäriserade systemet och har polerna

$$\text{poles} = \begin{bmatrix} 0.0667 \\ 0.3333 \\ 0.0667 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

där alla polerna ligger i höger halvplan vilket verifierar det som togs fram i 2.4, nämligen att systemet är instabilt. Då behöver vi en regulator för att stabilisera systemet och därmed kunna styra det. Det här genom att flytta polerna till vänster halvplan.

Systemmatriserna i (3.7) används för att beräkna återkopplingsvektorn K enligt 3.3.1 och ger då

$$K = [-3.9393 \quad 38.1116 \quad -5.4830] \quad (3.9)$$

Det här flyttar polerna och ger nya polerna till det återkopplade systemet

$$\text{feedbackPoles} = \begin{bmatrix} -0.3335 \\ -0.1974 \\ -0.0990 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

där nu alla poler är förflyttade till vänster halvplan och systemet stabilt.

3.3.3 Alla tillstånd

Ett alternativ till att endast använda φ_i är att använda alla tillstånd i (2.11). När denna typ av återkoppling används finns förutom φ_i också θ_4 och y_4 . Det ger fördelen att systemet vet vart det befinner sig och kan rätta sig efter det. Det här genom att mäta riktning och avvikelse från referensen som i detta fall är rakt bak.

När detta system beräknas erhålls systemmatriserna:

$$A = -1 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/L4 & 1/L3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/L3 & 1/L2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/L2 \end{bmatrix}, B = -1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/L1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

och tillhörande poler blir då:

$$\text{poles} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0667 \\ 0.3333 \\ 0.0667 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Därefter beräknas återkopplingsvektorn K till följande värde:

$$K = [-1.0000 \quad 19.0185 \quad -17.3835 \quad 58.4552 \quad -6.6643] \quad (3.13)$$

När K tillämpas på systemet fås de nya återkopplade polerna:

$$\text{feedbackPoles} = \begin{bmatrix} -0.3347 + 0.0000i \\ -0.1959 + 0.0502i \\ -0.1959 - 0.0502i \\ -0.0698 + 0.1295i \\ -0.0698 - 0.1295i \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

vilka alla ligger i vänster halvplan. Detta tyder på att systemet är stabilt efter återkoppling

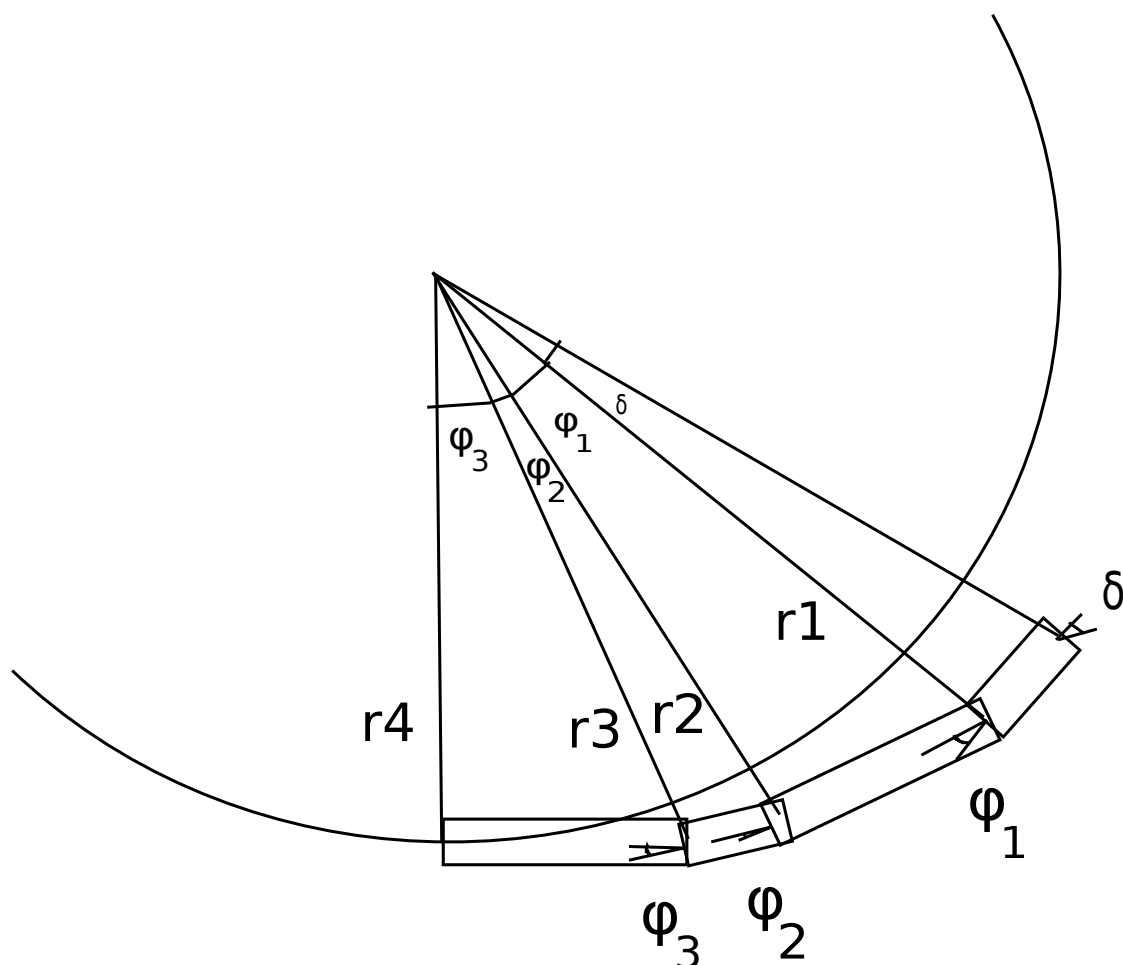
3.4 Reglersystem för backning efter cirkulär trajektor

För att styra systemet runt ett hörn behövs en annan lösning än vad som användes för backning rakt bak. Här används en trigonometrisk metod som gör att systemet går att backa efter en cirkulär trajektor.

3.4.1 Cirkulär trajektor

För att backa systemet runt ett hörn används en metod som går ut på att backa runt en cirkulär bana. Det här görs genom att styra systemet efter beräknade jämviktspunkter.

Punkterna beräknas med trigonometri och det är endast tillstånden med vinklarna mellan varje modul (φ_i) som används i det här fallet. I figur 9 ses en trigonometrisk modell över hur vinklarna beror av varandra.



Figur 9: jämviktspunkter utmed en cirkel

Metoden går ut på att beräkna vinkeln φ_i för varje modul så att den följer en cirkulär bana. Punkten längst bak kommer att ha minst radie (r_4) på cirkeln som den följer, därefter ökar det för varje modul, där dragbilen har störst radie (r_1). Dessa beräknas enligt:

$$\begin{aligned}
 r_1 &= \frac{L_1}{\tan \delta_e} \\
 r_2 &= \sqrt{r_1^2 - L_1^2} \\
 r_3 &= \sqrt{r_2^2 - L_2^2} \\
 r_4 &= \sqrt{r_3^2 - L_3^2}
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

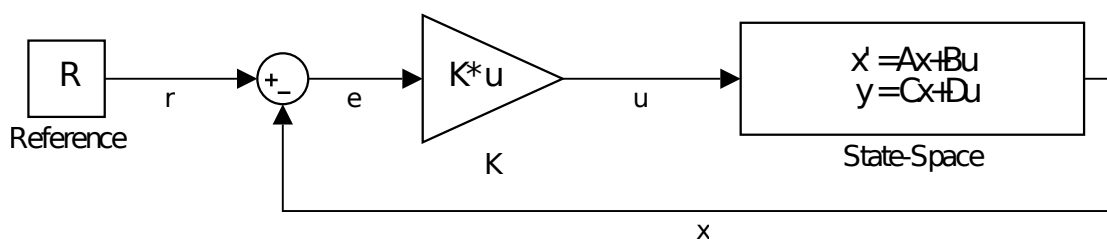
där r_i är den radie som modulen kommer att backa efter och δ_r är en vald styrvinkel som ger dessa radier. Med dessa beräknas sedan de jämviktstillstånd som systemet skall ha som referens. Det ger följande ekvationer:

$$\begin{aligned}\varphi_{1e} &= \arctan \frac{L_2}{r_2} \\ \varphi_{2e} &= \arctan \frac{L_3}{r_3} \\ \varphi_{3e} &= \arctan \frac{L_4}{r_4}\end{aligned}\quad (3.16)$$

där φ_{ir} är jämviktspunkten som används som referens till systemet. Dessa är tänkta att beräknas inför varje fall.

3.4.2 Reglersystem

När jämviktspunkterna är beräknade används en linjärisering kring de här punkterna med hjälp av samma småvinkelapproximation som beskrivs i ?? för att linjärisera systemet. När systemet sedan är uppställt används en full tillståndåterkoppling med referens för att styra systemet mot de beräknade jämviktspunkterna. Det här systemet syns i figur 10.



Figur 10: Full tillståndåterkoppling med referens

Samma systemmatriser som för backning rakt bakåt används (3.7). Men istället används en annan referens som följer

$$\dot{x} = A(x - x_r) + B(u - u_r) \quad (3.17)$$

Tillsammans med referenserna (3.16) ger detta ett återkopplat system som följer en cirkulär trajektoria.

4 Fysisk modell

I det här kapitlet beskrivs uppbyggnaden av den fysiska modell som har tillverkats under projektet. Vidare redovisas för hur den skall användas i projektet och vilka material som har använts för att tillverka modellen..

4.1 Användning

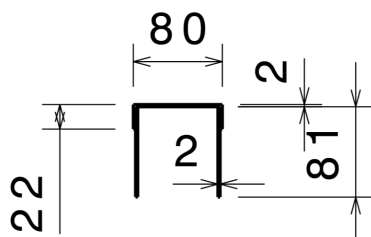
Under projektet har en fysisk modell av en DRT-kombination tillverkats för att verifiera att det utvecklade reglersystem uppfyller de krav som är listade i 1.3.1. Den fysiska modellen skall fungera som en riktig lastbil, dock mycket förenklad. Därför kommer den fysiska modellen endast att klara av att köra framåt och bakåt samt ska det vara möjligt att fjärrstyra den för att kontrollera att styrningen fungerar korrekt. På den fysiska modellen ska det sedan gå att applicera det reglersystem som har utvecklats under projektet 3.

4.2 Uppbyggnad

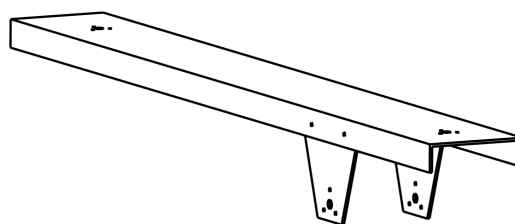
Den fysiska modellen kommer precis som DRT-konfiguration vara uppbyggd av en dragbil, semitrailer, dolly och semitrailer.

Av de radiostyrda lastbilar som går att köpa från modellbilstillverkare är de flesta i skala 1/14. För att göra det möjligt att montera delar, köpta från internet, byggs den fysiska modellen lastbilen i samma storlek. Efter att ha sett hur stor lastbilen blev, lite mer än 2 meter, valde gruppen att minska längden på båda släpen med ungefär 200mm för att göra modellen mer hanterbar.

Chassit till de olika fordonsdelar är gjorda i en U-profil där plåtarna har bockats. Ryggen på U:et, som är ovansidan på chassit, är 80mm och de nedbockade sidorna, som representerar var sin sida, är 20mm. Bild på profilen syns i 11.



Figur 11: U-profil på semitrailer



Figur 12: Isometrisk vy över semitrailer

För att kunna fästa däcken och axlarna fästs expanders på den korta nedböjda flänsen där axlarna ska vara placerade i x-led, se figur 12. Anledningen till att expandrarna behövs är att det inte gick att bocka en U-profil där alla tre sidor är lika långa på grund av begränsningar i bockningsverktyget. Istället bockas två kortare sidor och expandrar fästs där hjulen ska vara placerade. För att fästa expandrarna borras två hål i den nedböjda flänsen och på expandern. Sedan fästs expandern på insidan av flänsen med hjälp av två M3-skruvar och muttrar.

Den enskilt största utgiften under projektet var däcken. För att begränsa utgifterna användes så få däck som möjligt på den fysiska modellen. Av den anledningen finns det endast en hjulaxel på varje semitrailer istället för tre vilket är standard i verkligheten.

4.3 Material

Nedan redovisas vilka material som har använts för att bygga den fysiska modellen samt motiveringar till varför de materialen valts.

Chassi

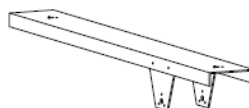
Chassit till de olika ekipagen består av aluminiumplåt med tjockleken 2mm. Aluminium är ett lätt material med en sträckgräns som är tillräckligt hög för att klara de påfrestningar som det kommer utsättas för under det här projektet. Dessutom utsätts inte aluminium för korrosion vilket gör att modellen går att spara efter att projektet är avslutat.

Tjockleken på materialet är lite överdimensionerat på grund av att gruppen inte visste precis vad som skulle sitta på ekipaget. Därför valdes en tjockare plåt som garanterade att ekipaget inte skulle gå sönder om det utsattes för de belastningar som uppskattades till största möjliga.

Bilder på dragbil semitrailer och dolly syns i figurerna 13, 15 och 14 nedan.



Figur 13: Ritning dragbil



Figur 14: Ritning trailer



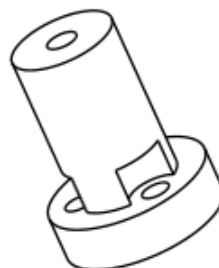
Figur 15: Ritning dolly

Hjul och däck

Hjulen och däcken på fordonet är från LEGO och av modell **Black Wheel 56x34mm Technic Racing Medium**, **Black Tire 81.6x36mm Technic Straight Tread**. Eftersom de är specialgjorda för LEGO passar de inte perfekt på en rund axel, på grund av det kryssformade hålet. Av den anledningen har ett specialgjort fäste konstruerats för att kunna fästa hjulen på axlarna. Hjulen från LEGO valdes eftersom de hjul som är specialgjorda för modellastbilar i skala 1/14 är mycket dyra utan att ge någon ytterligare funktionalitet än de som erhålls från lego hjulen. I figur 16 och 17 går det att se hur hjulet och fästet ser ut. De tre hålen i hjulfästet matchas mot de tre hål som finns på hjulet och skruvas ihop med hjälp av M3-skrivar.



Figur 16: LEGO Black Wheel



Figur 17: Fäste för hjulet

Motor och batteri

För att driva lastbilen används en småskalig DC-motor med växellåda och nominell spänning på 12V.

Ett 8V batteri till en radiostyrd bil används som strömkälla till alla komponenter på

lastbilen. Batteriet var aningen för klent för att driva motorn men funkade tillräckligt bra för att ge fordonskombinationen den hastighet som krävdes.

Arduino UNO

För att styra ekipaget användes en Arduino som är en liten dator baserad på öppen källkod. Den Arduinon som har använts under projektet är av modell UNO vilket är en dator i storlek som ett kreditkort och går att programmera för att skapa IN-UT signaler. Basen i en Arduino är en mikrocontroller som programmeras för att ta emot insignaler, tolka dem och skicka utsignaler. På Arduinon finns det 14 IN/UT portar vilket gör den ideal för att styra den fysiska modell som byggs under projektet och se till att styrningen och motorn jobbar ihop med de potentiometrar som sitter utsatta på den fysiska modellen.

Sensorer

För att kunna mäta vinkelförändringarna mellan de olika ekipagen i fordonskombinationen används potentiometrar som fungerar så att när den utsätts för ett en vridande rörelse förändras resistansen i potentiometern. Med vetskapen om hur resistansen förändras är det möjligt att beräkna vad vinkelförändringen blir. Förändringen av resistansen används som en insignal till Arduinon som tolkar förändringen och beräknar vinkelförändringen.

Potentiometern fästs på chassit genom att skruvas fast i chassit och sedan fäst axeln på potentiometern i släpets chassi med hjälp av ett sensorfäste som går att nypa ihop med en slangklämma. Fästet skrivs ut med hjälp av en 3D-skrivare, se avsnitt 3D-printade komponenter.

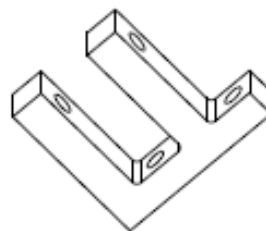
3D-printade komponenter

Följande komponenterna hade så komplicerad geometri att det var enklast att skapa dem genom att skriva ut dem med en 3D-skrivare. Ritningarna skapades i CATIA V5 och skrevs sedan ut med 3D-skrivare i Prototypplabbet på Chalmers Tekniska Högskola.

De komponenter som gjorts på det här viset var delarna till styrningen, bild 18 och 19

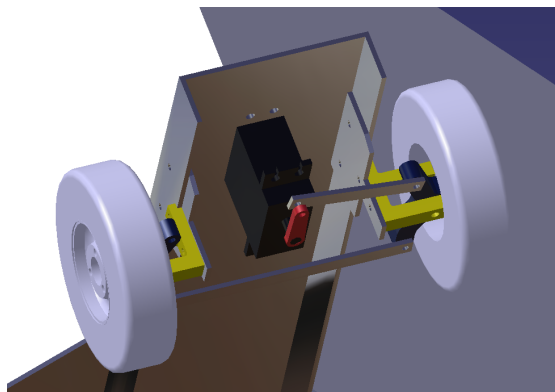


Figur 18: Styrled



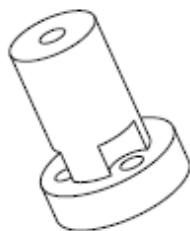
Figur 19: Styrledsfäste

I bilden nedan, figur 20 syns hur styrningen är ihopsatt på dragbilen. Styrledsfästet 19 är fastskruvat på aluminiumchassit och sedan skruvas styrleden 18 fast i styrledsfästet.

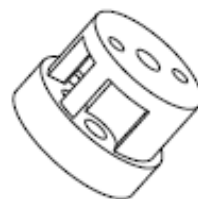


Figur 20: Styrning

För att fästa hjulen på hjulaxlarna skapades fästen där både hjulen och hjulaxeln kan skruvas fast. Eftersom vi valde att sätta ena hjulet direkt till motorn behövdes två olika fästen göras. Ett för de vanliga hjulen 21 och ett för det drivande hjulet 22.



Figur 21: Fäste för hjul på hjulaxeln



Figur 22: Fäste för drivande hjul

För att inte hjulaxlarna skulle rulla direkt mot plåten i chassit gjordes bustningar. Dessa fästes i chassit med tre stycken M3-skrivar och mutter. Bild på bustningen syns i figur 23.



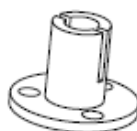
Figur 23: Drivbustning

En spacer för att få rätt avstånd i höjddled mellan dragbil - semitrailer och dolly - släp gjordes också 24.



Figur 24: Spacer mellan dragbil - semitrailer och dolly

Utöver dessa skapades även ett fäste för potentiometern på varje släp. Den här behövdes för att axeln på potentiometern skulle följa släpets rotation. Bild syns i figur 25



Figur 25: Potenslock

Ritningar på alla komponenter som tillverkats finns i Appendix A.1

När allting var ihopsatt blev den slutgiltiga produkten som i bild 26.



Figur 26: Slutgiltig Produkt

5 Verifiering

I detta kapitlet avhandlas verifiering av reglersystemet. Det här görs dels med hjälp av Simulink och dels med den fysiska modellen.

5.1 Verifiering av reglersystemet i Simulink

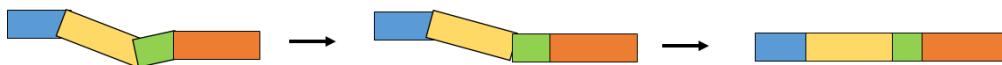
Simulering görs på två sätt. Dels för backning rakt bakåt med de tre φ -tillstånden enligt 3.3.2, men även med alla fem tillstånd i 3.3.3. En simulering görs även för backning i en cirkulär bana, vilket skall simulera backning runt ett hörn.

5.1.1 Verifiering av backning rakt bakåt

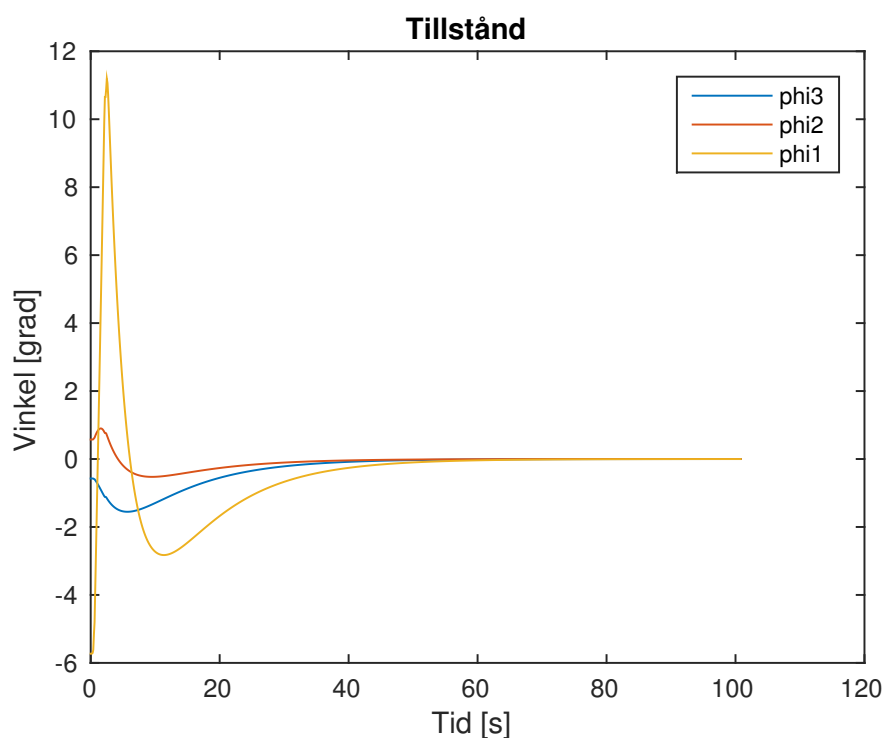
För att verifiera att återkopplingsvektorn (3.9) fungerar används *Simulink* för att simulera backningen. Systemet testas först för att se hur mycket störningar som systemet klarar av. Störningar skapas för att simulera mätfel på φ_i -tillstånden, detta genom ett *Band-Limited White Noise block*[6]. Vilket skapar normalfördelade slumpmässiga tal.

Vinkel mellan moduler

Test görs i simulink där lastbilen backar rakt bakåt utan störning vilket borde ge ett perfekt resultat där lastbilen inte avviker ifrån referens. Initialvärden är satta på varje tillstånd för att simulera att släpen inte står rakt från början. Detta med $\varphi_1 = -0.1\text{rad}$, $\varphi_2 = 0.01\text{rad}$, $\varphi_3 = 0.01\text{rad}$. I figur 28 syns resultatet från denna simulering. Den följer referensen utan någon avvikelse, det verifierar till en början att systemet är korrekt.

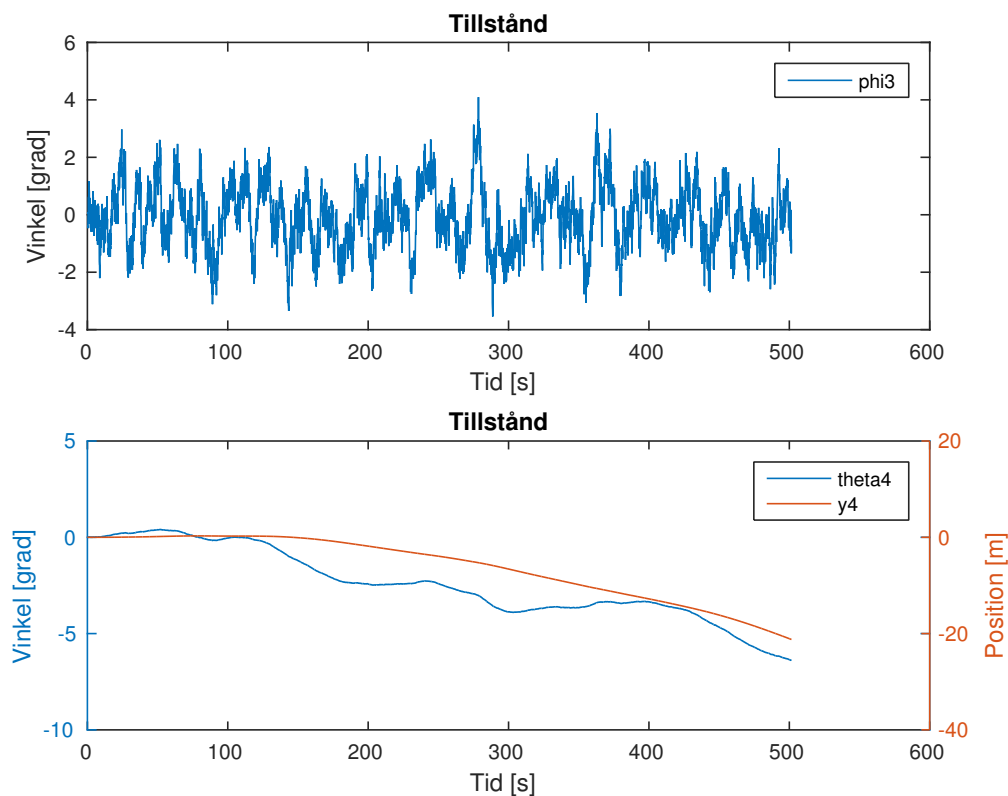


Figur 27: Schematisk bild för backning rakt bakåt



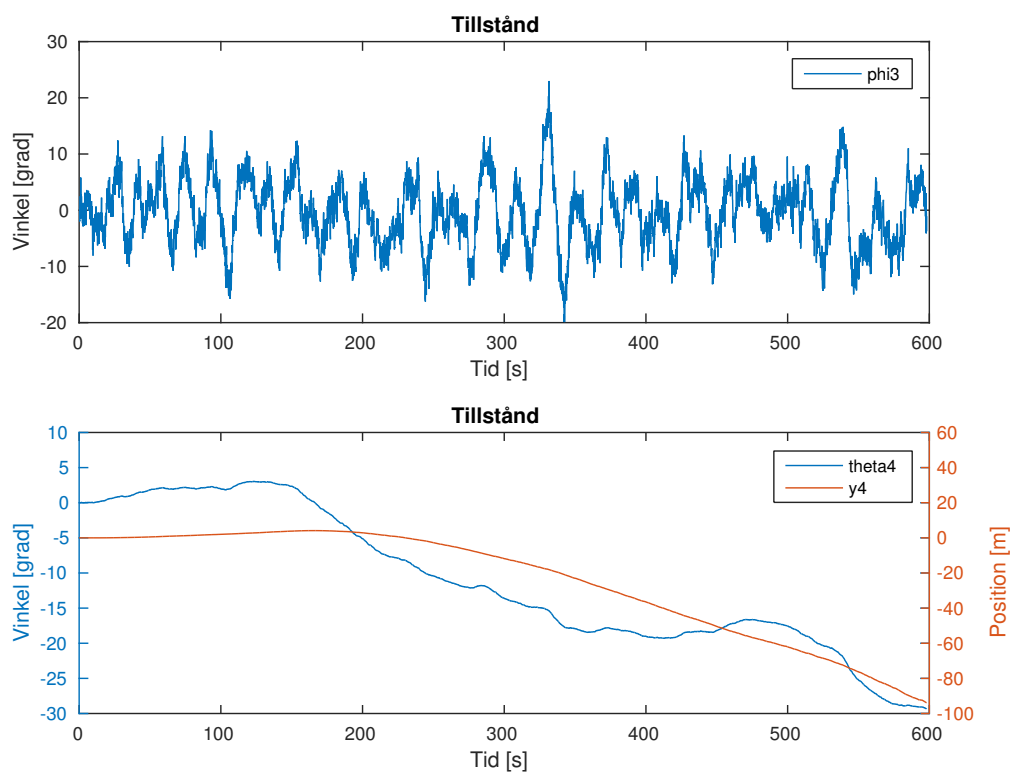
Figur 28: backning rakt bakåt utan störning

Vidare simuleras φ -tillstånden från 3.3.2. Det som testas är att backa rakt bakåt med en störning på 1 grad på varje tillstånd, detta är tänkt att simulera ett mätfel i en fysisk implementering. Simuleringen kan ses i figur 29, som visar φ_3 , y_4 och θ_4 . De andra tillstånden ($\varphi_{1,2}$) visas ej då de påverkar försumbart jämfört med φ_3 . Positionen på punkten längst bak visas genom y_4 och θ_4 och används för att se om systemet följer den givna referensen. I denna simulering når aldrig styrsignalen sitt maxvärde, vilket tyder på att regulatorn klarar den här störningen bra. Däremot syns nackdelen med att ej använda ett globalt koordinatsystem tydligt efter cirka 150s på y_4 -tillståndet där systemet byter riktning och fortsätter där tiden ut.



Figur 29: backning rakt bakåt med 1 grads mätfel

Därefter testas hur stora störningar systemet klarar av att korrigera för. Simuleringen sker på samma sätt, men störningen ökas i steg för att hitta nivån där regulatoren inte längre kan styra systemet tillräckligt och tillstånden divergerar. Det går att öka till 5° , men efter det klarar systemet i stort sett aldrig att styra rakt bakåt. I figur 30 styrs systemet med 5° störning och klarar att backa, men nästan direkt efter start ställer systemet om och börjar styra snett jämfört med startriktningen. Men tillståndet ϕ_3 varierar ungefär lika mycket hela tiden vilket gör att systemet tror det följer kursen bra. Styrställningen på framhjulen är saturerad nästan hela tiden, detta tyder på att systemet inte kan kontrollera tillstånden tillräckligt.

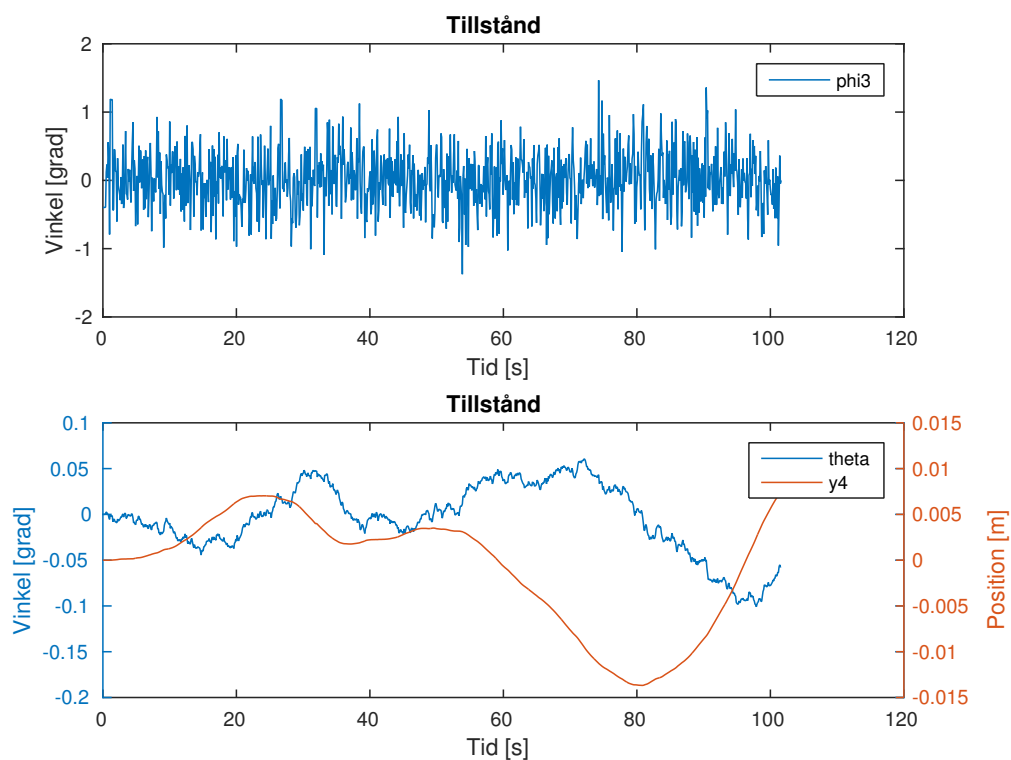


Figur 30: Backning rakt bakåt med 5 graders mätfel på tillstånden

Alla tillstånd

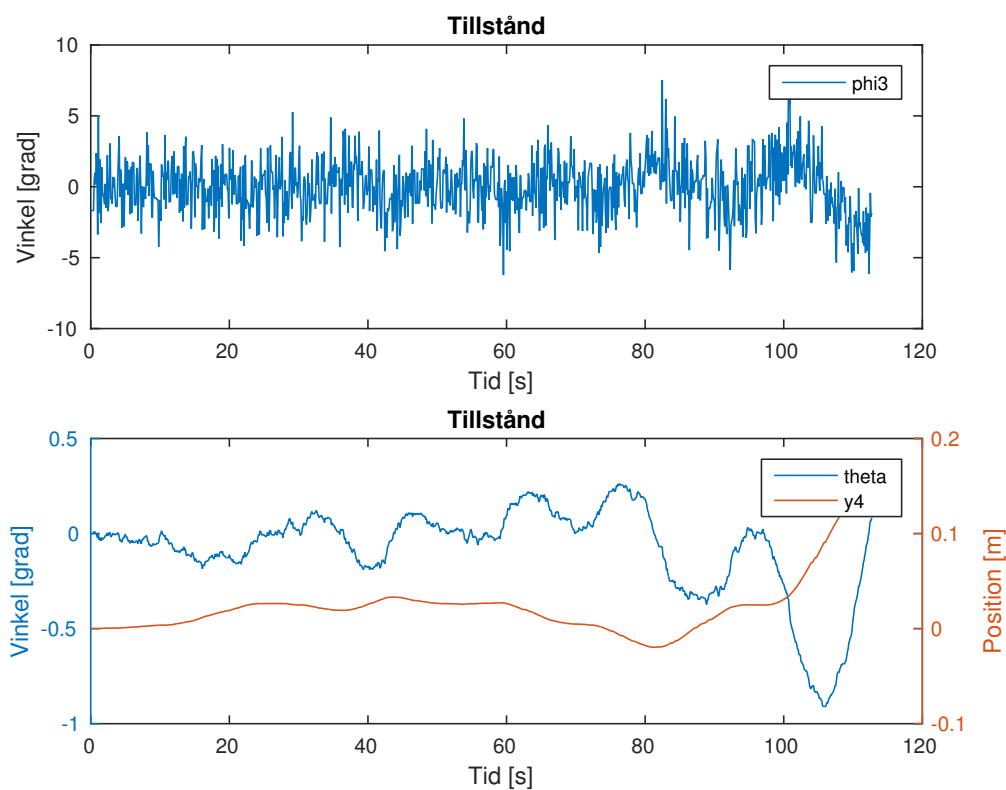
För att jämföra systemet med alla tillstånd med systemet med φ_i -tillstånden görs samma simuleringar med detta system.

Första simuleringen görs med en grads störning på φ -tillstånden. I figur 31 syns att med en grads mätfel så avviker y_4 med max 1.5cm. Vilket ligger inom gränserna som ställdes upp i 1.3.1. Här syns att det är stor skillnad på positionen y_4 jämfört med systemet med endast φ -tillstånd. När en global referens används, här θ och y_4 , så följer systemet referensen mycket bättre.



Figur 31: backning rakt bakåt med 1 grads mätfel

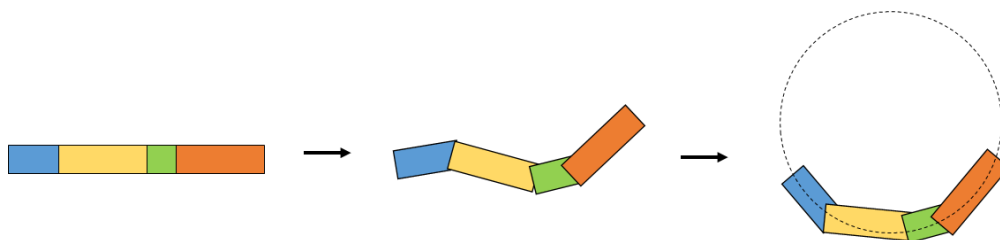
Därefter analyseras det största mätfel som systemet klarar av att korrigera. Det görs i steg tills den största störningen som systemet kan reglera nås. Detta syns i figur 32, här är det 5° som testas, detta klarar systemet bra, men om det blir högre så klarar systemet inte av att korrigera. Även här är styrställningen saturerad stora delar av tiden, vilket tyder på att systemet är på gränsen till att inte klara att korrigera för störningen.



Figur 32: backning rakt bakåt med 5 graders mätfel

5.1.2 Verifiering av backning efter cirkulär trajektoria

Simulering för att backa efter en cirkulär trajektoria görs för att simulera navigering runt exempelvis ett hörn. Resultaten jämförs med de uppställda krav från 1.3.1. Simuleringar görs samma typ av störning som i 5.1.1.

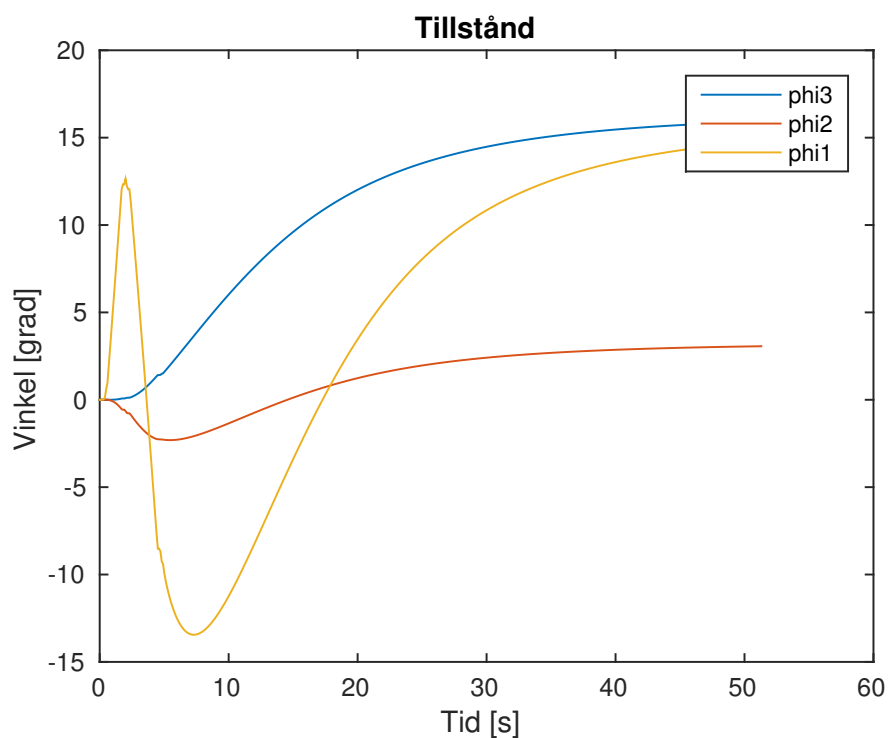


Figur 33: Schematisk bild för backning efter cirkulär trajektoria

Först körs en simulering utan störning på tillstånden och $\delta_e = 0.1\text{rad}$. Jämviktspunkter som används som referens beräknas enligt 3.4.1 och blir:

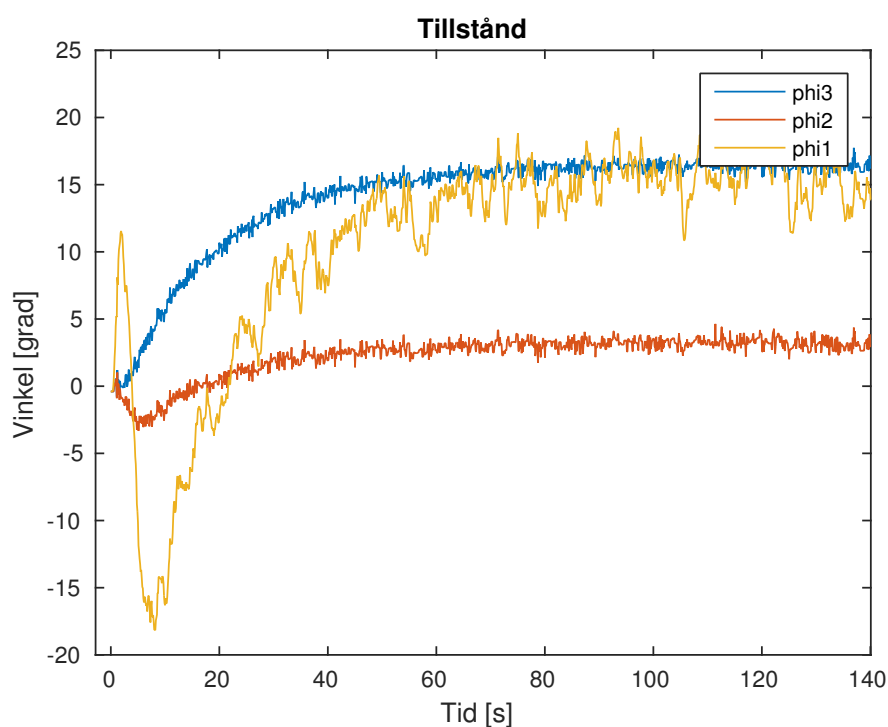
$$\begin{aligned}\varphi_{1e} &= 17.6430^\circ \\ \varphi_{2e} &= 3.6323^\circ \\ \varphi_{3e} &= 16.8322^\circ\end{aligned}\quad (5.1)$$

När dessa används på det olinjära systemet tillsammans med återkopplingsvektorn (3.9) ger det resultatet i figur 34. Här syns att tillstånden snabbt styr mot referenserna och stabiliseras där.



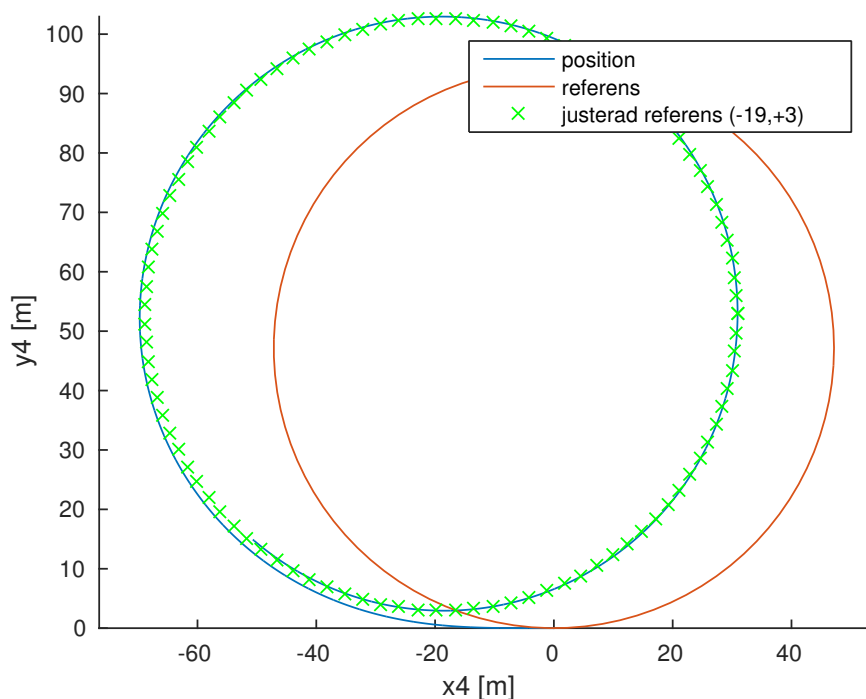
Figur 34: Sväng utan störning och 0.1rad nominell styrvinkel

Efter det görs en ny simulering med 1grads störning på tillstånden. Den syns i figur 35. Figuren visar att tillstånden går mot jämviktspunkterna (5.1), eftersom φ_3 påverkar positionen direkt och påverkas av de andra tillstånden är det den enda som bör följa sin trajektoria perfekt. $\varphi_{1,2}$ kommer därmed pendla något för att korrigera φ_3 .



Figur 35: Sväng med 1° störning och 0.1rad nominell styrvinkel

Från samma simulering analyseras även hur positionen följer referensen. I figur 36 visas x_4, y_4 och dess referens. Eftersom ingen global referens används kommer systemet försöka styra mot referensen och sedan hålla den. Därför uppstår en fördröjning innan systemet följer den cirkulära trajektorian. Det syns att en förskjutning av referensen med $(-19, +3)\text{m}$ ger en väldigt bra passning till den faktiska rutten. Positionen uppskattas avvika maximalt 1.3m från den anpassade referenslinjen efter insvängningen. Men det är ett konstant fel på nästan 1m . Detta ligger inom gränsen för kravet i 1.3.1.



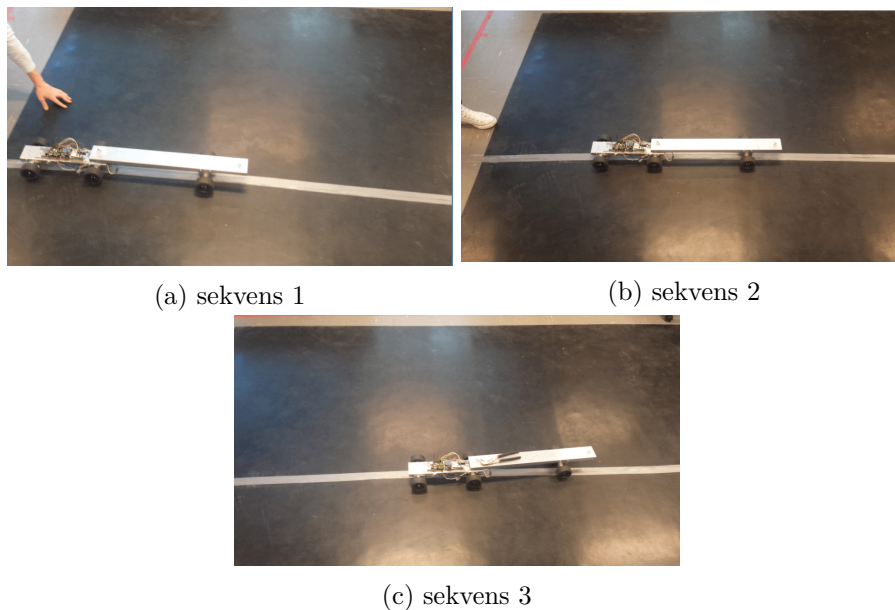
Figur 36: Sväng med 1° störning och 0.1rad nominell styrvinkel

5.2 Verifiering av reglersystem i kombination med fysisk modell

Verifiering med den fysiska modellen gjordes i steg. Detta eftersom en modulär design av både modellen, reglersystemet och mjukvaran gjordes.

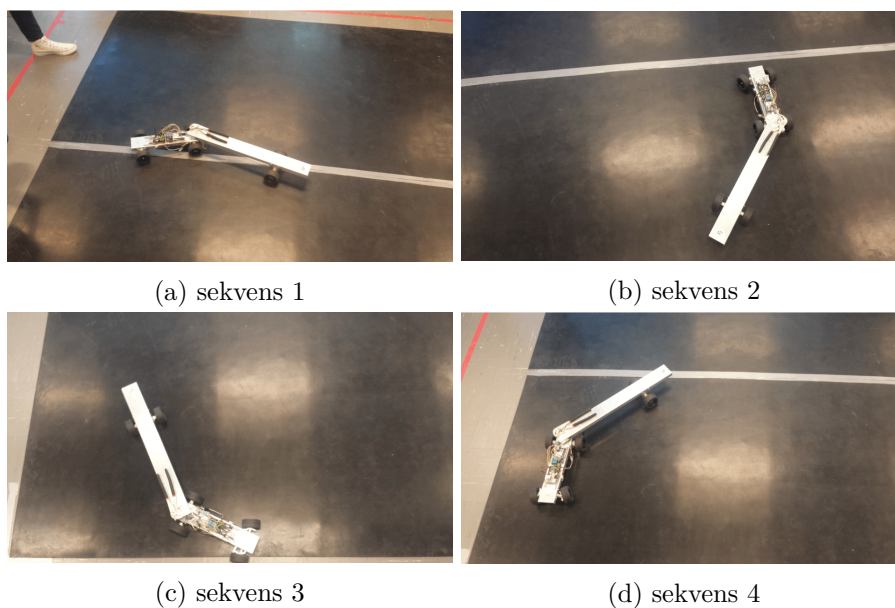
Ett släp

Systemet med ett släp testas att backa rakt bak. En anmärkning är som tidigare, att referensen är vinkeln till sista modulen, vilket gör att den avviker från det globala koordinatsystemet. Den backar dock fortfarande rakt, men inte jämfört med starten. Bildsekvens av verifieringen kan ses i figur 37



Figur 37: Backning rakt bakåt med en semitrailer

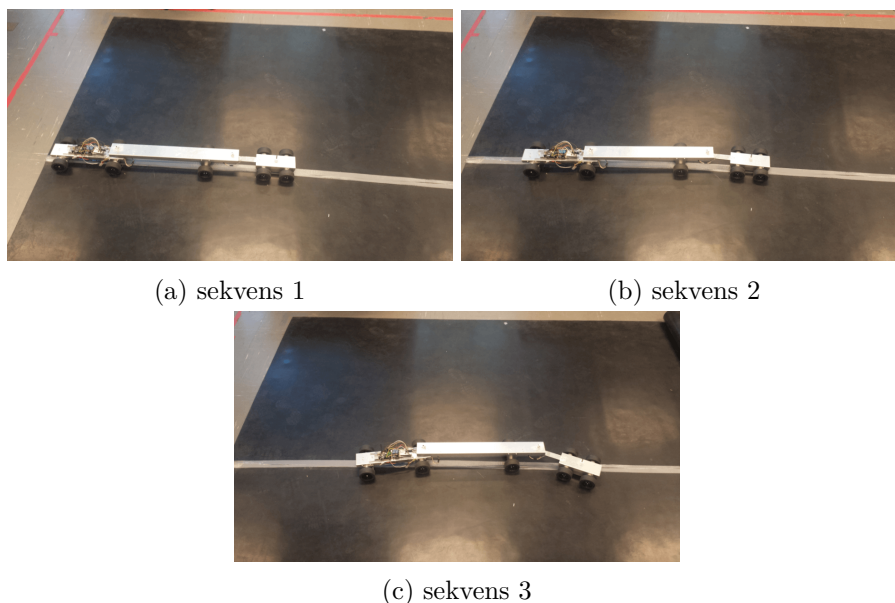
Verifiering av cirkulär backning görs med samma system. Vilket fungerar utan anmärkning. Verifieringen kan ses i figur 38.



Figur 38: Backning efter cirkulär trajektoria med en semitrailer

Släp och dolly

Test görs på ett system med ett släp och en dolly. Här fungerar inte systemet tillräckligt bra, dollyn avviker från den önskade trajektorian men dragbilen korrigerar inte detta. Det tros bero på en blandning av att potentiometern inte är tillräckligt noggrann i samverkan med att systemet är förenklat så att det inte finns något överhäng. Det vill säga att dollyn sitter direkt på bakaxeln på det första släpet, den gör inte det på den fysiska modellen och där kan det vara en för stor skillnad som skapar ett fel hos regulatören. Bildsekvens av testet kan ses i figur 39.



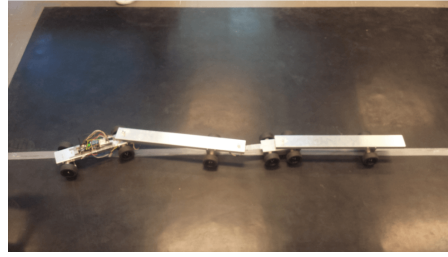
Figur 39: Backning rakt bakåt med semitrailer och dolly

DRT-konfiguration

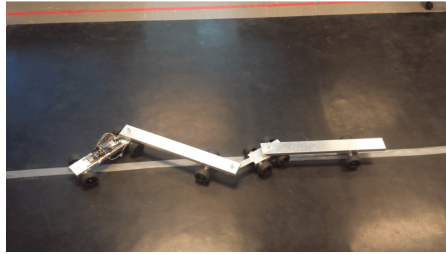
När tester med hela DRT-konfigurationen görs påverkar givarfelet för mycket. Efter medelvärdesmätningar på givarna visar en av dem ett fel på upp till $\pm 8^\circ$ efter nollställning, vilket är för mycket för reglersystemet. Detta klarar regulatören inte i simulering och det märks tydligt vid fysiska tester att det inte går att göra med den nuvarande regulator-konfigurationen. Då resultatet blir samma vid backning rakt bakåt och backning efter en cirkulär trajektoria. Av den anledningen visas endast en bildserie i figur 40.



(a) sekvens 1



(b) sekvens 2



(c) sekvens 3

Figur 40: Backning rakt bakåt med DRT-konfiguration

6 Diskussion

I detta kapitlet diskuteras de resultat som framkommit under projektet samt reflektioner över hur fortsatt arbete kan se ut och vilka kommersiella möjligheter som finns för projektet.

6.1 Resultat

Under projektet har ett regelsystem som klarar några av de krav som har ställts upp i 1.3.1 utvecklats. Även ifall inte alla krav är uppfyllda är gruppen nöjd med resultatet av projektet då de krav som är uppfyllda är de som vi ansåg vara viktigast, att backa bakåt och kunna backa runt ett hörn. Detta är enligt gruppen en bra start på projektet där vi har visat att det är möjligt att genomföra projektet.

Matematisk modellbygge

Den matematiska modell som har skapats under projektet har verifierats att fungera i simulering och vid fysiska tester. Det går med inte allt för komplicerade trigonometriska funktioner att beskriva hur DRT-konfigurationen uppför sig vid backning med låga hastigheter.

Reglersystem

Vid verifiering av regelsystem med hjälp av Simulink och den fysiska modellen gick det att se att regelsystemet fungerade. Då regelsystem var det delproblem som vi misstänkte skulle vara det svåraste att lösa var det mycket upplyftande att se att regelsystemet fungerade.

Fysisk modell

Utöver regelsystemet har en fysisk modell byggts för att kunna verifiera att regelsystemet fungerar. Då modellen är ett eget bygge och ingen köpt modell är gruppen mycket nöjda med att vi har fått den att fungera. Detta visar att gruppen har både teoretisk och praktiskt kunskap och klarar av att kombinera dessa. Dock finns det några problem med den fysiska modellen, motorn är för svag, däcken har inte tillräckligt med fäste och

motorn driver bara på ett hjul vilket resulterar i att den lätt blir stående då det drivande hjulet inte får fäste.

Verifiering

Vid verifiering av reglersystemet med hjälp av den fysiska modellen kunde vi konstatera att reglersystemet fungerade som det var tänkt och att det fungerade att stabilisera systemet med en semitrailer. När ytterligare en dolly adderades blev det ett litet fel som syntes ifall lastbilen backade en längre sträcka, lastbilen drog då en liten bit åt sidan. När vi testade DRT-kombinationen fallerade systemet och semitrailerna fastnade i varandra enligt fällknivsverkan.

Anledningen till detta är att de potentiometrar som användes på den fysiska modellen inte var tillräckligt noggranna. Istället blir det ett fel som reglersystemet inte klarar av att korrigera.

Eftersom reglersystemet är modulärt och samma formler används till alla modulerna i det fysiska systemet går det att bekräfta att reglersystemet fungerar korrekt efter att ha testat med endast ett släp. Under projektet har det största orosmolnet varit ifall reglersystemet skulle fungera eller inte. Därför är det mycket tillfredsställande att kunna verifiera att reglersystemet fungerar som planerat.

6.2 Reflektioner

I detta kapitlet diskuteras möjligheterna till att applicera det utvecklade reglersystemet på en riktig lastbil och hur fortsatt arbete kan utföras.

6.2.1 Fortsatt arbete

Vi anser oss vara nöjda med det som har uträttats under projektet men det finns mycket kvar som går att undersöka och testa. Därför rekommenderar vi att man vid eventuellt vidare arbete med projektet fokuserar på följande förslag.

Globalt koordinatsystem

Nu utgår koordinatsystemet ifrån den sista vagnen i DRT-kombinationen. Ifall fordonskombinationen står rakt och det sista släpet sedan flyttas kommer lastbilen att följa efter släpet då de andra släpen och lastbilen förhåller sig till det sista släpets koordinatsystem. För att undvika detta skulle ett globalt koordinatsystem behöva definieras. Då behövs inte hänsyn, i lika stor utsträckning, tas till de olika delarna i fordonskombinationen. Istället skulle de olika delarna förhålla sig till det globala koordinatsystemet

istället för att förhålla sig till det koordinatsystem som är definierat efter positionen på sista vagnen.

Annan reglerstruktur

Vid vidare arbete anser vi att man borde utreda huruvida en annan typ av reglerstruktur går att använda istället. Detta eftersom det kanske inte går att få tillräckligt små störningar så att den typen av återkoppling som används klarar av att reglera systemet. Om man exempelvis i förväg har lite mer fakta om givarna man använder skulle en feedforward-struktur kunna förbättra prestandan på regulatorn. Även integralverkan skulle vara intressant att analysera, ifall det hade tillfört något genom att reducera de konstanta fel som uppstår vid den aktuella reglerstrukturen.

Undersök sensorer/sensorplacering för riktig lastbil

De sensorer som används som insignal till reglersystemet behöver utvärderas för att se ifall de går att använda på en riktig lastbil. Då de potentiometrar som används på den fysiska modellen inte fungerade perfekt behöver alternativ undersökas. På den fysiska modellen sitter potentiometern i kopplingen mellan släpen. På en riktig lastbil uppstår det mycket stora krafter där och därför behövs det säkerställas att sensorerna inte skadas. Det skulle kunna leda till att signalen blir felaktig vilket kan resultera i att lastbilen betar sig oberäkneligt.

Backkamera

Då projektet går ut på att underlätta vid backning med långa fordonskombinationer har möjligheten att applicera en kamera längst bak diskuterats. Eftersom det blir svårare att se vad som händer längst bak vid längre fordonskombinationer kan en backkamera vara ett bra komplement till reglersystemet. Som det är nu tar systemet ingen hänsyn till vad som händer bakom fordonskombinationen utan det är upp till chauffören att se till att inget är bakom. Ytterligare tillägg till systemet är ett autobroms system likt de som finns i moderna bilar. I de systemen används radar och kameror för att se vad som händer runt fordonet och dessa signaler tolkas och fordonet kan automatiskt bromsa ifall det skulle behövas. Ett liknande system skulle kunna appliceras på det bakersta släpet.

Grafisk trajektorieplanerare

För att göra systemet mer autonomt föreslår vi att en trajektorieplanerare skapas. Med detta menas ett grafiskt gränssnitt där det går att programmera hur fordonskombinationen ska röra sig. Ett exempel på detta kan vara att lastbilen skall backa runt ett

hörn. Att ge systemet ett mönster som sedan anpassas till de två sätten att styra kombinationen tills en trajektoria har anpassats. Det ska då gå att stanna, programmera in vart lastbilen skall hamna och sedan låta lastbilen själv förflytta sig. Det här skulle gå att göra med hjälp av exempelvis GPS och mycket exakta kartor där de används som input till koordinatsystemet. Med detta skulle reglersystemet självt kunna avgöra när det behöver svänga för att hamna på den planerade positionen.

Systemet behöver därför testas ordentligt för att säkerställa att eventuella buggar har åtgärdats. I ett första skede kan systemet testas på den fysiska modellen och sedan på en riktig lastbil.

6.2.2 Kommersiellt bruk

Eftersom det utvecklade reglersystemet är modulärt skulle det enkelt gå att applicera direkt på en fullskalig lastbil utan större problem. Det är istället de mekaniska bitarna som kommer orsaka problem, till exempel vilka sensorer som ska användas och hur dessa ska vara placerade för att inte skadas.

Vidare kan man tänka att systemet inte får ta över allt för mycket av styrning ifall en bugg skulle göra att systemet fallerar. Vid ett sådant tillbud är det viktigt att chauffören kan ta över styrningen av lastbilen och avbryta backningsmanövern. Det här skulle kunna lösas med ett dödmansgrepp eller nödbroms som chauffören kan trycka på för att direkt kunna stoppa lastbilen.

7 Slutsats

Projektet har gått ut på att underlätta vid backning med långa fordonskombinationer 1.3. För att lösa problemet valdes ett reglersystem som reglerar styrningen för att korrigera störningarna och därmed underlätta backningen.

Vid verifiering av reglersystemet visade det sig att valet av ett modulärt system var mycket bra. Det var då möjligt att testa med endast en semitrailer och sedan addera en dolly och se hur reglersystemet påverkades av flera moduler. Eftersom matematiken och reglersystemet är samma för varje modul gick det att verifiera att det fungerade korrekt efter att ha testat med endast en modul. Dock fungerade inte reglersystemet korrekt för fler moduler på grund av de potentiometrarna som användes inte var tillräckligt exakta.

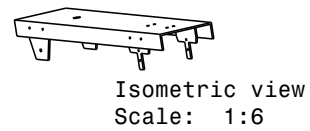
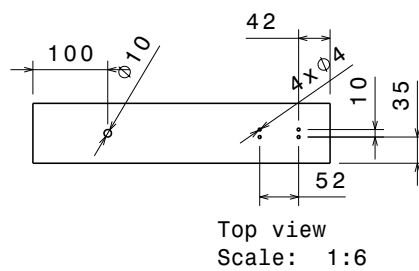
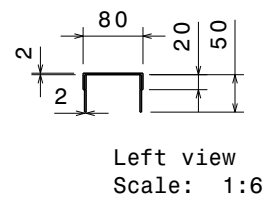
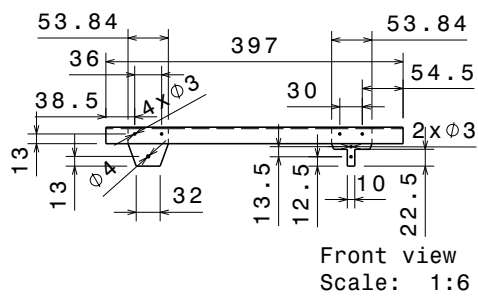
Efter att ha verifierat att reglersystemet fungerade som det skulle anser vi oss ha genomfört detta projekt med ett mycket lyckat resultat.

Litteratur

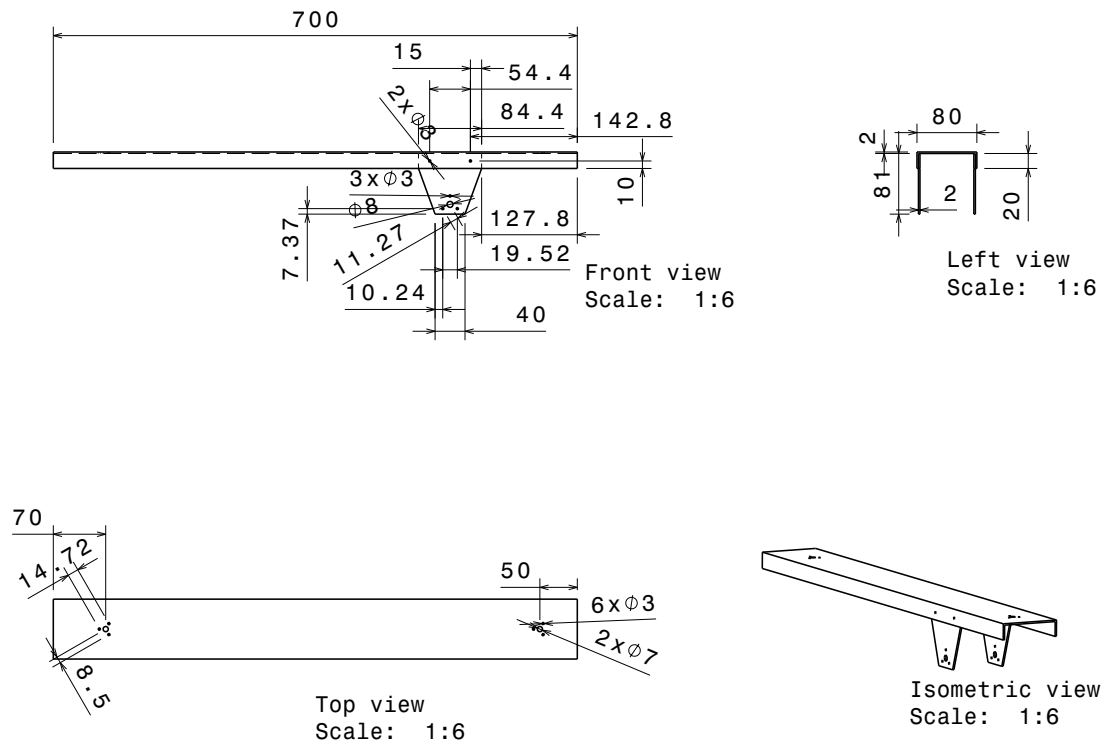
- [1] Carl-Johan Hoel och Paolo Falcone. “Low speed maneuvering assistance for long vehicle combinations”. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*. 2013, s. 598–604. ISBN: 978-146732755-8.
- [2] Kajsa-Stina Kalin. *Superlång lastbil minskar utsläpp*. Utg. av Sydsvenskan. Web Page. Nov. 2012. URL: <http://www.sydsvenskan.se/ekonomi/superlang-lastbil-minskar-utslapp/>.
- [3] Steven M. LaValle. *Planning Algorithms*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2006. ISBN: 0521862051.
- [4] Bengt Lennartson. *Reglerteknikens grunder*. 4. uppl. Bengt Lennartson (Lund : Studentlitteratur) 23 cm 2. tr., 2003 ; 3. tr., 2005 ; 4. tr., 2006 ; 5. tr., 2007 ; 6. tr., 2008 BTJ. Lund: Studentlitteratur, 2002, [2], xii, 513 s. ISBN: 91-44-02416-9 978-91-44-02416-5 (5. tr.) URL: <http://www.studentlitteratur.se>.
- [5] R. M. Murray. *Lecture 2 – LQR Control*. Web Page. 2006. URL: <https://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds110/wi06/lqr.pdf>.
- [6] Inc. The MathWorks. *Band-Limited White Noise*. Web Page. 2015. URL: <http://se.mathworks.com/help/simulink/slref/bandlimitedwhitenoise.html>.
- [7] Transportstyrelsen, utg. *Mått och vikt*. Febr. 2015. URL: <http://www.transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/Yrkestrafik/Gods-och-buss/Matt-och-vikt/>.

A Appendix

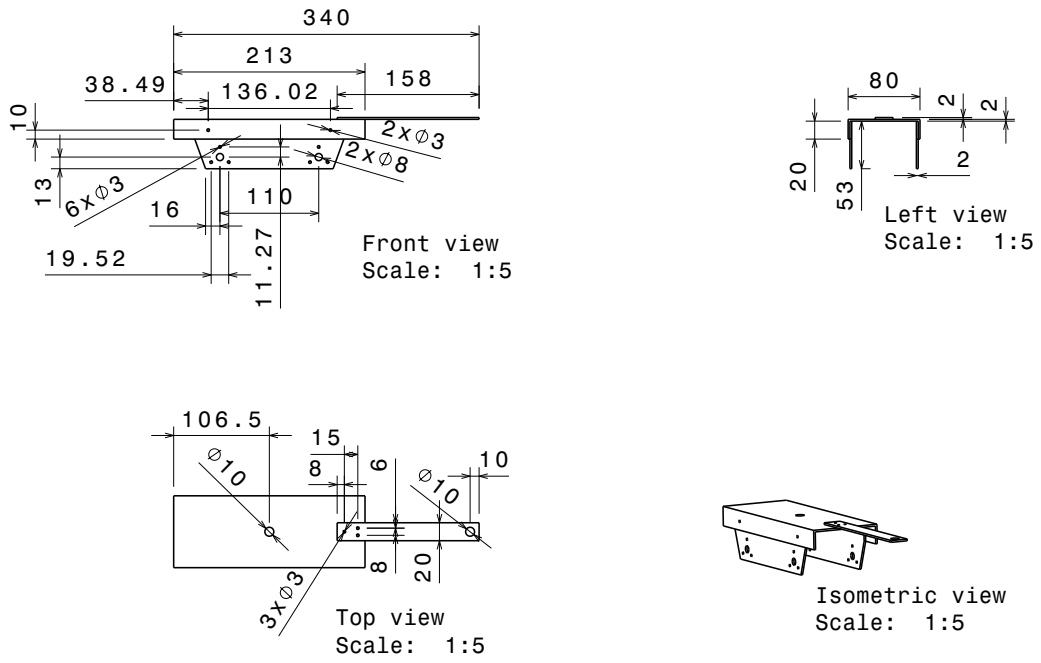
A.1 Ritningar



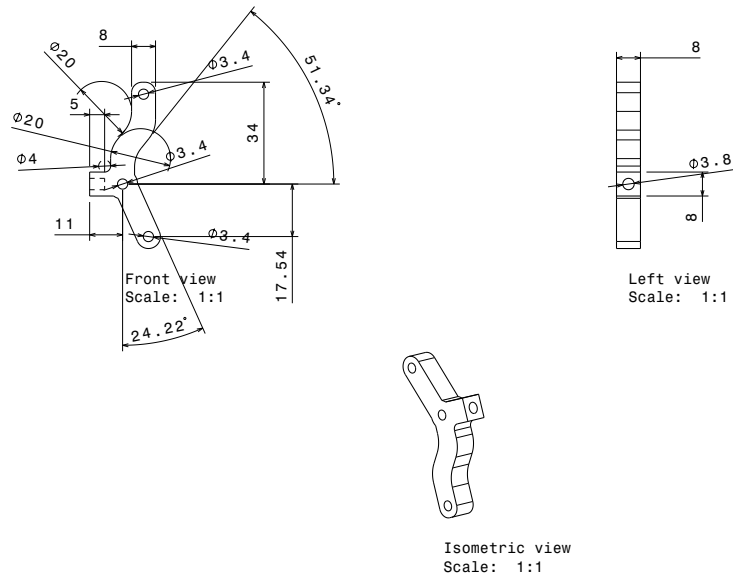
Figur 41: Ritning Dragbil



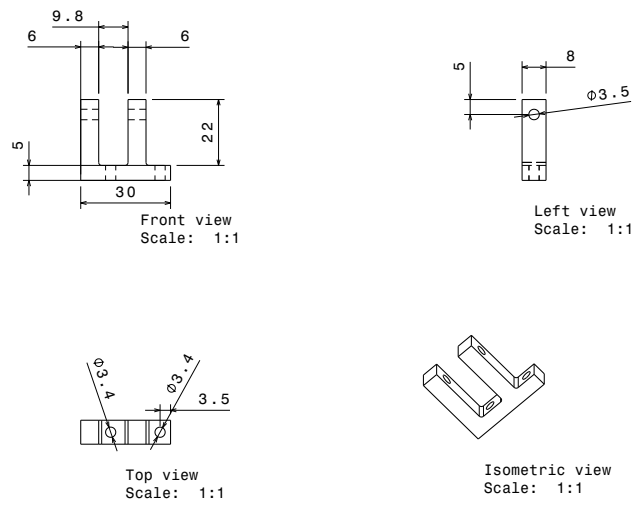
Figur 42: Ritning Trailer



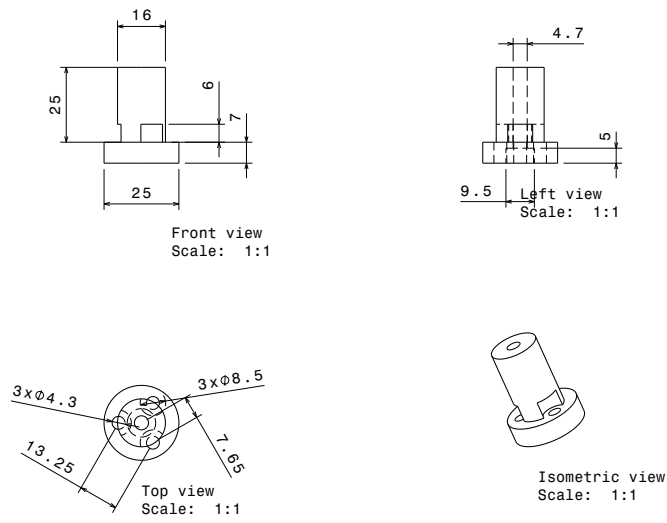
Figur 43: Ritning Dolly



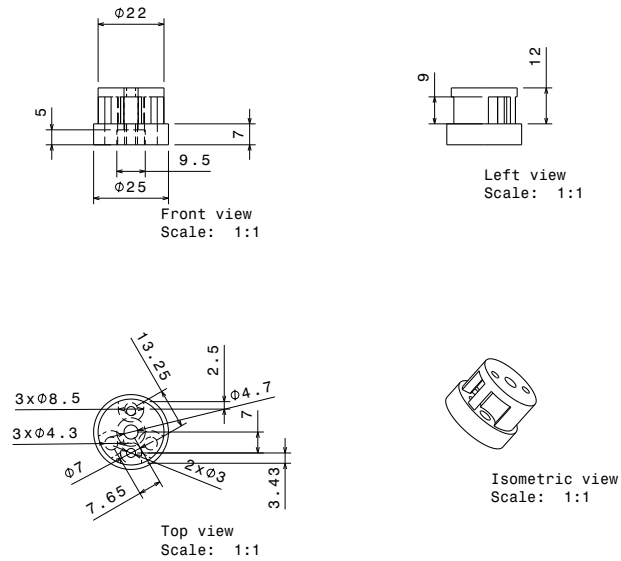
Figur 44: Ritning Styrled



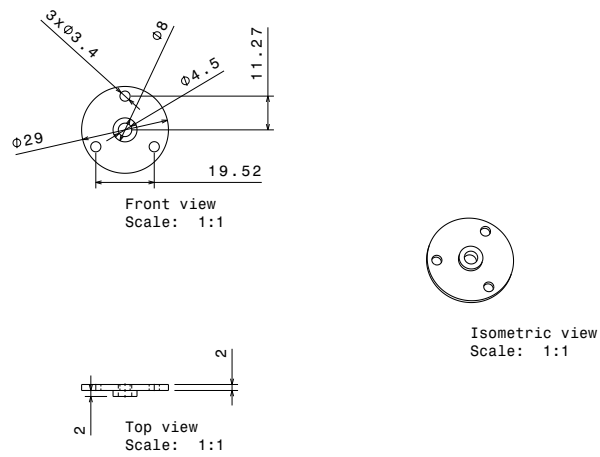
Figur 45: Ritning Styrledsfaste



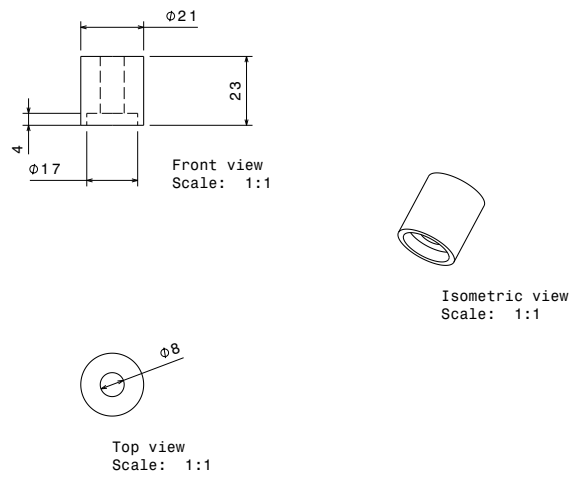
Figur 46: Ritning Hjulfäste



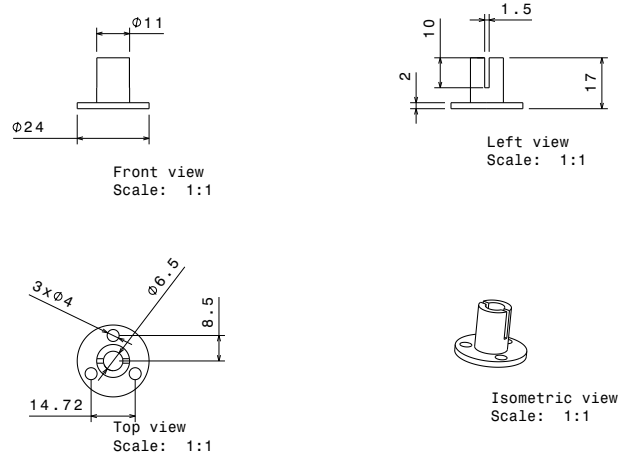
Figur 47: Ritning Hjulfäste för drivande hjul



Figur 48: Ritning Drivbustning



Figur 49: Ritning Potensspacer



Figur 50: Ritning Potenslock