

Faculteit Industriële
Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Herontwerp boottransporteur en ontwikkeling van geavanceerde geometrische
stuurconfiguraties

Matthias Poncelet

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Kris HENRIOULLE

PROMOTOR :

ing. Jef HOSTE

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2024
2025

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

***Herontwerp boottransporteur en ontwikkeling van geavanceerde geometrische
stuurconfiguraties***

Matthias Poncelet

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Kris HENRIOULLE

PROMOTOR :

ing. Jef HOSTE



KU LEUVEN

Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn opleiding 'Industriële Ingenieurswetenschappen: Elektromechanica – Ontwerp & Productie', aan de Universiteit Hasselt in samenwerking met de Katholieke Universiteit Leuven te Diepenbeek.

Als doorstromer uit een professionele bacheloropleiding kreeg ik de unieke kans om mijn masterproef in één semester af te ronden bij een actieve onderneming. Ondanks de beperkte tijd heb ik me volledig kunnen verdiepen in het project, wat heeft geleid tot een resultaat waar ik met trots op terugkijk. Dit succes was echter niet mogelijk zonder de uitstekende ondersteuning die ik gedurende het proces heb mogen ontvangen. Daarom wil ik mijn oprechte dank uitspreken aan iedereen die heeft bijgedragen aan de realisatie van dit project.

In het bijzonder wil ik ing. Jef Hoste bedanken voor de kans om aan dit uitdagende project te werken en voor zijn waardevolle begeleiding tijdens de uitvoering ervan.

Daarnaast ben ik ook mijn collega's van het engineeringdepartement van Werkhuizen Hengelhof dankbaar voor hun deskundig advies en hun bereidheid om mij bij te staan op de werkvloer.

Tot slot wil ik prof. dr. ir. Kris Henriouille hartelijk bedanken voor zijn constructieve opvolging en ondersteuning bij de afronding van deze opdracht.

Matthias Poncelet

Januari 2025

Inhoudsopgave

Woord vooraf	I
Lijst met tabellen.....	7
Lijst met figuren	9
Abstract	11
Abstract in English	13
1. Inleiding	15
1.1 Situering	15
1.2 Probleemstelling	17
1.3 Doelstellingen	18
1.4 Methode	21
1.5 Vooruitblik.....	22
2. Bronnenstudie	23
2.1 Bootwagens	23
2.2 Liftsystemen	25
2.2.1 Heftruckmodel.....	25
2.2.2 Palletwagenliftsysteem.....	26
2.2.3 Schaarbrugstelsysteem.....	26
2.3 Geometrische stuurconfiguraties.....	27
2.3.1 Ideale voorwielsturing.....	27
2.3.2 Parallelsturing.....	28
2.3.3 Ackermann-sturing.....	29
2.3.4 Vierwielsturing.....	31
2.3.5 Hondsgangsturing.....	32
2.3.6 Zero-turnsturing	34

3.	Herontwerp.....	35
3.1	Voorontwerp.....	36
3.2	Finaal herontwerp.....	39
3.3	Mechanische sterkteberekeningen.....	40
4.	Intern componentenonderzoek.....	41
4.1	Elektrische motordrive & motor	41
4.2	Hydraulische wielmotor	42
4.3	Proportionele stuurventielen	44
4.4	Teleradio ontvangermodule	45
5.	Wiskundige uitwerking stuurconfiguraties	47
5.1	Selectie inputparameters.....	48
5.2	Lijnmodel.....	49
5.3	Wiskundige relatie tussen stuurcilinder en stuurhoek	51
5.4	Stuurhoekenrelatie	53
6.	Simulatie sturing boottransporteur.....	57
6.1	Programmatie stuurhoekparameters	57
6.2	Grafische weergave	58
6.3	Visuele verificatie	64
6.4	Interactief model	66
6.4.1	Geïntegreerde ideale voorwielsturing.....	67
6.4.2	Geïntegreerde vierwielsturing	67
6.4.3	Geïntegreerde hondsgangsturing.....	68
6.5	Beperkingen.....	69
7	Documentatie voor Teleradio	73
7.1	In- en uitgangenlijst.....	73
7.2	Stuurlogica in pseudocode.....	76
7.3	Lay-outvoorstel voor de afstandsbediening.....	78

8	Besluit.....	81
8.1	Vervolgonderzoek	82
9	Referentielijst.....	83
	Bijlagenlijst.....	87
	Bijlage A: Sterkteberekening vierkant buisprofiel.....	88
	Bijlage B: Sterkteberekening scharnieras	93
	Bijlage C: Datasheet Bonfiglioli wielmotor	94
	Bijlage D: Wielenplot	95
	Bijlage E: Afbakening rotatiepuntzone	96

Lijst met tabellen

Tabel 1: Eisenpakket	20
Tabel 2: Coördinatentabel.....	62
Tabel 3: Ingangenlijst	74
Tabel 4: Uitgangenlijst	75
Tabel 5: Stuurlogica in pseudocode	76
Tabel 6: Bedieningselementen.....	79

Lijst met figuren

Figuur 1: Scheepsbokken	16
Figuur 2: Scheepsbok.....	16
Figuur 3: Maritieme vorkheftruck.....	16
Figuur 4: Bootwagen	16
Figuur 5: Rupsbandenmodel bootwagen.....	23
Figuur 6: Model Schilstra	24
Figuur 7: Model Roodberg.....	24
Figuur 8: Model Heilig Fabrication	24
Figuur 9: Heftruck mechanisme	25
Figuur 10: Ruw terrein palletwagen.....	26
Figuur 11: Palletwagen mechanisme.....	26
Figuur 12: Schaarbrugmechanisme	26
Figuur 13: Ideale voorwielsturing	27
Figuur 14: Parallelsturing.....	28
Figuur 15: Ackermann-principe.....	29
Figuur 16: Effect van vaste structuur stuurarmen en verbindingstang.....	30
Figuur 17: Vierwielsturing.....	31
Figuur 18: Hondsganggeometrie.....	32
Figuur 19: Knikgestuurde tractoren	33
Figuur 20: Zero-turn stuurconfiguratie.....	34
Figuur 21: Knikmechanisme voorontwerp	36
Figuur 22: Draaimechanisme voorwielen	37
Figuur 23: Draaimechanisme achterwielen	37
Figuur 24: Middenstructuur	38
Figuur 25: Doorsnede knikmechanisme.....	38
Figuur 26: Voorontwerp	38
Figuur 27: Finaal herontwerp	39
Figuur 28: Bovenaanzicht finaal herontwerp	39
Figuur 29: Zijaanzicht finaal herontwerp	39
Figuur 30: Belasting op vierkant buisprofiel.....	40
Figuur 31: Scharnierassen	40
Figuur 32: PMAC-motor.....	41
Figuur 33: GVI.....	41
Figuur 34: 700CK serie wielmotoren.....	42
Figuur 35: Hydraulisch schema wielmotor.....	43
Figuur 36: BLS6	44
Figuur 37: Teleradio ontvangermodule.....	45

Figuur 38: Stuurhoeken	48
Figuur 39: Stuurmechanisme linker voorwiel	49
Figuur 40: Lijnmodel stuurmechanisme	49
Figuur 41: Maximale lengte stuurcilinder.....	50
Figuur 42: Minimale lengte stuurcilinder.....	50
Figuur 43: Invoeging hulpparameter t	51
Figuur 44: Rotatiepuntbepaling.....	53
Figuur 45: Slavehoekenbepaling.....	55
Figuur 46: Inputschuifbalken	57
Figuur 47: Slavehoek-waardetoekenning	57
Figuur 48: Limietoverschrijdende stuurpositie.....	58
Figuur 49: Stuurmechanisme	58
Figuur 50: Vereenvoudigd lijnmodel	58
Figuur 51: Schematische verduidelijking van lijnmodel.....	59
Figuur 52: Simulatie sturing boottransporteur	62
Figuur 53: Simulatie sturing boottransporteur met wielen.....	63
Figuur 54: Simulatie sturing boottransporteur met rotatiepunt en loodlijnen	65
Figuur 55: Interface simulatie.....	66
Figuur 56: Geïntegreerde ideale voorwielaansturing	67
Figuur 57: Geïntegreerde vierwielsturing.....	67
Figuur 58: Geïntegreerde hondsgangsturing.....	68
Figuur 59: Ongeldige configuratie.....	69
Figuur 60: Dichtst mogelijke rotatiepunt.....	70
Figuur 61: Visuele weergave rotatiepuntzones.....	70
Figuur 62: Visuele weergave uitgangen	73
Figuur 63: Visuele weergave ingangen	74
Figuur 64: Afstandsbedieningslay-out.....	78
Figuur 65: Draaicirkels hefmechanisme.....	82

Abstract

Deze masterproef, uitgevoerd bij Werkhuizen Hengelhoef, richt zich op het herontwerpen van een op afstand bestuurbare boottransporteur. Een boottransporteur is een sectorspecifieke machine binnen de scheepsbouw die gebruikt wordt voor boten op het land te verplaatsen. Het project kadert binnen de vervanging van een verouderd model met structurele en functionele beperkingen. Enerzijds is het chassis ongeschikt voor een vernieuwde elektrische aandrijving, anderzijds is de machine te beperkt in het maken van scherpe draaibewegingen, wat nauwkeurig manoeuvreren bemoeilijkt.

Het doel van deze masterproef is het uitwerken van een mechanisch herontwerp en het onderzoeken, simuleren en valideren van geavanceerde stuurconfiguraties ter verbetering van de wendbaarheid. Daarnaast worden extra documenten opgesteld, ter voorbereiding op de verdere ontwikkeling van de communicatiehardware en -software.

Het herontwerp wordt gerealiseerd in SolidWorks, waarbij kritische onderdelen worden geverifieerd met sterkteberekeningen. De geavanceerde stuurconfiguraties worden omgezet in wiskundige modellen en gevalideerd via een interactieve Excelsimulatie.

De resultaten omvatten een CAD-model, een wiskundige uitwerking van de stuurhoekenrelaties, een Excelsimulatie waarin drie geavanceerde stuurmodi zijn geïntegreerd en tabellen met de in- en uitgangen, de stuurlogica in pseudocode en een afstandsbedieningslay-out. De doelstellingen werden succesvol bereikt en de resultaten ondersteunen de verdere uitwerking van de vernieuwde boottransporteur.

Abstract in English

This master's thesis, conducted at Werkhuizen Hengelhof, focuses on the redesign of a remote-controlled boat transporter. A boat transporter is a sector-specific machine in shipbuilding used to move boats on land. The project is part of the replacement of an outdated model with structural and functional limitations. On the one hand, the chassis is unsuitable for a modern electric drive system. On the other hand, the machine is limited in its ability to execute sharp turning movements, making precise maneuvering challenging.

The objective of this master's thesis is to develop a mechanical redesign and to investigate, simulate, and validate advanced steering configurations aimed at improving maneuverability. Additionally, supplementary documentation has been prepared to support the further development of communication hardware and software.

The redesign was executed in SolidWorks, with critical components verified using strength calculations. The advanced steering configurations were translated into mathematical models and validated through an interactive Excel simulation.

The results include a CAD model, a mathematical analysis of steering angle relationships, an Excel simulation integrating three advanced steering modes, and tables outlining inputs and outputs, steering logic in pseudocode, and a remote control layout. The objectives were successfully achieved, and the results support the continued development of the redesigned boat transporter.

I. Inleiding

Het eerste hoofdstuk kadert de masterproef en introduceert de context waarin het project plaatsvindt. Het begint met een situering waarin wordt toegelicht welke bedrijven betrokken zijn en in welke sector de masterproef is gesitueerd. Vervolgens wordt de probleemstelling behandeld, waarbij wordt opgesteld welke uitdagingen aanleiding hebben gegeven tot de vraag naar een ingenieursmatige oplossing. Daarna worden de doelstellingen geformuleerd, waarbij op gestructureerde wijze de eisen worden beschreven. Deze doelstellingen vormen de basis voor het laatste onderdeel van dit hoofdstuk: de methode. Hierin wordt beschreven welke aanpak wordt gehanteerd en welk stappenplan is opgesteld om de opgestelde doelstellingen te realiseren.

I.1 Situering

Deze masterproef wordt uitgevoerd bij Werkhuizen Hengelhoef te Genk. Het onderzoek richt zich op de scheepsbouwsector en kadert binnen een lopend project voor het bedrijf Tinnemans Floating Solutions.

Het bedrijf Tinnemans Floating Solutions is gelegen te Maasbracht, Nederland en is de overkoepelende naam van vier bedrijfsonderdelen [1]. Tinnemans Floating Solutions is gespecialiseerd in diverse activiteiten binnen de scheepsbouwsector. Hun diensten omvatten zowel de nieuwbouw als de reparatie van schepen, evenals de interieurinrichting van schipperswoningen en stuurhutten. Daarnaast bouwen ze op maat gemaakte jachten, waarbij ze werken met hoogwaardige materialen zoals staal en aluminium.

Werkhuizen Hengelhoef is een industriële aannemer. Het bedrijf telt circa 45 medewerkers en beschikt over een eigen ingenieursafdeling. Werkhuizen Hengelhoef richt zich op een breed scala aan technische disciplines, waaronder engineering, plaatbewerking, constructie, machinebouw, verspaning, montagewerken en hydraulische installaties. Deze veelzijdigheid maakt hen uitermate geschikt in het uitvoeren en ondersteunen van uiteenlopende projecten in de staal, beton, chemie, auto, farmacie, voeding en nucleaire industrie [2].

In de scheepsbouw wordt er bij zowel de productie als de reparatie van schepen een serie van cruciale stappen doorlopen om de schepen zeewaardig te maken. Deze handelingen worden volledig uitgevoerd op het land voordat de vaartuigen te water worden gelaten. Bij deze handelingen worden de kleinere schepen op bokken gezet.¹

¹ Om de context van de thesis goed te kaderen worden schepen kleiner dan 15 meter verder in de tekst “boten” genoemd.

Zoals figuur 1 en figuur 2 tonen, zorgen de bokken ervoor dat de boten stabiel en rechtop blijven staan. Daarnaast maken ze het eenvoudig om de boten op te tillen met een maritieme vorkheftruck (figuur 3) of ander sectorspecifiek materieel, zoals een boottransporteur. Een boottransporteur ook wel een bootwagen genoemd (figuur 4), werkt als een palletwagen en kan onder de bok worden gereden, waardoor het mogelijk is de bok, samen met het vaartuig, over relatief korte afstanden te verplaatsen. Deze opstelling maakt het verplaatsen van boten op het droge makkelijker, wat bijdraagt aan een efficiënte productiestroom op de werkvloer.



Figuur 1: Scheepsbokken [3]



Figuur 2: Scheepsbok [3]



Figuur 3: Maritieme vorkheftruck [4]



Figuur 4: Bootwagen [3]

1.2 Probleemstelling

Tinnemans Floating Solutions maakt momenteel gebruik van een boottransporteur die werkt op hydrauliek en wordt aangedreven door een dieselmotor. De machine vertoont echter verschillende beperkingen en voldoet daardoor niet langer aan de huidige werknormen. Het bedrijf is momenteel genoodzaakt om extra werkvoorschriften en maatregelen te treffen bij het gebruik van de machine. Tinnemans Floating Solutions heeft Werkhuizen Hengelhoef de opdracht gegeven om de ontwikkeling van een nieuwe, verbeterde versie te starten om zowel het gebruiksgemak als het energieverbruik te optimaliseren.

Momenteel heeft Werkhuizen Hengelhoef een projectdossier opgesteld waarin potloodschetsen van mechanische constructies en mechanismen zijn opgenomen, evenals een oplistings van componenten die opnieuw gebruikt zullen worden, omdat ze dezelfde functie vervullen als bij de vorige machine. Daarnaast bevat het dossier een nieuwe elektrische aandrijving die gebruikt gaat worden ter vervanging van de dieselmotor, om de hydraulische groep aan te drijven. Veel delen dienen nog verder uitgewerkt te worden met berekeningen, designs en schema's. De masterproef behandelt enkele van deze onderdelen die opgedeeld kunnen worden in twee hoofdproblemen.

Ten eerste voldoet de mechanische structuur van de huidige machine niet langer aan de gestelde eisen. Door de wijziging van het aandrijfmechanisme is het noodzakelijk om de mechanische constructie van de machine te herzien en rekening te houden met nieuwe onderdelen.

Ten tweede zijn de stuurmogelijkheden van de machine beperkt. Een goed herontwerp kan voor aanzienlijke voordelen zorgen op het gebied van mobiliteit, wat de gebruiksmogelijkheden van de machine vergroot.

1.3 Doelstellingen

De twee hoofdproblemen die de masterproef behandelt worden vertaald naar hoofddoelstellingen. Hierdoor wordt het mogelijk om projectmatig en gericht te werk te gaan.

De eerste hoofddoelstelling is het aanvullen van het projectdossier met een voorontwerp van de mechanische constructie. Dit voorontwerp moet worden uitgewerkt als een CAD-model in SolidWorks. Voor een volgend deel van de masterproef is het belangrijk dat de werking en geometrie van de machine worden vastgelegd in het CAD-model. Het model moet de mogelijkheid bieden om de vier wielen onafhankelijk van elkaar te besturen. Deze functie is essentieel om de mobiliteitsvoordelen van de machine te onderzoeken en te realiseren. Om het voorontwerp te valideren moeten er ook sterkteberekeningen uitgevoerd worden op kritische delen van de mechanische constructie.

De tweede hoofddoelstelling dient om de gebruiksvriendelijkheid en operationele mogelijkheden van de machine te verbeteren. Geavanceerde geometrische stuurconfiguraties die mogelijk worden door het onafhankelijk aansturen van de vier wielen moeten in kaart gebracht worden. Deze stuurconfiguraties moeten grondig onderzocht worden alvorens ze geïmplementeerd kunnen worden in het besturingssysteem van de machine. De stuurconfiguraties die geselecteerd worden door de ingenieurs van Werkhuizen Hengelhof, moeten worden uitgewerkt in wiskundig functies.

Deze wiskundige functies moeten gevalideerd en gevisualiseerd worden a.d.h.v. een 2D-Excelsimulatie. Deze simulatie moet de stuurcomponenten en stuurhoeken visualiseren. Verder kan de simulatie ook gebruikt worden om onvoorziene problemen op te sporen.

Een bijkomende doelstelling is een kleinschalig componentenonderzoek op de actieve componenten die reeds uitgekozen zijn voor het project. Het is belangrijk om alle communicatie- en stuurmogelijkheden van deze componenten in kaart te brengen en mogelijke compatibiliteitsproblemen op te sporen.

Door het componentenonderzoek en de eerder opgestelde wiskundige functies kan de stuurlogica van de machine opgesteld worden. Het externe bedrijf Teleradio heeft ervaring met dit soort projecten en heeft als opdracht de gehele communicatiehardware en -software uit te werken. Dit omvat de communicatie tussen de draadloze afstandsbediening, ontvangermodule, stuurcilinders, pompen, motoren, stuurventielen, sensoren, knoppen, etc. Om de opdracht in zijn volledigheid uit te voeren vraagt Teleradio drie documenten uit te werken.

In het eerste document moeten de in- en uitgangen van de ontvangermodule opgesteld worden zodat deze correct kan communiceren met de actieve componenten van de machine. Het is hierbij belangrijk om aan te geven of het gaat om analoge of digitale signalen, evenals extra specificaties zoals stroombereik, spanningsniveau, PWM-signalen, etc.

In het tweede document moeten de stuurlogica van de machine opgesteld worden in pseudocode. Hierdoor wordt duidelijk gemaakt aan Teleradio hoe de machine moet reageren op inputsignalen en kunnen ze de pseudocode omzetten naar programmeercode.

In het derde document moet een voorstel voor de lay-out van de afstandsbediening opgesteld worden. Het lay-outvoorstel moet de benodigde knoppen en bedieningselementen bevatten om alle handelingen te kunnen uitvoeren, rekening houdend met de geselecteerde stuurconfiguraties die toegevoegd worden aan het besturingssysteem. Het doel is het creëren van een gebruiksvriendelijke afstandsbediening die intuïtieve bediening mogelijk maakt.

Extra eisen waar rekening mee gehouden moet worden in de masterproef zijn gestructureerd opgenomen in het eisenpakket (tabel 1). Deze specifieke eisen zijn maar een deel van de opgestelde eisen van het totale project.

Tabel 1: Eisenpakket

Functionele eisen	Realisatie eisen	Vaste eisen	Variabele eisen	wensen	
X					De machine moet voorzien worden van een intuïtieve draadloze afstandsbediening.
X					De machine moet voorzien worden van een dodemansknop op de draadloze afstandsbediening.
X					De mogelijkheid tot het wisselen tussen verschillende bewegingssnelheden.
X					De machine moet een maximaal gewicht van 40000 kg, inclusief het gewicht van de scheepsbok, kunnen optillen.
X					De machine moet het gewicht minimaal 200 mm in hoogte kunnen verplaatsen.
X					De machine moet voorzien worden van een parkeerrem.
	X				De machine mag maximaal een lengte van 9000 mm, een breedte van 5000 mm en een hoogte van 1500 mm hebben.
	X				De geselecteerde materialen, waaruit de installatie wordt vervaardigd, moeten enigszins bestand zijn tegen slijtage, corrosie en andere vormen van degradatie door gebruik en weerslementen.
	X				De machine moet gecoat worden (om krassen, vuil en andere vormen van degradatie tegen te gaan).
	X				Mechanische sterkteberekeningen op kritische onderdelen toevoegen aan projectdossier.
		X			De machine moet voldoen aan de machinerichtlijn: 2006/42/EG (Europese richtlijn).
		X			De machine moet voldoen aan de veiligheidsrichtlijn: NEN-EN ISO 3691-4 (driverless industrial trucks).
		X			Aansturingsprogrammatie voor Ackerman-steering besturingsmechanisme.
		X			De machine moet in veiligheid treden bij het wegvallen van stuurinstructies en op een veilige manier tot stilstand komen.
		X			De last moet op zijn plaats gehouden worden bij het wegvallen van aandrijving of stuurinstructies.
		X			De machine moet instaat zijn om een scheepsbok met functionele breedte 2500 mm op te tillen.
			X		Aansturingsprogrammatie voor ter plaatse te kunnen draaien.
			X		Aansturingsprogrammatie voor hondsgang te kunnen rijden.
			X		Aansturingsprogrammatie voor dubbele Ackerman-steering besturingsmechanisme.
				X	Wielrotatiebeperking bij stilstand, om slijtage aan wielen en ondergrond te beperken.

1.4 Methode

Om dit project ingenieursmatig aan te pakken wordt er in dit deel een structurele methode neergeschreven. Deze methode geeft weer welke stappen er gevolgd moeten worden om uiteindelijk aan een resultaat te komen dat voldoet aan de opgestelde doelstellingen. Sommige stappen in de methode moeten iteratief benaderd worden om tot een goed resultaat te komen.

Als eerste stap wordt er een bronnenstudie uitgevoerd, gericht op het vinden van op afstand bestuurbare machines binnen de scheepsbouw, specifiek voor het verplaatsen van boten. Er wordt gezocht naar literaire en commerciële bronnen. De inzichten die uit de bronnen gehaald worden, maken het mogelijk om gerichter concepten, ontwerpen en deeloplossingen op te stellen. Verder wordt de bronnenstudie uitgebreid met het uitschrijven van de werkingsprincipes van geometrische stuurconfiguraties. Hierbij wordt er gefocust op de wielpositionering tijdens het draaien en stuurhoekbepaling in verschillende geometrische configuraties.

Uit de bronnenstudie en met de inzichten van andere ingenieurs die aan dit project werken, wordt een voorontwerp opgesteld. Dit voorontwerp wordt vertaald in een CAD-model in SolidWorks. Het CAD-model bestaat in deze fase uit *solid body*-componenten. Dat wil zeggen dat er bij het intekenen van de onderdelen nog geen rekening wordt gehouden met hun respectievelijke maakbaarheid.

In de volgende fase wordt het voorontwerp omgezet naar een finaal herontwerp. De te gebruiken componenten worden aan het CAD-model van het voorontwerp toegevoegd, en de onderdelen die oorspronkelijk als solid body-onderdelen ingetekend werden, worden omgezet naar produceerbare componenten. Zowel de keuze van deze componenten als de methode van productie worden zorgvuldig bepaald door de ingenieurs van Werkhuizen Hengelhoef, ieder met hun eigen expertise op het gebied van hydraulica, stuurmechanismen, aandrijvingen, motoren en pompen.

Wat volgt uit de vorige fase is een CAD-model van het finaal herontwerp dat het werkelijke design van de machine zal bepalen. Ter controle worden mechanische sterkteberekeningen uitgevoerd om de structurele integriteit van de machine te waarborgen.

Gelijktijdig aan de vorige fase wordt het intern componentenonderzoek van de ingevoegde actieve onderdelen uitgevoerd. Hierbij is het belangrijk om relevante informatie per onderdeel gestructureerd op te schrijven. Deze informatie is nuttig voor een latere fase waarin de in- en uitgangenlijst wordt opgesteld.

Hierna worden de wiskundige relaties tussen de stuurhoeken en stuurcomponenten uitgeschreven. Deze wiskundige vergelijkingen vormen de basisfuncties van de Excelsimulatie die hierna volgt. De Excelsimulatie moet gebruiksvriendelijk geprogrammeerd worden. Het is belangrijk dat er interactief kan gewerkt worden met de simulatie.

Indien de simulatie de wiskundige berekeningen bevestigt kan er overgegaan worden naar de laatste fase van de masterproef. In deze fase worden de drie gevraagde documenten voor Teleradio opgesteld. Deze documenten bevatten de in- en uitgangenlijst. A.d.h.v. deze lijsten en de wiskundige berekeningen kan in het tweede document de stuurlogica in pseudocode opgesteld worden. Het derde document moet enkel nog een lay-outvoorstel van de afstandsbediening bevatten, waarbij rekening gehouden wordt met de geselecteerde stuurconfiguraties die toegevoegd worden aan het besturingssysteem.

1.5 Vooruitblik

Hoofdstuk 2 behandelt de bronnenstudie, waarin bestaande boottransporteurs, liftsystemen en stuurconfiguraties worden onderzocht. Hierop volgend worden in hoofdstuk 3 de eerste concepten uitgewerkt in een voorontwerp en daarna verder verfijnd tot een finaal herontwerp. Aansluitend wordt het herontwerp gevalideerd a.d.h.v. sterkteberekeningen.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 een diepgaand onderzoek uitgevoerd naar de gebruikte actieve componenten. In hoofdstuk 5 worden de wiskundige relaties tussen de stuurhoeken en stuurcomponenten afgeleid, die de basis vormen voor de interactieve simulatie in hoofdstuk 6. Tot slot worden in hoofdstuk 7 de benodigde documenten opgesteld voor Teleradio, waaronder de in- en uitgangenlijst, de stuurlogica in pseudocode, en een lay-outvoorstel voor de afstandsbediening. Het geheel wordt afgerond met een samenvattend besluit in hoofdstuk 8.

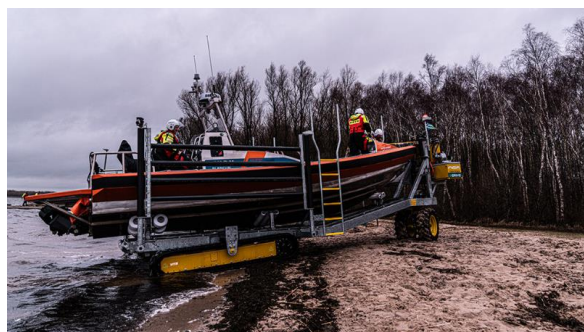
2. Bronnenstudie

Het eerste deel van de bronnenstudie richt zich op het in kaart brengen van op afstand bestuurbare machines die in de scheepsbouwsector beschikbaar zijn voor het transporteren van boten. Omdat deze machines specifiek zijn ontworpen voor een nichetoepassing, wordt verwacht dat er nauwelijks literaire bronnen over te vinden zijn en dat beschikbare commerciële informatie over kant-en-klare marktopties beperkt is. Daarom omvat de studie niet alleen een onderzoek naar sectorspecifieke totaaloplossingen, maar worden ook gelijkaardige machines uit andere sectoren onderzocht om meer kennis te vergaren.

2.1 Bootwagens

Bij het opsporen van beschikbare bootwagens op de vrije markt wordt duidelijk dat de term "bootwagen" vaak wordt gebruikt om te verwijzen naar aanhangwagens of machines die boten direct in of uit het water halen, bijvoorbeeld via een trailerhelling of vanaf het strand. Hoewel deze machines een ander einddoel hebben dan het huidige project, biedt een analyse van hun constructie en besturingssystemen waardevolle inzichten.

Het bedrijf Next Generation Machinery heeft een bootwagen ontwikkeld die gebruik maakt van rupsbanden om de drukverdeling op zanderige ondergronden te optimaliseren, en de kans op vastrijden te verminderen (figuur 5). Dit ontwerp vereenvoudigt ook de besturing van de machine. De machine wordt aangestuurd zoals een tank, door de rupsbanden individueel aan te drijven kan de machine achteruit rijden, vooruit rijden of draaien afhankelijk van het opgegeven snelheidsverschil tussen de rupsbanden. Twee grote tractorbanden dienen als neuswiel voor stabiliteit, maar worden niet aangedreven [5].



Figuur 5: Rupsbandenmodel bootwagen [5]

De bedrijven Roodberg, Schilstra Boatlift Systems en Heilig Fabrication bieden bootwagenmodellen aan die beter aansluiten bij de vereisten van het huidige project (figuur 6, figuur 7 en figuur 8). Deze zelfrijdende modellen kunnen worden aangedreven door zowel een dieselmotor als een elektrische motor en zijn uitgerust met een draadloze afstandsbediening voor besturing [3], [6], [7]. In tegenstelling tot het model van Next Generation Machinery zijn deze ontwerpen echter specifiek ontwikkeld voor gebruik op verharde en vlakke ondergronden. Ze zijn niet geschikt voor onverhard of heuvelachtig terrein. De bedrijven verstrekken gebruiksgegevens zoals hefvermogen, rijnsnelheid en accucapaciteit, maar technische informatie over de constructie en ontwerp blijft vertrouwelijk.



Figuur 6: Model Schilstra [3]



Figuur 7: Model Roodberg [6]

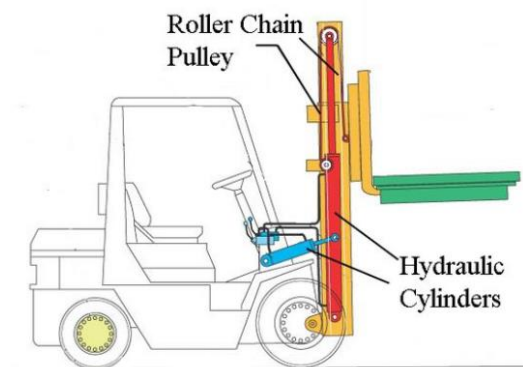


Figuur 8: Model Heilig Fabrication [7]

2.2 Liftsystemen

De bootwagenmodellen die reeds zijn besproken in de vorige sectie delen geen informatie over het hefmechanisme dat ze gebruiken. Hierdoor wordt er in dit deel een bredere blik geworpen op mobiele liftsystemen in industriële toepassingen.

2.2.1 Heftruckmodel



Figuur 9: Heftruck mechanisme [8]

Het heftruckmodel bevat componenten die potentieel waardevol zijn voor de totaaloplossing van het huidige project. Zoals figuur 9 toont, wordt een last op de vorken geplaatst. Door de verticale cilinder uit te schuiven of in te trekken, kan de last omhoog of omlaag worden gebracht. De horizontale cilinder stelt de hoek van de vorken in, wat nuttig is voor het eenvoudiger oppakken of neerzetten van lasten [8].

2.2.2 Palletwagenliftsysteem

Figuur 10 en figuur 11 tonen dat het mechanisme van de handmatige palletwagen gebruik maakt van een hydraulische cilinder, geplaatst boven het neuswiel. Hoewel het systeem slechts één hydraulische cilinder bevat, worden de voorvorken horizontaal omhoog en omlaag bewogen door middel van een stangenmechanisme [9]. De enkelvoudige hydraulische cilinder in combinatie met het stangenmechanisme, zorgen ervoor dat bewegende delen tot een minimum worden beperkt. Dit bevordert de duurzaamheid van het apparaat. Het draagt ook bij aan lagere onderhoudskosten en een langere levensduur van de palletwagen, zelfs bij intensief gebruik.



Figuur 10: Ruw terrein palletwagen [10]



Figuur 11: Palletwagen mechanisme [11]

2.2.3 Schaarbrugsysteem

Schaarbrugmechanismen worden gebruikt om horizontaal georiënteerde platformen verticaal te bewegen zonder dat het platform kantelt. Deze mechanismen zijn bijzonder geschikt voor toepassingen waarbij een compact ontwerp gewenst is in de ingeklapte stand, terwijl tegelijkertijd een aanzienlijke verticale beweging vereist is. Het verticale bereik van het schaarmechanisme neemt toe met het aantal toegevoegde verbindingen. Er zijn diverse mogelijkheden beschikbaar voor het aandrijven van deze mechanismen. Zo worden hydraulische cilinders gebruikt, evenals draadassen met handbediening of elektromotoren [12], [13].



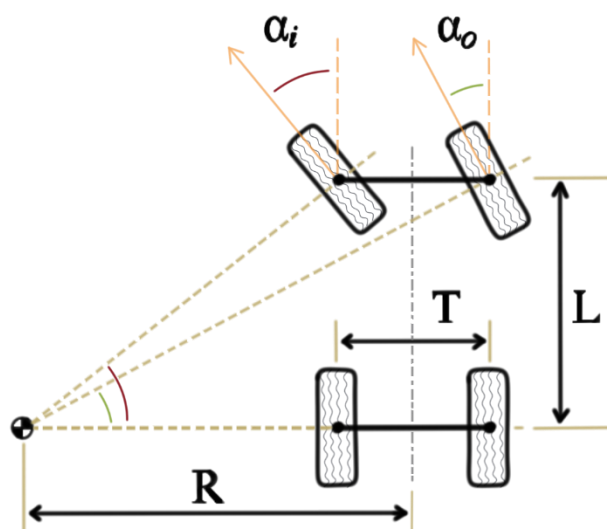
Figuur 12: Schaarbrugmechanisme [12]

2.3 Geometrische stuurconfiguraties

In het tweede deel van de bronnenstudie worden geometrische stuurconfiguraties onderzocht. De term geometrische stuurconfiguraties omvat de combinaties van stuurhoeken en wielposities die gevormd kunnen worden. Het doel van deze sectie is inzichten verwerven in verschillende stuurconfiguraties en zo de wendbaarheid van de boottransporteur optimaliseren.

2.3.1 Ideale voorwielsturing

De ideale voorwielsturing voor vierwielige voertuigen met een vaste achterwielas wordt gekenmerkt door een configuratie waarbij alle wielen rond een gezamenlijk rotatiepunt draaien (figuur 13). Dit zorgt voor een zuivere rolbeweging van de wielen tijdens het nemen van bochten, waardoor laterale slip wordt geëlimineerd en overmatige bandenslijtage wordt voorkomen [14].



Figuur 13: Ideale voorwielsturing [14]

De binnenste en buitenste wielen van het voertuig hebben in een bocht verschillende draaicirkels, en daardoor ook verschillende stuurhoeken. Dit verschil ontstaat doordat de afstand van het binnenste wiel tot het rotatiepunt kleiner is dan die van het buitenste wiel tot het rotatiepunt. De stuurwielen worden zodanig gepositioneerd dat de stuurhoeken onderling gecorreleerd zijn en elkaar beïnvloeden. Met behulp van driehoeksmeetkunde kunnen de stuurhoeken beschreven worden in functie van de geometrie van het voertuig en de gewenste draaicirkel zoals weergegeven in formule (1) en formule (2) [14].

$$\alpha_i = \tan^{-1}\left(\frac{L}{R - T/2}\right) \quad (1)$$

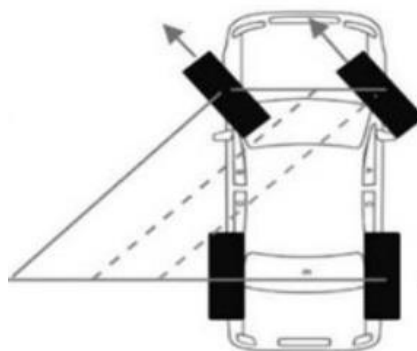
$$\alpha_0 = \tan^{-1}\left(\frac{L}{R + T/2}\right) \quad (2)$$

De ideale voorwielsturing wordt zelden toegepast in conventionele automobieltoepassingen, omdat deze op grote schaal niet kosten-efficiënt is. Het systeem is eerder een theoretische benadering en vereist daardoor uiterst precieze en dure componenten, wat het gebruik ervan in massaproductie onpraktisch maakt. In sectie 2.3.3 wordt een benaderende methode beschreven die aanzienlijk kostenefficiënter is en daarom de voorkeur geniet in de automobielsector.

In de mobiele robotica-sector wordt de ideale voorwielsturing echter wel toegepast. Door de afwezigheid van laterale slip biedt deze methode de mogelijkheid om met behulp van wiskundige formules zeer nauwkeurige berekeningen uit te voeren voor padplanning van mobiele robots. Hoewel andere stuurmethodes ook geschikt kunnen zijn voor autonome robots, valt een gedetailleerde bespreking daarvan buiten het bereik van deze masterproef.

2.3.2 Parallelsturing

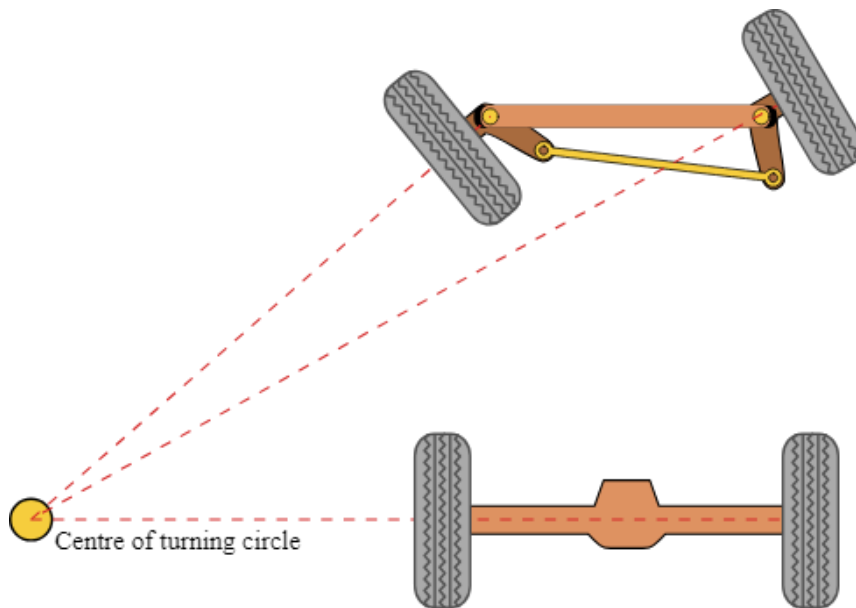
De parallelstuurmethode is de eenvoudigste stuurmethode voor een vierwielig voertuig met vaste achterwielas. Beide voorwielen worden aangestuurd met dezelfde stuurhoek (figuur 14). Deze aanpak heeft als voordeel dat berekeningen en overbrenging zeer simplistisch blijven. Het grootste nadeel is echter dat de wielen gaan wringen en slippen omdat ze niet hetzelfde rotatiepunt hebben [14]. Dit is nefast voor de levensduur van de banden en kan zorgen voor onvoorspelbaar rijgedrag bij hoge snelheden.



Figuur 14: Parallelsturing [15]

2.3.3 Ackermann-sturing

Het Ackermann-principe is een stuurmethode die wordt toegepast om de stuurhoeken van de voorwielen van een vierwielig voertuig met vaste achterwielas kostenefficiënt te optimaliseren. Deze optimalisatie heeft als doel de zuivere rolling van de wielen in bochten te benaderen [16]. De stuurmethode maakt gebruik van stuurarmen en een verbindingstang om de stuurhoeken te bepalen (figuur 15). Het Ackermann-principe is een verbetering van de parallelle stuurmethode, en een benadering van de ideale sturing.

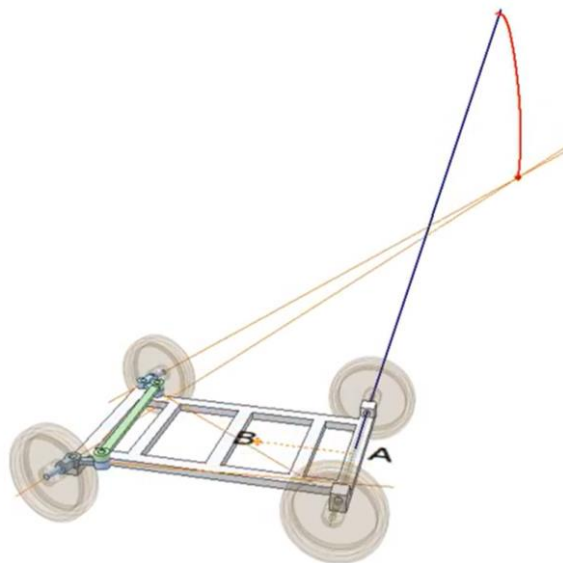


Figuur 15: Ackermann-principe [17]

In conventionele automobieltoepassingen worden de achterwielen niet verdraaid. Hierdoor ligt het theoretische rotatiepunt van het voertuig op een denkbeeldige as, die gevormd wordt door de lijn die de middelpunten van de achterwielen verbindt. Het rotatiepunt mag zich uitsluitend naar links of rechts over deze as verplaatsen en mag er niet van afwijken, zodat de vier wielen steeds rond hetzelfde punt draaien.

Door de vaste structuur van de stuurarmen en de verbindingstang en de niet-lineaire relatie tussen de ideale stuurhoeken ligt het rotatiepunt echter niet continu op deze as tijdens het draaien (figuur 16) [14], [18]. Hoe verder het rotatiepunt van de achteras af ligt, hoe meer de wielen wringen en laterale slip ondervinden. Dit veroorzaakt extra geïnduceerde krachten in het systeem, wat nadelige gevolgen heeft voor de levensduur van de banden en kan leiden tot trajectafwijkingen of defecten van stuuronderdelen.

Bij het toepassen van het Ackermann-principe dienen daarom altijd toepassingen-specifieke ontwerpkeuzes gemaakt te worden [15]. Factoren zoals het stuurbereik, bochtensnelheid, draaistraal, de ondergrond, de vering en de bandenkeuze moeten in rekening gebracht worden bij het bepalen van de lengte en hoek van de stuurarmen.



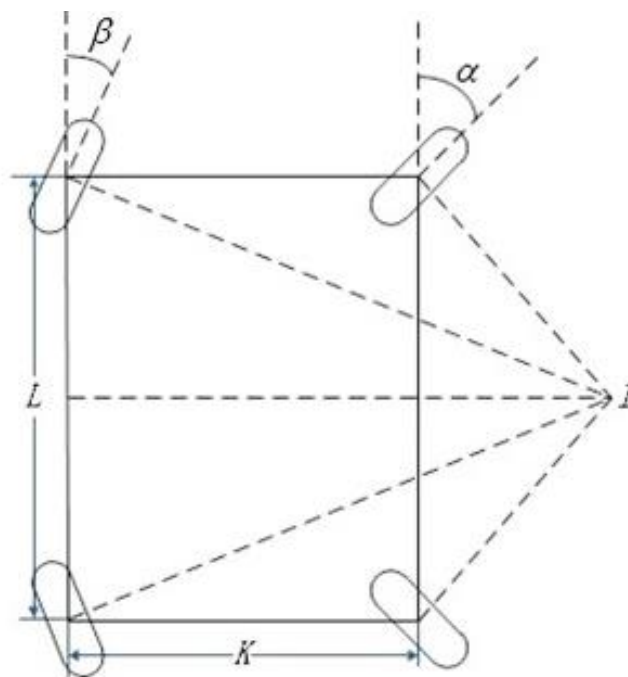
Figuur 16: Effect van vaste structuur stuurarmen en verbindingstang [18]

Een andere optie is het verstelbaar maken van de stuurarmen en verbindingstang. Deze configuratie maakt het mogelijk om proefondervindelijk variaties aan te brengen in de stuurhoeken en zo een ideale oplossing te benaderen binnen specifieke omstandigheden.

2.3.4 Vierwielsturing

Vierwielsturing wordt steeds vaker toegepast in moderne automobieltoepassingen vanwege de mogelijkheid om verschillende beperkingen van conventionele stuurmethoden te overkomen. Tot deze beperkingen behoren onder andere grote draaicirkels, beperkte stabiliteit tijdens hogesnelheidsbochten en een verminderde manoeuvreerbaarheid [19]. Bij vierwielsturing draaien de voor- en achterwielen in tegengestelde richtingen, wat resulteert in een significante reductie van de draaicirkel.

Wanneer de stuurhoeken van de achterwielen exact gelijk, maar tegengesteld zijn aan die van de voorwielen, verplaatst het rotatiepunt zich over een lijn die door het geometrisch midden van het voertuig loopt. Deze lijn is evenwijdig aan zowel de verbindingslijn van de middelpunten van de voorwielen als die van de achterwielen (figuur 17).



Figuur 17: Vierwielsturing [20]

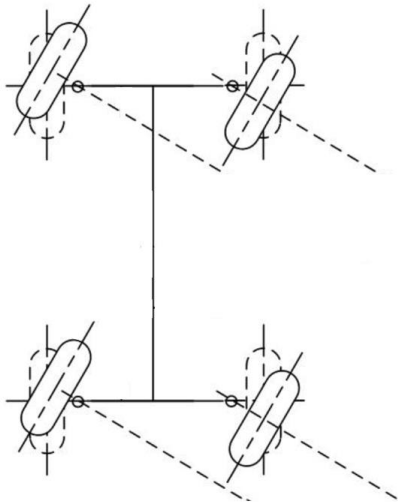
De stuurhoeken kunnen worden uitgedrukt in één enkele vergelijking die is gebaseerd op de voertuiggeometrie en de gewenste draaicirkel, zoals weergegeven in formule (3) [20].

$$\cot(\beta) = \cot(\alpha) + \frac{2 \cdot K}{L} \quad (3)$$

Bij deze sturing is het niet noodzakelijk dat de stuurhoeken van de achterwielen exact gelijk, maar tegengesteld zijn aan die van de voorwielen. In automobieltoepassingen wordt vaak gekozen om de lijn waar het rotatiepunt zich over verplaatst dicht bij de achteras te plaatsen, wat de intuïtieve besturing bevordert [21]. Er zijn echter nog tal van andere redenen waarom autobouwers voor deze configuratie kiezen, maar een gedetailleerde bespreking hiervan valt buiten het bestek van deze masterproef.

2.3.5 Hondsgangsturing

Hondsgangsturing of *crabsteering* is een stuurmethode die voortvloeit uit de vierwielsturing. Bij deze stuurmethode worden alle wielen van het voertuig onder dezelfde hoek geplaatst (figuur 18). Hierdoor kan het voertuig diagonaal rijden zonder te roteren rond zijn verticale as.



Figuur 18: Hondsganggeometrie [22]

Deze techniek wordt momenteel veel toegepast in landbouwvoertuigen (figuur 19), waar het gebruik van hondsgangsturing ervoor zorgt dat de vier wielen verschillende sporen volgen. Dit minimaliseert de vorming van diepe sporen op het veld en beperkt bodemverdichting bij natte ondergrond. In speciale gevallen wordt het gebruikt om een breder gebied te besproeien t.o.v. conventionele sproeiers [22].

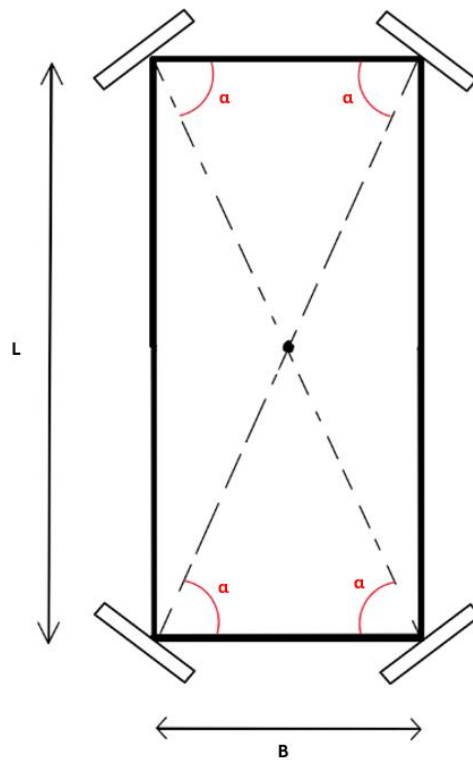


Figuur 19: Knikgestuurde tractoren [23]

In conventionele automobieltoepassingen wordt hondsgangsturing echter nog niet standaard geïntegreerd, vanwege diverse redenen die buiten het bestek van deze masterproef vallen. Bij sommige (moderne) toepassingen wordt het gebruikt om hogesnelheidsmanoeuvres zoals rijstrookwisselingen veiliger uit te voeren [24], [25]. Hondsgangsturing kan uitgevoerd worden onder verschillende stuurhoeken indien de geometrische opbouw van het voertuig dit toelaat.

2.3.6 Zero-turnsturing

Zero-turnsturing is een stuurmethode die ook voortvloeit uit de vierwielsturing. Bij deze sturing wordt elk wiel zo gepositioneerd dat het rotatiepunt in het midden van het voertuig ligt. Bij het draaien van het voertuig zal de verticale as door het midden van het voertuig niet verplaatsen maar enkel roteren, wat leidt tot een rotatie die ter plekke uitgevoerd wordt [26]. Deze stuurmethode biedt aanzienlijke voordelen in situaties met beperkte manoeuvreerruimte. Zero-turnsturing is enkel mogelijk indien de geometrie van het voertuig dit toelaat. De wielen van het voertuig nemen in deze modus gespiegelde statische hoekwaarden in (figuur 20), en kunnen niet aangepast worden door de bestuurder zoals wel mogelijk is bij andere stuurconfiguraties. De hoekwaarden kunnen beschreven worden in functie van de geometrie van het voertuig, zoals formule (4) weergeeft. Zero-turnsturing is niet altijd mogelijk in conventionele ontwerpen waardoor deze stuurmethode niet talrijk aanwezig is in conventionele automobieltoepassingen.



Figuur 20: Zero-turn stuurconfiguratie

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{L}{B}\right) \quad (4)$$

3. Herontwerp

Het herontwerp van de boottransporteur wordt in twee stappen opgesteld. Als eerste wordt een voorontwerp opgesteld dat voortvloeit uit de uitgevoerde bronnenstudie in combinatie met de inzichten en visies van ingenieurs van Werkhuizen Hengelhof die ook actief met het project bezig zijn. In deze fase wordt beperkt vrij ontwerpwerk verricht en er wordt geen vastomlijnd stappenplan gevolgd om tot het uiteindelijke design te komen.

De focus in deze masterproef ligt op het bundelen, vertalen en visualiseren van de ideeën en input van de betrokken ingenieurs. Het voorontwerp wordt ingetekend als CAD-model met solid body-componenten. De componenten zijn in deze fase nog niet ontworpen met specifieke aandacht voor hun maakbaarheid. Het CAD-model dient in deze fase voornamelijk om een visuele weergave te verkrijgen van de machine en vroegtijdig implementatieproblemen op te sporen.

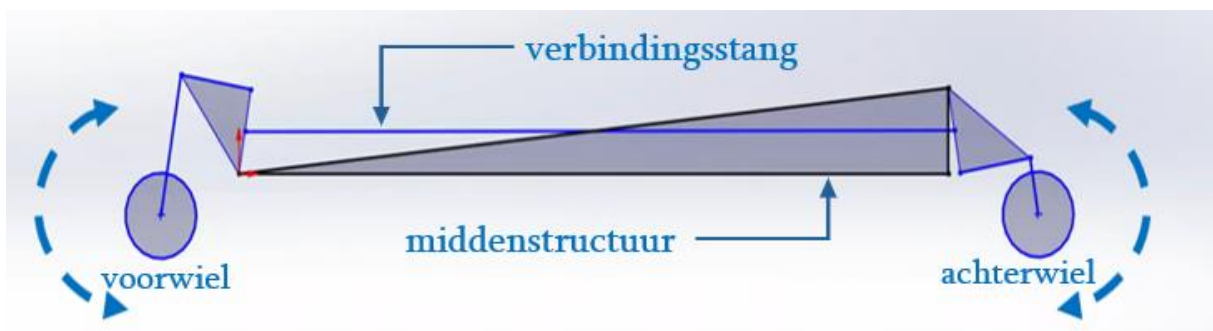
Als tweede stap wordt het voorontwerp omgezet naar een geïntegreerd herontwerp door de betrokken ingenieurs van Werkhuizen Hengelhof. In deze stap worden alle solid body-onderdelen omgezet naar maakbare onderdelen. Deze stap is cruciaal voor de verdere uitwerking van de masterproef.

3.1 Voorontwerp

Het palletmechanisme uit de bronnenstudie is omgezet naar een interactieve 2D-schets in SolidWorks (figuur 21). In deze conceptweergave zijn de wielen scharnierend bevestigd ten opzichte van een centrale middenstructuur.

De scharnierende delen zijn onderling verbonden met een verbindingstang. Dit ontwerp zorgt ervoor dat het scharnieren van één wiel automatisch het scharnieren van het andere wiel veroorzaakt en er dus maar één actuator vereist is. Door het knikken ondergaat de middenstructuur een gecontroleerde, verticale beweging. Deze verticale beweging verplaatst de middenstructuur afwisselend omhoog en omlaag, waardoor de scheepsbokken kunnen worden opgetild en neergezet.

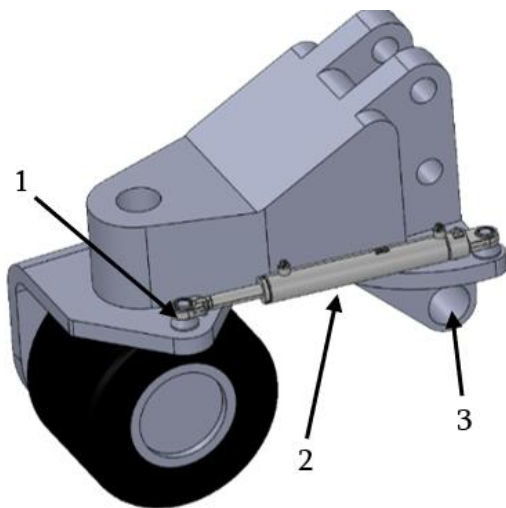
Proefondervindelijk wordt vastgesteld dat de middenstructuur een kleine rotatie ondergaat tijdens de verticale verplaatsing, waardoor het hefoppervlak onder een helling van 1% komt te staan. Deze helling is echter verwaarloosbaar klein en wordt daarom niet verder behandeld in deze masterproef, maar wordt wel meegenomen als onderwerp voor vervolgonderzoek in sectie 8.1.



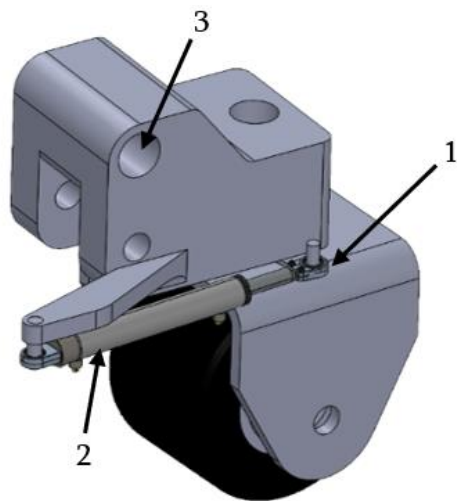
Figuur 21: Knikmechanisme voorontwerp

In de scharnierende delen van het ontwerp is het draaimechanisme geïntegreerd (figuur 22 en figuur 23). Dit stangenmechanisme bestaat uit een hefboomarm (1) en een hydraulische cilinder (2), die samen elk wiel individueel kunnen verdraaien en zo een gewenste hoekpositie laten innemen. De hefboomarm is verwerkt in de montageplaat van het wiel, wat zorgt voor een directe koppeling tussen de hydraulische cilinder en de positie van het wiel.

Het ontwerp van het draaimechanisme voor de voorwielen verschilt enigszins van dat voor de achterwielen, aangezien het scharnierpunt om te knikken (3) bij de voorwielen lager is geplaatst dan bij de achterwielen (figuur 21). De keuze voor het gebruik van hydraulische stuurcomponenten werd gemaakt door ingenieurs van Werkhuizen Hengelhoef en valt buiten het bestek van deze masterproef.

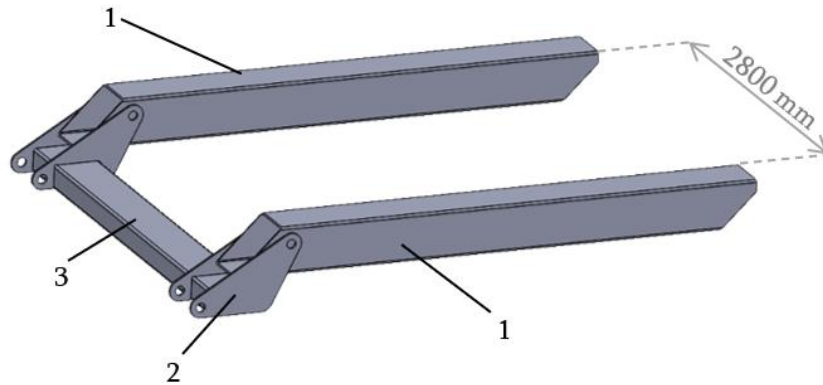


Figuur 22: Draaimechanisme voorwielen



Figuur 23: Draaimechanisme achterwielen

De middenstructuur bestaat uit twee vierkante buisprofielen (1), die 2800 mm uit elkaar zijn geplaatst. Deze afstand zorgt ervoor dat scheepsbokken met een functionele breedte van 2500 mm makkelijk tussen de profielen passen. De buisprofielen zijn onderling verbonden met een dwarsverbinding, bestaande uit plaatmateriaal (2) en een rechthoekig profiel (3) (figuur 24).

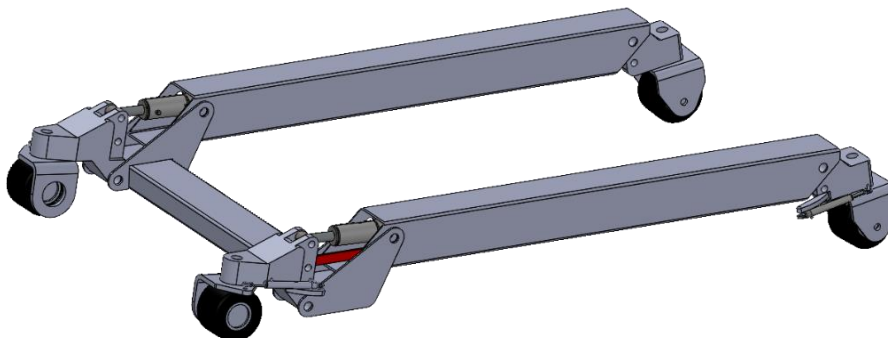


Figuur 24: Middenstructuur

Door te kiezen voor holle profielen kunnen de hydraulische leidingen, elektrische bedrading en de verbindingstangen binnenin de machine worden weggewerkt (figuur 25). Dit biedt extra bescherming tegen externe stoten en krachten en draagt bij aan een doordacht voorontwerp. De scharnierbeweging van de machine wordt aangedreven door een hydraulische cilinder per kant. Bij het samenbrengen van alle solid body-onderdelen en de hydraulische cilinders ontstaat een vervolledigd voorontwerp van de boottransporteur (figuur 26). Dit voorontwerp dient als basis voor de verdere uitwerking tot het finaal herontwerp.



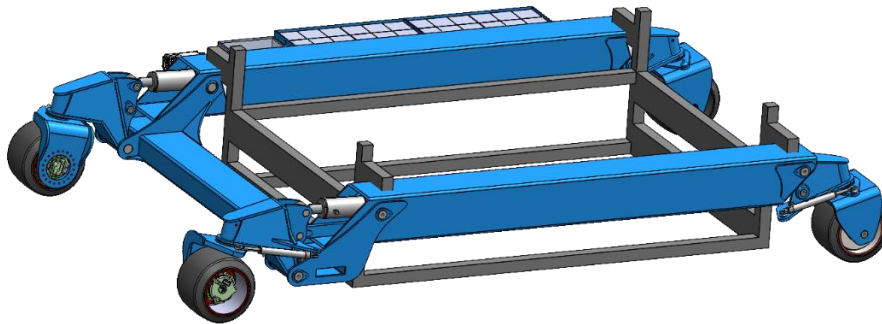
Figuur 25: Doorsnede knikmechanisme



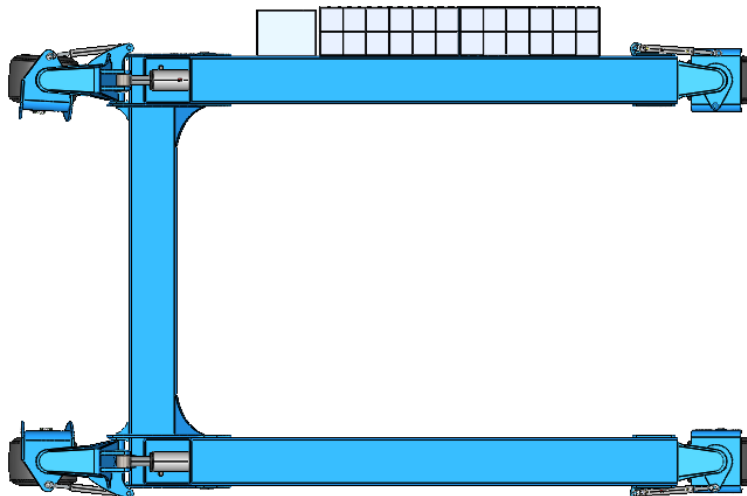
Figuur 26: Voorontwerp

3.2 Finaal herontwerp

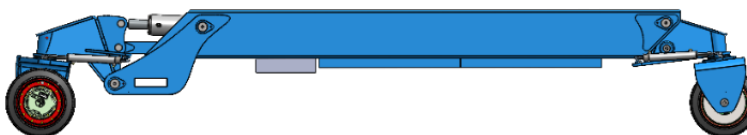
Het finaal herontwerp wordt volledig uitgewerkt door ervaren ingenieurs van Werkhuizen Hengelhoef (figuur 27). Zij beschikken over uitgebreide expertise in het produceren van maakbare onderdelen. In het finaal herontwerp zijn alle benodigde kooponderdelen geïntegreerd die in het project zullen worden gebruikt. De geometrie van het finaal herontwerp speelt een cruciale rol als uitgangspunt voor de verdere fases van de masterproef (figuur 28 en figuur 29). Enkele belangrijke kooponderdelen worden in sectie 4 besproken.



Figuur 27: Finaal herontwerp



Figuur 28: Bovenaanzicht finaal herontwerp



Figuur 29: Zijaanzicht finaal herontwerp

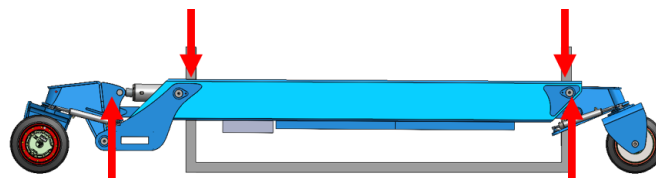
3.3 Mechanische sterkteberekeningen

Om de mechanische integriteit van het finaal herontwerp te evalueren worden op twee locaties sterkteberekeningen uitgevoerd. Hierbij wordt gekeken naar de optredende krachten in deze locaties en de bijhorende spanningen die deze krachten teweeg brengen in het materiaal. Deze spanningen worden vergeleken met de maximaal toelaatbare spanningen van het materiaal. De belasting die wordt geanalyseerd, is gebaseerd op een maximaal gewicht van 40000 kg, wat overeenkomt met het maximale gewicht van een boot inclusief scheepsbok dat de boottransporteur mag optillen.

De volledige uitwerking van de sterkteberekeningen op de twee locaties is opgenomen in de bijlagen (bijlage A en bijlage B). Deze berekeningen en vergelijkingen moeten aantonen dat de dimensionering van de onderdelen correct en veilig zijn. Als eerste wordt a.d.h.v. een vereenvoudiging de optredende spanning berekend in de twee vierkante buisprofielen van de middenstructuur (figuur 30). Als tweede kritische locatie wordt een scharnieras onder de loop genomen (figuur 31). De belasting op de scharnieras wordt vereenvoudigd naar een tweesnedige afschuiving.

Uit de berekeningen blijkt dat in de zwaarst belaste doorsnede van het vierkante buisprofiel de optredende samengestelde spanning gelijk is aan $28,62 \text{ N/mm}^2$. De maximaal toelaatbare spanning voor het gebruikte materiaal bedraagt $165,67 \text{ N/mm}^2$. De berekende spanning is hiermee ongeveer vijfmaal kleiner dan de maximaal toelaatbare spanning, waaruit geconcludeerd kan worden dat de vierkante buisprofielen veilig zijn gedimensioneerd.

Voor de scharnieras, die onderhevig is aan een tweesnedige afschuiving, werd een optredende schuifspanning berekend van $9,95 \text{ N/mm}^2$. De maximaal toelaatbare schuifspanning bedraagt 154 N/mm^2 , wat betekent dat de optredende spanning ongeveer vijftienmaal kleiner is dan de toelaatbare waarde. Ook hieruit kan geconcludeerd worden dat de scharnierassen voldoende veilig zijn gedimensioneerd. De ruime veiligheidsmarge kan verklaard worden door de noodzaak om overbelasting tijdens uitzonderlijke belastingsmomenten te kunnen opvangen.



Figuur 30: Belasting op vierkant buisprofiel



Figuur 31: Scharnierassen

4. Intern componentenonderzoek

In deze sectie worden enkele onderdelen onder de loep genomen die gebruikt worden voor de boottransporteur. Deze onderdelen worden uitgekozen door ingenieurs van Werkhuizen Hengelhoeve die ook actief met het project bezig zijn. Het is belangrijk dat de werking en aanstuuringsmogelijkheden van deze onderdelen in kaart gebracht worden. Het doel is om belangrijke informatie over deze onderdelen gestructureerd op te nemen in het projectdossier. Deze informatie biedt ook een fundament voor sectie 7.1 en sectie 7.2 van de masterproef.

4.1 Elektrische motordrive & motor

De vernieuwde aandrijving van de hydraulische groep van de boottransporteur bestaat uit een permanentmagneet synchrone AC-motor (PMAC), specifiek het type NX86-WMS-BA06-G00-1 van Parker (figuur 32), en een bijhorende motorcontroller van het type GVI-D048-0550S1-S00-G0000 van Parker (figuur 33). De motor heeft een nominaal vermogen van 23,2 kW en een hoog nominaal koppel van 44 Nm [27].



Figuur 32: PMAC-motor [27]



Figuur 33: GVI [27]

De motor wordt aangestuurd door een *low voltage global vehicle inverter* (GVI) van Parker. Deze omvormerserie is softwarematig configureerbaar en uiterst geschikt voor de elektrificatie van mobiele hydraulische toepassingen op laagspanning [27]. De omvormers worden bij ingebruikname reeds gepreconfigureerd, maar kunnen indien nodig worden aangepast aan de wensen van de gebruiker via een pc-verbinding en de Parker GVI Configuration Tool.

Voor de bediening van de motorcontroller tijdens bedrijf kan gekozen worden uit drie besturingsopties: het CANopen PDO-protocol, het J1939-protocol of directe I/O-besturing [28]. Dankzij de IP65-beschermingsklasse kunnen de omvormers rechtstreeks op het chassis van het voertuig worden gemonteerd zonder extra behuizing [29].

4.2 Hydraulische wielmotor

De boottransporteur verplaatst zich door middel van twee hydraulische wielmotoren. Specifiek wordt het type 706C3KAA079K044 van de 700CK serie, geproduceerd door de Italiaanse fabrikant Bonfiglioli gebruikt (figuur 34). Deze motoren zijn elk gemonteerd in een van de achterwielen van de machine (figuur 27).



Figuur 34: 700CK serie wielmotoren [30]

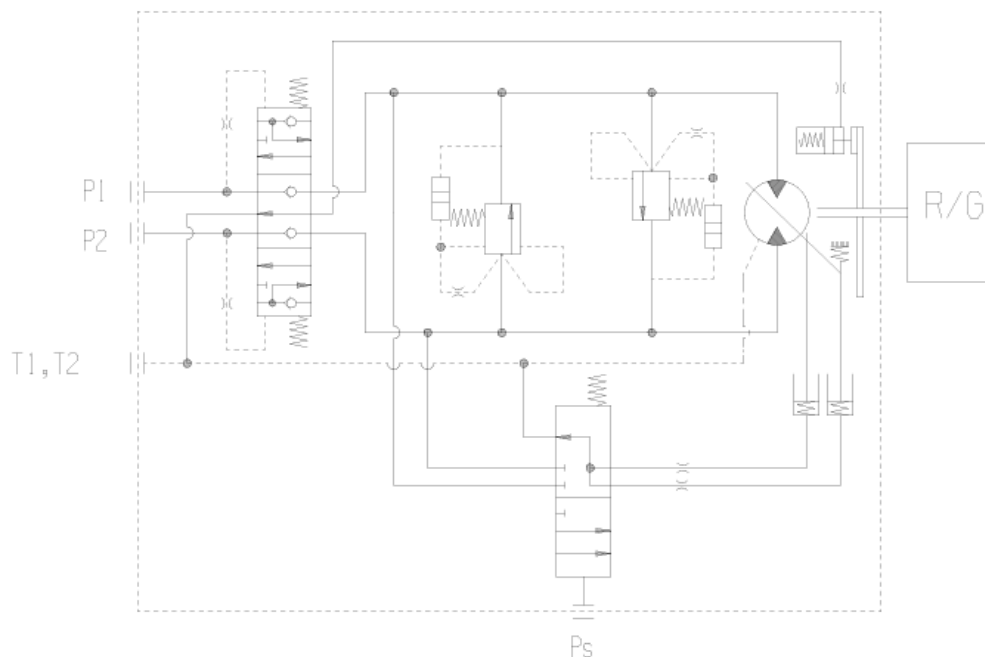
De keuze voor hydraulische wielmotoren is gebaseerd op hun eigenschappen. Deze motoren kunnen een hoog koppel leveren bij lage snelheden, wat ideaal is voor deze specifieke toepassing. Het type motor werd geselecteerd door ingenieurs van Werkhuizen Hengelhof, die actief betrokken zijn bij het project. De keuze werd voorafgegaan door indicatieve berekeningen die buiten het bestek van deze masterproef vallen.

De wielmotoren beschikken over twee afzonderlijke versnellingen, waarmee de snelheid van de boottransporteur kan worden aangepast. Deze versnellingen worden in- en uitgeschakeld door middel van één geïntegreerd monostabiel ventiel per motor (figuur 35). Hierdoor kan zowel een snellere als een tragere rotatiesnelheid gekozen worden.

De motoren zijn hydraulisch parallel aangesloten, hierdoor worden de motoren gelijk gevoed. De motoren kunnen individueel van rotatierichting veranderen dankzij geïntegreerde 6/3 ventielen met veerterugstelling naar de middenstand (figuur 35). Deze ventielen maken de zogenaamde zero-turn stuurgeometrie mogelijk, waarbij de wielen tegengesteld roteren om ter plaatse te kunnen draaien.

Een extra monostabiel ventiel, toegevoegd aan de parallele verbinding tussen de motoren, fungeert als een hydraulisch differentieel. Dit ventiel biedt een bijkomend voordeel in situaties waarin een van de aangedreven wielen grip verliest op de ondergrond.

Een essentieel onderdeel van de wielmotor is de parkeerrem. Uit de datasheet van de motor blijkt dat de parkeerrem automatisch wordt geactiveerd wanneer de 6/3 ventielen, die de rotatierichting van de motor regelen, zich in de middenstand bevinden (figuur 35). Bij het aansturen van deze ventielen naar een andere positie wordt de parkeerrem automatisch ontkoppeld. Dit mechanisme is van belang voor het opstellen van de stuurlogica, zoals verder toegelicht in sectie 7.2. De datasheet van de specifieke wielmotor is opgenomen in bijlagen (bijlage C).



Figuur 35: Hydraulisch schema wielmotor [31]

4.3 Proportionele stuurventielen

Om de stuurcilinders in en uit te bewegen wordt gebruik gemaakt van proportionele stuurventielen. Specifiek is gekozen voor de BLS6 *Proportional Stackable Valve Assembly with Load Sensing*, geproduceerd door Duplumatic (figuur 36). Dit hydraulisch ventielensysteem kan worden opgebouwd uit maximaal acht modulaire secties en wordt gebruikt in machines en werktuigen om de stroom van hydraulische vloeistof proportioneel of binair te regelen [32].



Figuur 36: BLS6 [32]

Elke sectie van de BLS6 is uitgerust met een compensator aan de ingang, waardoor het uitgaande debiet constant blijft ongeacht variaties in de belasting. De bijhorende ventielen uit de BLS6-serie kunnen het debiet proportioneel regelen, wat resulteert in een nauwkeurigere positionering van de stuurstuurbcilinders. De proportionele ventielen dienen te worden aangestuurd met stuurstromen tussen 4 en 20 mA [32]. Dit kan gerealiseerd worden met pulsbreedtemodulatie (PBM of PWM).

4.4 Teleradio ontvangermodule

Om een draadloze besturing van de boottransporteur te realiseren, moet een ontvangermodule op het chassis van de machine worden geïnstalleerd. Een betrouwbare draadloze verbinding is essentieel voor een goed functionerend eindresultaat. Omdat industriële telecommunicatie complex en technisch uitdagend is en diepgaande kennis vereist voor een correcte implementatie, is het externe bedrijf Teleradio ingeschakeld voor dit deel van het project. Teleradio, met uitgebreide ervaring in soortgelijke projecten, heeft de opdracht gekregen om de volledige communicatiehardware en -software te ontwikkelen.

Om de ingangssignalen van de afstandsbediening om te zetten naar stuursignalen voor de verschillende stuurcomponenten, wordt er gebruikgemaakt van een programmeerbare ontvangermodule van Teleradio. Specifiek is gekozen voor het type R20-RS01 / 100-001-933-27 (figuur 37). Deze ontvanger werkt op een voedingsspanning van 12-24 VDC en beschikt over 26 I/O-poorten voor het verzenden en ontvangen van stuursignalen. Bovendien ondersteunt het toestel de ontvangst en verzending van stuursignalen via de communicatieprotocollen CANopen, J1939 en Modbus/RTU [33].



Figuur 37: Teleradio ontvangermodule [33]

5. Wiskundige uitwerking stuurconfiguraties

In sectie 2.3 zijn geavanceerde geometrische stuurconfiguraties onderzocht. Er worden vier verschillende stuurconfiguraties gekozen door ingenieurs van Werkhuizen Hengelhoef voor implementatie: de ideale voorwielsturing, de vierwielsturing, de hondsgangsturing en de zero-turnsturing. Deze stuurconfiguraties bieden de grootste mobiliteitsvoordelen voor deze specifieke toepassing.

Om deze sturingen te realiseren, wordt er bepaald welke parameters dienen als inputparameters. Deze inputparameters zullen door de operator via de afstandsbediening van een waarde worden voorzien en kunnen naar wens worden aangepast. Afhankelijk van de gekozen parameters en de wiskundige relaties tussen de parameters, worden de overige stuurparameters automatisch berekend. De stuurparameters bepalen de outputsignalen die worden uitgestuurd naar de stuurcomponenten.

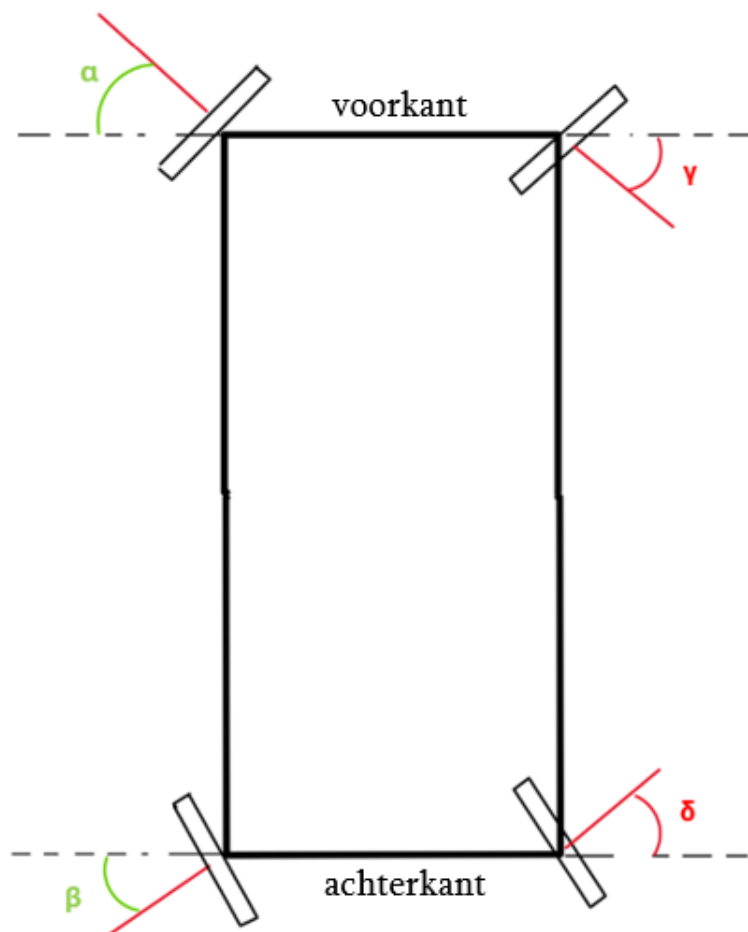
Daarbuiten worden er twee wiskundige vergelijkingen opgesteld. Als eerste wordt de relatie tussen de stuurhoek en de stuurcilinder wiskundig uitgeschreven. Ten tweede wordt de onderlinge relatie tussen de vier stuurhoeken wiskundig uitgeschreven.

5.1 Selectie inputparameters

Om de wiskundige relaties van de sturing eenduidig te formuleren, wordt onderscheid gemaakt tussen stuurhoeken die direct worden aangestuurd door de operator en stuurhoeken die daaruit automatisch worden berekend. De stuurhoeken die direct gekozen worden door de operator worden gedefinieerd als inputparameters.

Door de inputparameters zorgvuldig te selecteren, kunnen de eerste drie stuurconfiguraties worden samengevoegd tot één gecombineerde sturing. Voor de zero-turnsturing wordt een extra knop op de afstandsbediening voorzien, waarmee deze specifieke modus geactiveerd kan worden.

De linker stuurhoeken α en β worden gekozen als inputparameters van het systeem ook wel de masterhoeken genoemd. Dit betekent dat de rechter stuurhoeken γ en δ m.b.v. wiskundige relaties automatisch berekend worden en daarom ook de slavehoeken genoemd worden (figuur 38).



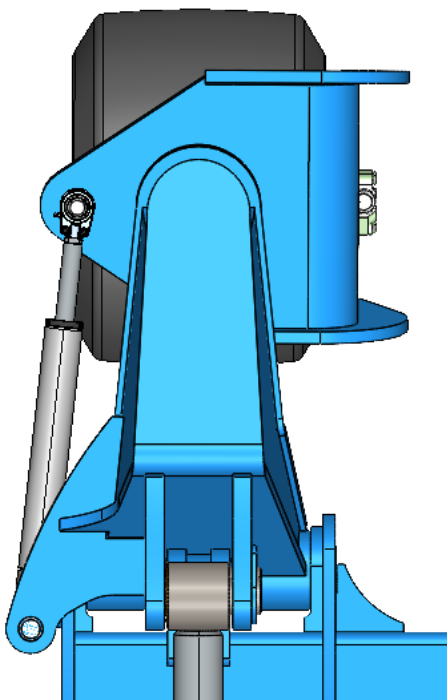
Figuur 38: Stuurhoeken

5.2 Lijnmodel

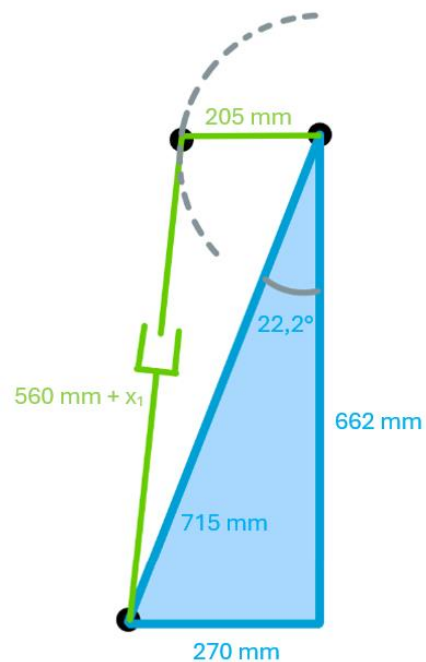
Om de relatie tussen stuurhoek en stuurcilinder wiskundig uit te schrijven worden alle functionele maten van het stuurmechanisme van één wiel opgemeten uit het finale herontwerp in Solidworks (figuur 39). Op basis van deze gegevens wordt een vereenvoudigd tweedimensionaal lijnmodel opgesteld (figuur 40).

Het vereenvoudigd lijnmodel visualiseert de hefboom, de stuurcilinder en de vaste structuur van het chassis waaraan de stuurcilinder bevestigd is en hun functionele maten. De streepjeslijn visualiseert de rotatieboog van de hefboom en dus ook de rotatieboog van het linker voorwiel.

De totale lengte van de stuurcilinder kan beschreven worden als de som van de lengte van de behuizing die gelijk is aan 560 mm en de variabele slaglengte die tussen 0 mm en 300 mm ligt. De slaglengte krijgt daarom de onbekende x_1 toegekend.



Figuur 39: Stuurmechanisme linker voorwiel

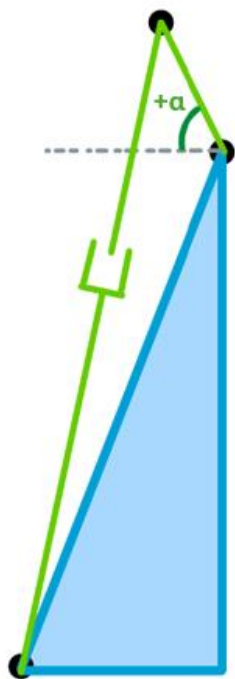


Figuur 40: Lijnmodel stuurmechanisme

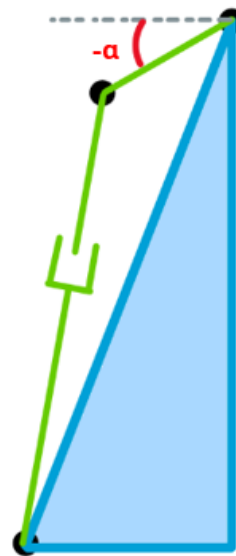
Wanneer het wiel recht vooruit is gepositioneerd, neemt de hefboom de nulpositie in (figuur 40). In deze positie is de stuurhoek gelijk aan nul. Voor de verdere uitwerking is het belangrijk vast te leggen in welke richting er sprake is van een positieve toename en in welke richting er sprake is van een negatieve toename van de stuurhoek.

Er wordt gekozen dat de stuurhoek een positieve waarde toegewezen krijgt wanneer de stuurcilinder wordt uitgestuurd en zijn maximale lengte bereikt (figuur 41). Omgekeerd krijgt de stuurhoek een negatieve waarde wanneer de stuurcilinder wordt ingetrokken en zijn minimale lengte bereikt (figuur 42). Deze conventie geldt voor alle vier de wielen, onafhankelijk van hun ruimtelijke positie en oriëntatie.

Het bereik van de stuurhoek wordt begrensd door de uiterste posities van de slag van de stuurcilinder en varieert van -30° tot $+50^\circ$. Dit is een belangrijk uitgangspunt voor de simulatie in sectie 6.



Figuur 41: Maximale lengte stuurcilinder



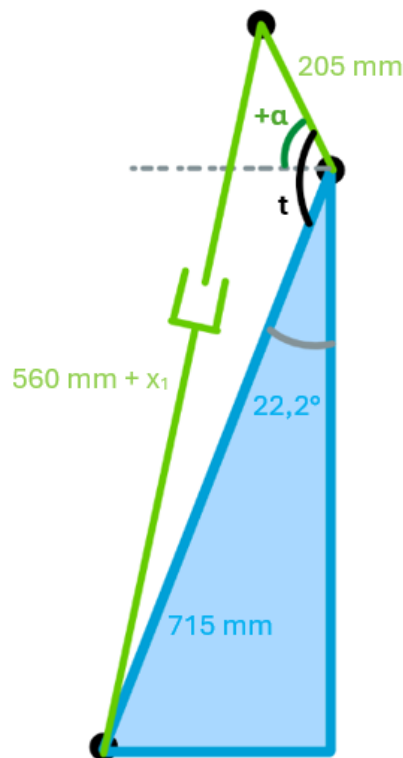
Figuur 42: Minimale lengte stuurcilinder

5.3 Wiskundige relatie tussen stuercilinder en stuurhoek

Omdat de stuurhoek een inputparameter is en wordt meegegeven door de operator, wordt de slaglengte in functie van de stuurhoek uitgedrukt. M.b.v. de cosinusregel en de functionele maten van het stuurmechanisme wordt de wiskundige functie opgesteld. Er wordt nog een extra parameter t ingevoegd. Deze parameter geeft de variabele hoek weer van de hefboom t.o.v. de vaste structuur van het chassis (figuur 43). Parameter t kan geformuleerd worden in functie van stuurhoek α .

$$t = \alpha + (90^\circ - 22,2^\circ) \quad (5)$$

$$t = \alpha + 67,8^\circ \quad (6)$$



Figuur 43: Invoeging hulpparameter t

In de driehoek gevormd door de stuercilinder, de hefboom en de vaste structuur van het chassis, wordt de cosinusregel toegepast.

$$(560 + x_1)^2 = 715^2 + 205^2 - 2 \cdot 715 \cdot 205 \cdot \cos(t) \quad (7)$$

Parameter t , zoals uitgedrukt in formule (6), wordt ingevuld in formule (7).

$$(560 + x_1)^2 = 715^2 + 205^2 - 2 \cdot 715 \cdot 205 \cdot \cos(\alpha + 67,8^\circ) \quad (8)$$

Om de slaglengte van de stuercilinder in functie van de stuurhoek te bekomen wordt x_1 afgezonderd uit formule (8).

$$x_1 = \sqrt{715^2 + 205^2 - 2 \cdot 715 \cdot 205 \cdot \cos(\alpha + 67,8^\circ)} - 560 \quad (9)$$

Voor elk wiel wordt formule (8) aangepast aan de specifieke slaglengte en stuurhoek die bij dat wiel horen.

$$x_2 = \sqrt{715^2 + 205^2 - 2 \cdot 715 \cdot 205 \cdot \cos(\beta + 67,8^\circ)} - 560 \quad (10)$$

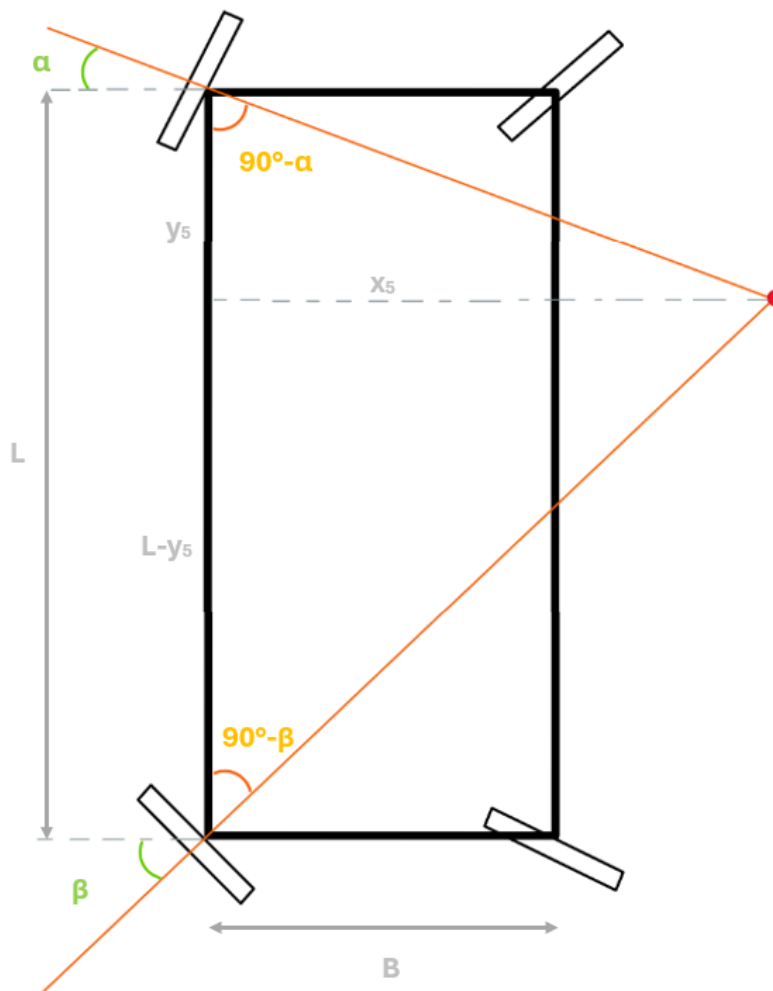
$$x_3 = \sqrt{715^2 + 205^2 - 2 \cdot 715 \cdot 205 \cdot \cos(\gamma + 67,8^\circ)} - 560 \quad (11)$$

$$x_4 = \sqrt{715^2 + 205^2 - 2 \cdot 715 \cdot 205 \cdot \cos(\delta + 67,8^\circ)} - 560 \quad (12)$$

5.4 Stuurhoekenrelatie

De onderlinge relatie tussen de stuurhoeken wordt in twee stappen uitgewerkt. In de eerste stap wordt het rotatiepunt beschreven dat ontstaat door de verlengingen van de hefbomen van de masterhoeken. Hierbij worden parameters gebruikt die de geometrie van de boottransporteur karakteriseren, zoals: B voor de spoorbreedte, L voor de wielbasis, y_5 voor de afstand van het rotatiepunt tot de voorwielen langs de lengteas van het voertuig en x_5 voor de afstand van het rotatiepunt tot de masterwielen langs de breedteas van het voertuig (figuur 44).

Deze parametrische benadering vergemakkelijkt latere aanpassingen aan de stuurconfiguratie, mocht de geometrie van de boottransporteur wijzigen. Op deze manier blijft de parametrische benadering ook toepasbaar voor toekomstige ontwerpen met andere afmetingen.



Figuur 44: Rotatiepuntbepaling

Op basis van driehoeksmetkunde kan onderstaande stelsel opgesteld worden. Dit stelsel is afgeleid uit twee rechthoekige driehoeken, gevormd door het snijpunt van de verlengingen van de hefboomen, de posities van de masterwielen en een horizontale lijn door dit snijpunt (figuur 44). De driehoeken delen de gemeenschappelijke horizontale zijde x_5 .

$$\begin{cases} \tan(90^\circ - \alpha) = \frac{x_5}{y_5} \\ \tan(90^\circ - \beta) = \frac{x_5}{(L - y_5)} \end{cases} \quad (13)$$

y_5 en x_5 worden afgezonderd in het stelsel.

$$\begin{cases} y_5 = \frac{x_5}{\tan(90^\circ - \alpha)} \\ x_5 = (L - y_5) \cdot \tan(90^\circ - \beta) \end{cases} \quad (14)$$

Nu wordt de eerste vergelijking van stelsel (14) ingevuld in de tweede vergelijking. Daarna wordt de distributieve eigenschap toegepast om x_5 af te zonderen.

$$x_5 = \left(L - \frac{x_5}{\tan(90^\circ - \alpha)}\right) \cdot \tan(90^\circ - \beta) \quad (15)$$

$$x_5 = \frac{L \cdot \tan(90^\circ - \beta)}{\left(1 + \frac{\tan(90^\circ - \beta)}{\tan(90^\circ - \alpha)}\right)} \quad (16)$$

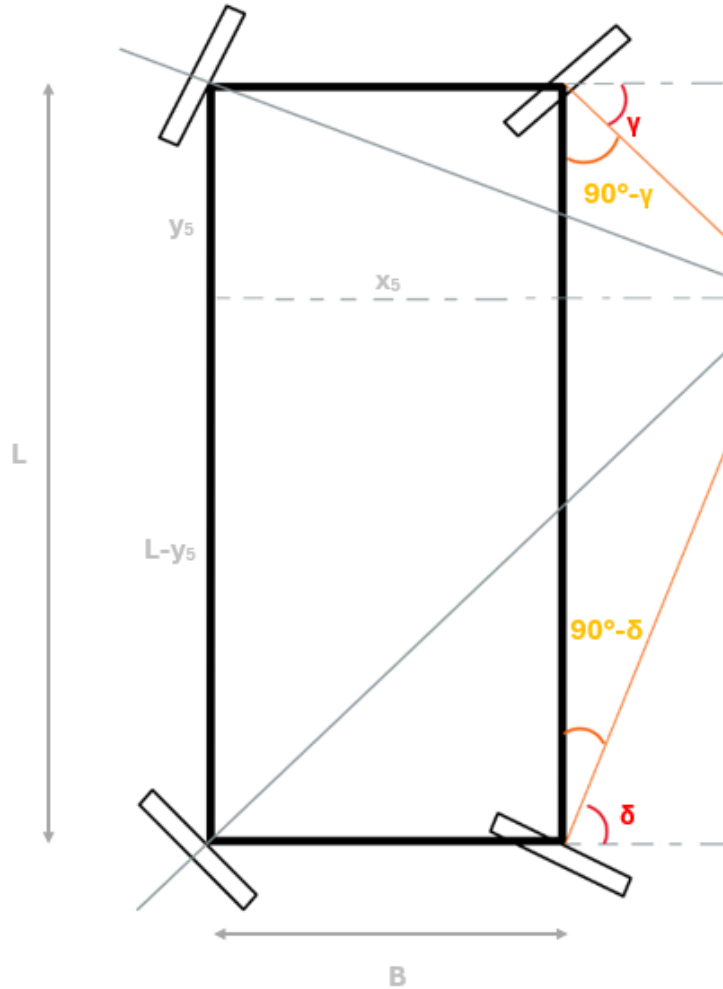
Het stelsel wordt m.b.v. verwante hoeken herschreven naar zijn finale vorm.

$$\begin{cases} y_5 = \frac{x_5}{\tan(90^\circ - \alpha)} \\ x_5 = \frac{L \cdot \tan(90^\circ - \beta)}{\left(1 + \frac{\tan(90^\circ - \beta)}{\tan(90^\circ - \alpha)}\right)} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} y_5 = \frac{L}{(\tan(\alpha) + \tan(\beta)) \cdot \tan(90^\circ - \alpha)} \\ x_5 = \frac{L}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} y_5 = \frac{L \cdot \tan(\alpha)}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} \\ x_5 = \frac{L}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} \end{cases} \quad (19)$$

In de tweede stap worden de slavehoeken beschreven met behulp van dezelfde parameters die gebruikt worden om de geometrie van de boottransporteur te karakteriseren. Deze slavehoeken worden gevormd door de verlengingen van hun respectievelijke hefbomen door hetzelfde rotatiepunt te laten gaan (figuur 45).



Figuur 45: Slavehoekenbepaling

Op dezelfde manier als bij de masterhoeken kan onderstaande stelsel worden opgesteld. Dit stelsel is afgeleid uit twee rechthoekige driehoeken, gevormd door het snijpunt van de verlengingen van de hefbomen, de posities van de slavewielen en een horizontale lijn door dit snijpunt. De driehoeken delen de gemeenschappelijke horizontale zijde $x_5 - B$.

$$\begin{cases} \tan(90^\circ - \gamma) = \frac{x_5 - B}{y_5} \\ \tan(90^\circ - \delta) = \frac{x_5 - B}{(L - y_5)} \end{cases} \quad (20)$$

Beide vergelijkingen van stelsel (20) herschrijven met behulp van verwante hoeken geeft:

$$\begin{cases} \frac{1}{\tan(\gamma)} = \frac{x_5 - B}{y_5} \\ \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{x_5 - B}{(L - y_5)} \end{cases} \quad (21)$$

Uit beide vergelijkingen van stelsel (21) worden de slavehoeken afgezonderd.

$$\begin{cases} \tan(\gamma) = \frac{y_5}{x_5 - B} \\ \tan(\delta) = \frac{(L - y_5)}{x_5 - B} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \gamma = \tan^{-1}\left(\frac{y_5}{x_5 - B}\right) \\ \delta = \tan^{-1}\left(\frac{(L - y_5)}{x_5 - B}\right) \end{cases} \quad (23)$$

Stelsel (19) en stelsel (23) bevatten alle formules om de ideale voorwielsturing, de vierwielsturing en de hondsgangsturing te implementeren. Deze formules zijn echter niet van toepassing op de zero-turnstuurconfiguratie. In dit geval worden alle stuurhoeken bepaald volgens formule (4) uit de bronnenstudie. De stuurhoeken nemen hierbij een vaste, statische waarde aan die bepaald wordt door de geometrische parameters van de boottransporteur. Deze waarde kan niet aangepast worden door de operator.

$$\alpha = \beta = \gamma = \delta = \tan^{-1}\left(\frac{L}{B}\right) \quad (24)$$

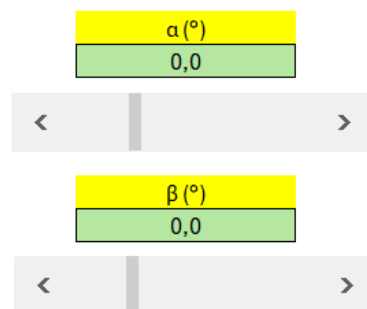
6. Simulatie sturing boottransporteur

Om de wiskundige relaties uit sectie 5 te visualiseren en te valideren, wordt een Excel simulatie opgesteld. Microsoft Excel wordt gebruikt omdat de software breed bekend en vertrouwd is binnen Werkenhuizen Hengelhoef.

Bovendien biedt Excel een laagdrempelige en gebruiksvriendelijke omgeving waarin op interactieve wijze met de simulatie kan worden gewerkt. Daarnaast kunnen wijzigingen eenvoudig worden doorgevoerd, wat de toegankelijkheid van zowel de simulatie als de achterliggende wiskundige formules bevordert.

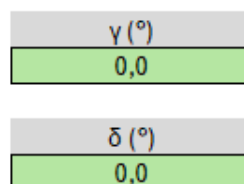
6.1 Programmatie stuurhoekparameters

Als eerste stap van de simulatie worden twee cellen toegewezen als inputcellen voor stuurhoek α en stuurhoek β . Om de simulatie intuïtief te maken worden, via het tabblad ontwikkelaars in Excel, de inputcellen gekoppeld aan twee schuifbalken (figuur 46). Deze schuifbalken krijgen het bereik van -30° tot $+50^\circ$ van de stuurhoeken toegewezen.



Figuur 46: Inputschuifbalken

A.d.h.v. deze inputparameters en stelsel (19), beschreven in sectie 5.4, worden de hulpparameters x_s en y_s berekend. Deze parameters worden gebruikt om het rotatiepunt zichtbaar te maken en om de slavehoeken te berekenen. Stelsel (23) beschreven in sectie 5.4, wordt gebruikt om γ en δ te berekenen en toe te wijzen aan twee nieuwe cellen (figuur 47).



Figuur 47: Slavehoek-waardetoekenning

De vier cellen die de stuurhoeken weergeven worden individueel geconditioneerd met voorwaardelijke opmaak in Excel. De cellen krijgen een groene achtergrond toegewezen indien de waarde van de corresponderende stuurhoek binnen het opgelegde bereik van -30° tot $+50^\circ$ ligt. De cellen krijgen een rode achtergrond indien hier niet aan voldaan wordt. Dit maakt onmogelijke stuurposities sneller zichtbaar.

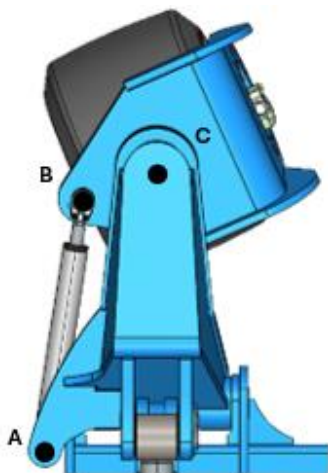
$\alpha (^\circ)$	$\gamma (^\circ)$
39,2	-67,3
$\beta (^\circ)$	$\delta (^\circ)$
20,3	-47,3

Figuur 48: Limietoverschrijdende stuurpositie

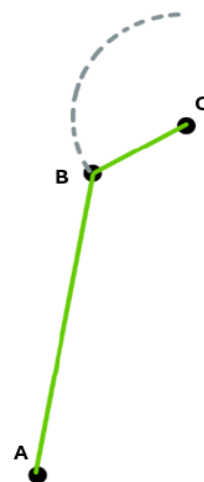
A.d.h.v. de vier stuurhoeken en de vergelijkingen (9), (10), (11), (12) worden de corresponderende slaglengtes van de stuurcilinders bepaald.

6.2 Grafische weergave

De grafische weergave van de simulatie wordt opgebouwd aan de hand van een grafiek waarin de stuurcilinders en hefbomen van de vier wielen worden weergegeven door vereenvoudigde lijnmodellen. Deze vereenvoudiging van de stuurmechanismen (figuur 49) stemt overeen met de benadering uit sectie 5.2. In deze versie worden de stuurcilinders echter vervangen door lijnstukken met variabele lengtes, terwijl de vaste structuur van het chassis niet wordt weergegeven (figuur 50).

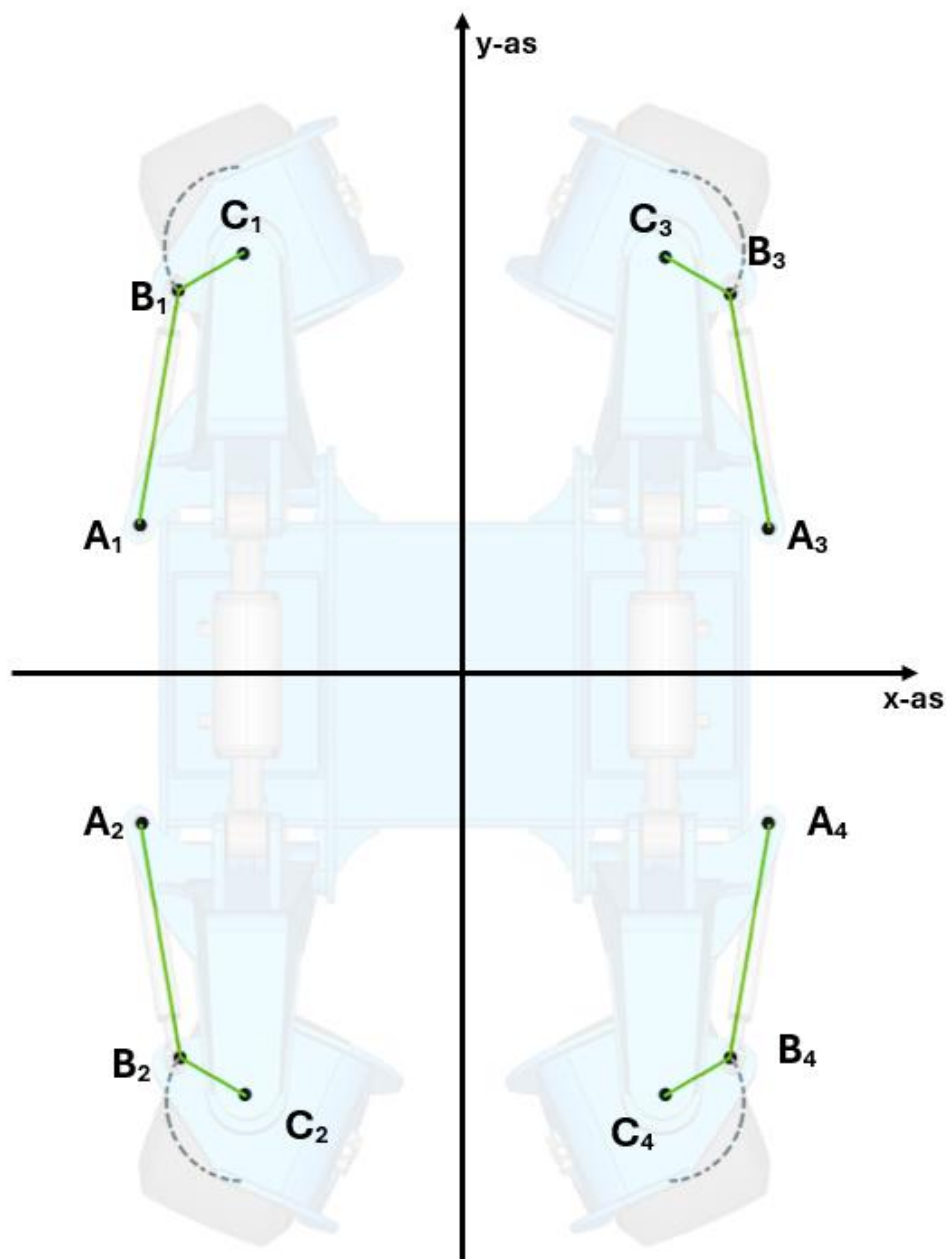


Figuur 49: Stuurmechanisme



Figuur 50: Vereenvoudigd lijnmodel

Elk stuurmechanisme van de afzonderlijke wielen bevat twee stilstaande uiteinden van de stuurcomponenten, aangeduid door de punten A_1 , C_1 , A_2 , C_2 , A_3 , C_3 , A_4 en C_4 in figuur 51. Deze punten worden statisch geplot op de grafiek op basis van hun cartesische coördinaten, waarbij het middelpunt van de boottransporteur als oorsprong is gekozen. De coördinaten van deze punten zijn afhankelijk van parameters B en L , alsook de functionele afmetingen van de stuurmechanismen, zoals opgemeten in sectie 5.2.



Figuur 51: Schematische verduidelijking van lijnmodel

De vergelijkingen voor de coördinaten van de punten A_1 , C_1 , A_2 , C_2 , A_3 , C_3 , A_4 en C_4 , uitgedrukt in millimeters (mm), worden stelselmatig gegroepeerd en beschreven als volgt:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{1x} = -\frac{B}{2} - 270 \\ A_{1y} = \frac{L}{2} - 662 \\ C_{1x} = -\frac{B}{2} \\ C_{1y} = \frac{L}{2} \end{array} \right. \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{2x} = -\frac{B}{2} - 270 \\ A_{2y} = -\frac{L}{2} + 662 \\ C_{2x} = -\frac{B}{2} \\ C_{2y} = -\frac{L}{2} \end{array} \right. \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{3x} = \frac{B}{2} + 270 \\ A_{3y} = \frac{L}{2} - 662 \\ C_{3x} = \frac{B}{2} \\ C_{3y} = \frac{L}{2} \end{array} \right. \quad (27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{4x} = \frac{B}{2} + 270 \\ A_{4y} = -\frac{L}{2} + 662 \\ C_{4x} = \frac{B}{2} \\ C_{4y} = -\frac{L}{2} \end{array} \right. \quad (28)$$

De punten B₁, B₂, B₃, B₄ hebben geen vaste cartesische coördinaten, maar kunnen zich verplaatsen langs de draaicirkels van de hefbomen. Om deze punten te plotten, worden kinematische transformaties uitgevoerd, vertrekkend van de coördinaten van punten C₁, C₂, C₃, C₄. Met behulp van de corresponderende stuurhoek van elk wiel en de lengte van de hefboom worden de cartesische posities van de punten B₁, B₂, B₃, B₄ uitgedrukt in functie van hun stuurhoek. De vergelijkingen worden stelselmatig beschreven als volgt:

$$\begin{cases} B_{1x} = C_{1x} - 205 \cdot \cos(\alpha) \\ B_{1y} = C_{1y} + 205 \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} B_{2x} = C_{2x} - 205 \cdot \cos(\beta) \\ B_{2y} = C_{2y} - 205 \cdot \sin(\beta) \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} B_{3x} = C_{3x} + 205 \cdot \cos(\gamma) \\ B_{3y} = C_{3y} + 205 \cdot \sin(\gamma) \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} B_{4x} = C_{4x} + 205 \cdot \cos(\delta) \\ B_{4y} = C_{4y} + 205 \cdot \sin(\delta) \end{cases} \quad (32)$$

De x- en y-coördinaten van C₁, C₂, C₃ en C₄ worden a.d.h.v. stelsels (25), (26), (27), (28) ingevuld. Verder worden er concrete waarden toegekend aan B, spoorbreedte, en L, de wielbasis. Deze parameters worden respectievelijk 3181 mm en 5714 mm. De lengtes werden opgemeten in het CAD-model van het finaal herontwerp uit sectie 3.2.

$$\begin{cases} B_{1x} = -1590,5 - 205 \cdot \cos(\alpha) \\ B_{1y} = 2857 + 205 \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} B_{2x} = -1590,5 - 205 \cdot \cos(\beta) \\ B_{2y} = -2857 - 205 \cdot \sin(\beta) \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} B_{3x} = 1590,5 + 205 \cdot \cos(\gamma) \\ B_{3y} = 2857 + 205 \cdot \sin(\gamma) \end{cases} \quad (35)$$

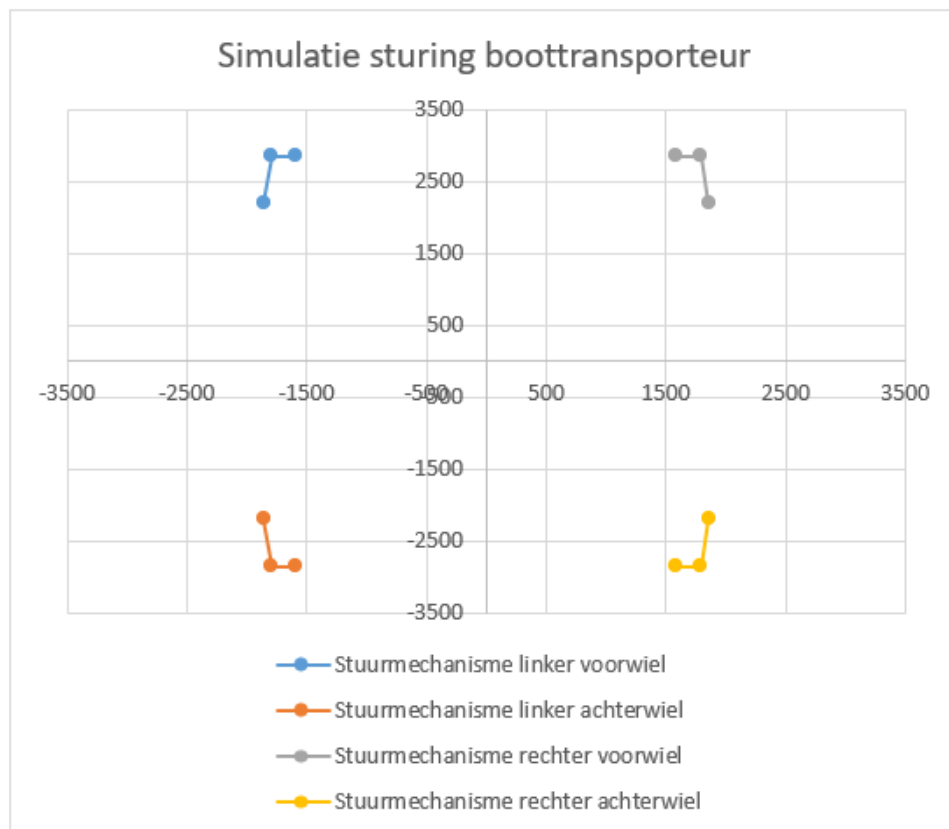
$$\begin{cases} B_{4x} = 1590,5 + 205 \cdot \cos(\delta) \\ B_{4y} = -2857 + 205 \cdot \sin(\delta) \end{cases} \quad (36)$$

De stuurhoeken worden gekoppeld aan hun corresponderende cellen in Excel. Hierdoor berekent Excel automatisch alle coördinaten.

Om een grafische plot te verkrijgen, worden de coördinaten van de punten per stuurmechanisme gestructureerd vastgelegd in tabel 2. De x- en y-coördinaten worden in afzonderlijke kolommen geplaatst, waarbij de blauwe cellen aangeven dat deze waarden kunnen veranderen afhankelijk van de corresponderende stuurhoeken. Vervolgens worden deze coördinaten per stuurmechanisme als aparte gegevensreeksen ingevoerd in Excel. Hierdoor wordt elk stuurmechanisme als een afzonderlijke polylijn weergegeven in de grafiek, wat resulteert in figuur 52.

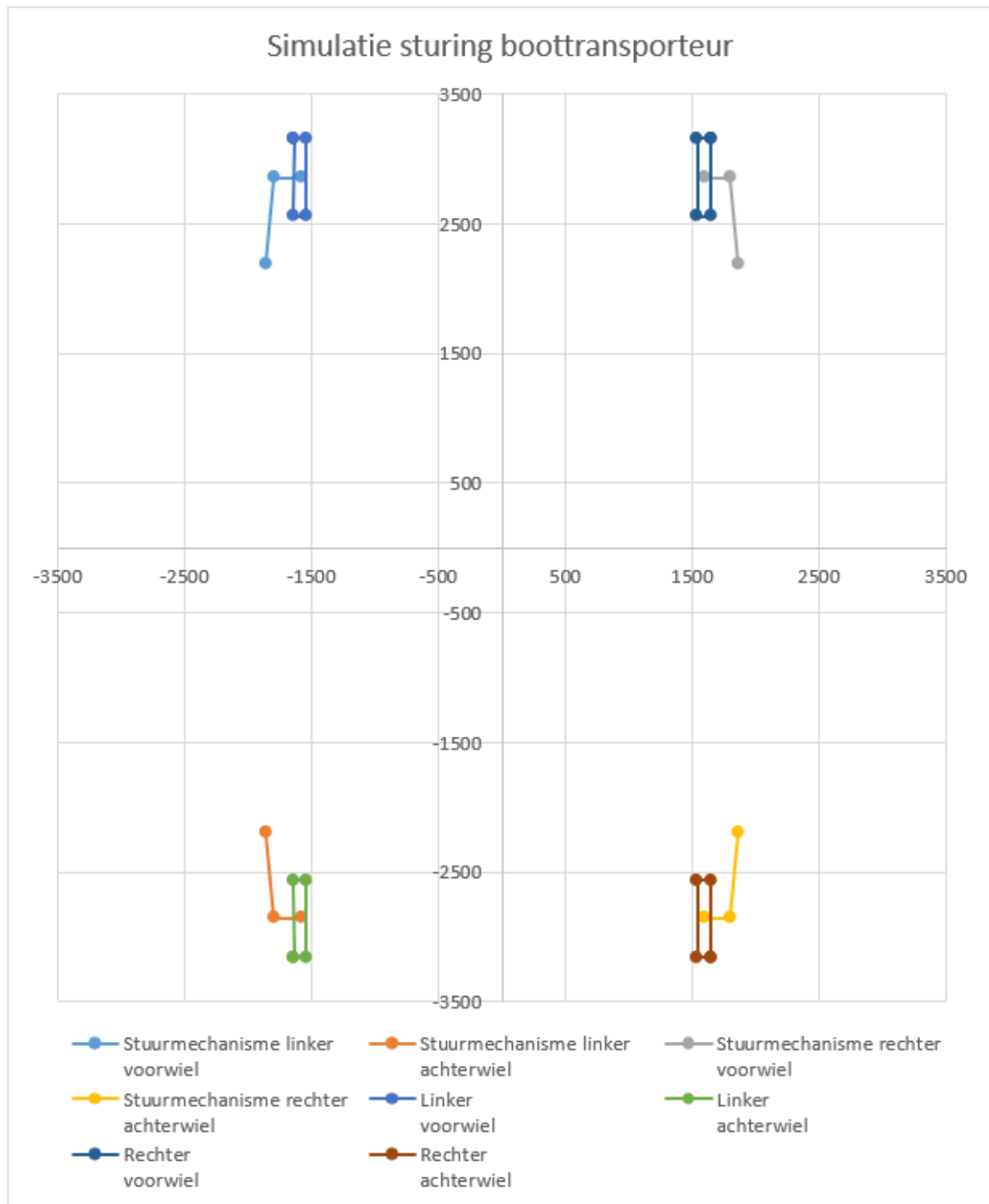
Tabel 2: Coördinatentabel

Stuurmechanisme linker voorwiel			Stuurmechanisme rechter voorwiel		
	X	Y		X	Y
C ₁	-1590,5	2857,0	C ₃	1590,5	2857,0
B ₁	-1795,5	2857,0	B ₃	1795,5	2857,0
A ₁	-1860,5	2195,2	A ₃	1860,5	2195,2
Stuurmechanisme linker achterwiel			Stuurmechanisme rechter achterwiel		
	X	Y		X	Y
C ₂	-1590,5	-2857,0	C ₄	1590,5	-2857,0
B ₂	-1795,5	-2857,0	B ₄	1795,5	-2857,0
A ₂	-1860,5	-2195,2	A ₄	1860,5	-2195,2



Figuur 52: Simulatie sturing boottransporteur

Bij een eerste blik geeft deze grafiek echter nog niet goed weer welke componenten er zichtbaar zijn. Daarom worden vier wielen als vereenvoudigde lijnmodellen toegevoegd aan de grafiek (figuur 53). Hierbij wordt dezelfde methode, zoals beschreven in sectie 6.2, doorlopen. De volledige uitwerking van de wielenplot is opgenomen in bijlagen (bijlage D).



Figuur 53: Simulatie sturing boottransporteur met wielen

6.3 Visuele verificatie

Om een visuele verificatie van de simulatie uit te voeren, wordt aan de hand van parameters x_5 , y_5 , B en L de coördinaten van het rotatiepunt berekend en geplot.

$$\begin{cases} ROT_x = x_5 - \frac{B}{2} \\ ROT_y = \frac{L}{2} - y_5 \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} ROT_x = \frac{L}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} - 1590,5 \\ ROT_y = 2857 - \frac{L \cdot \tan(\alpha)}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} \end{cases} \quad (38)$$

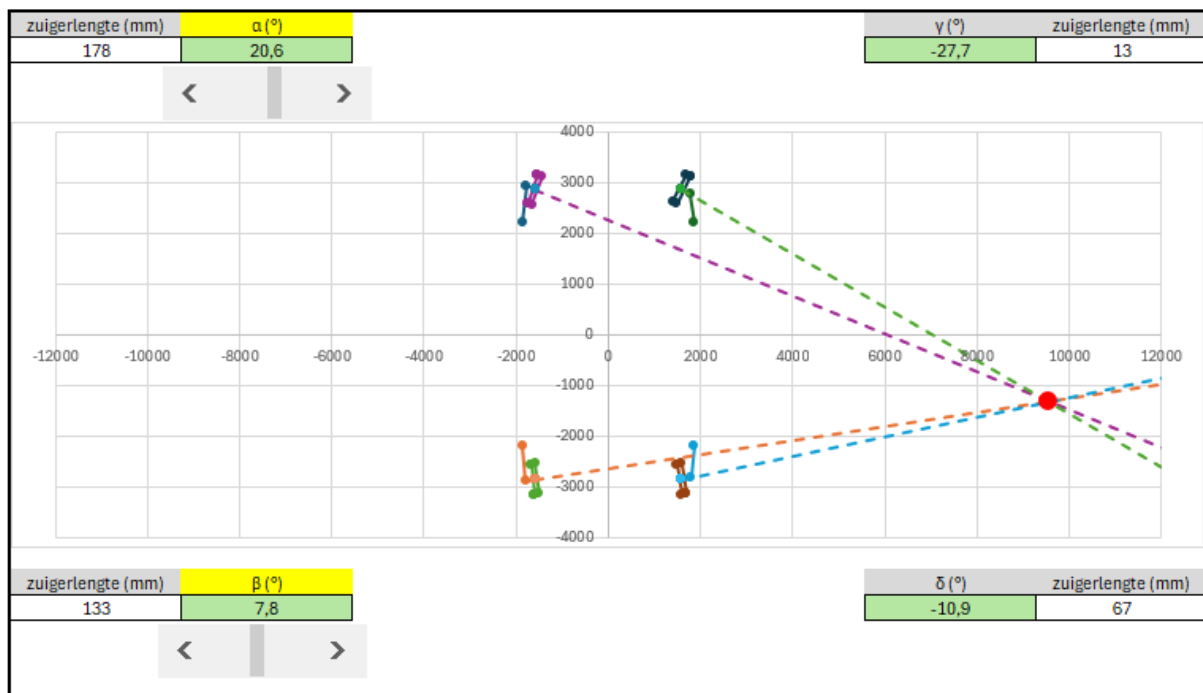
Bij een correcte implementatie valt het rotatiepunt samen met het snijpunt van de verlengdes van de hefbomen. Deze verlengdes vormen de loodlijnen van de wielen. De loodlijnen worden gevisualiseerd met behulp van een eerder berekende corresponderende punten, namelijk C_1 , C_2 , C_3 en C_4 . Daarnaast wordt voor de loodlijnen een arbitraire lengte gekozen. Deze lengte, gecombineerd met de bijbehorende stuurhoek, maakt het mogelijk de coördinaten van het tweede punt van de loodlijnen te berekenen. Het plotten van deze loodlijnen verloopt volgens dezelfde methode zoals beschreven in sectie 6.2. De loodlijnen worden in de grafiek weergegeven met streepjeslijnen, terwijl het rotatiepunt als een rood punt wordt gemarkeerd (figuur 54).

Wanneer de masterhoeken op nul worden ingesteld, wat overeenkomt met de nulpositie van de wielen waarbij deze recht vooruit staan, lopen de loodlijnen parallel. In dat geval wordt aan het x-coördinaat van het snijpunt een extreem hoge waarde toegekend, terwijl het y-coördinaat nadert tot 0. Deze combinatie vormt een uitstekende praktische benadering. De resultaten bevestigen dat de interactieve simulatie naar behoren functioneert.



6.4 Interactief model

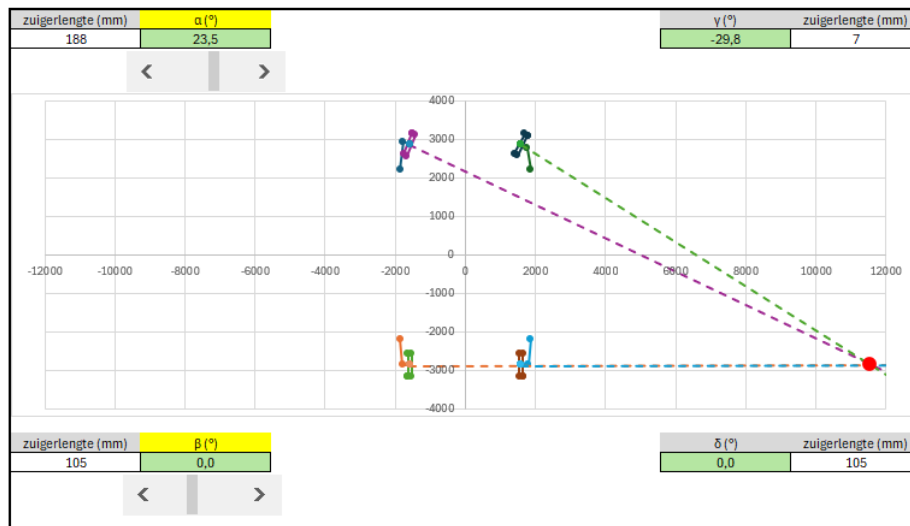
Om de gebruiksvriendelijkheid van de simulatie te optimaliseren, zijn de relevante cellen en schuifbalken op een logische wijze gepositioneerd ten opzichte van de grafiek (figuur 55). Cellen met parameters die geen directe betekenis hebben voor de gebruiker, worden buiten beeld verplaatst om de interface overzichtelijk te houden. Verder worden de geïntegreerde sturingen kort toegelicht. De zero-turnsturing kan niet worden uitgevoerd met deze simulatie. Deze statische parametrische stuurmodus wordt opgenomen in sectie 7.2 a.d.h.v. stuurlogica.



Figuur 55: Interface simulatie

6.4.1 Geïntegreerde ideale voorwielsturing

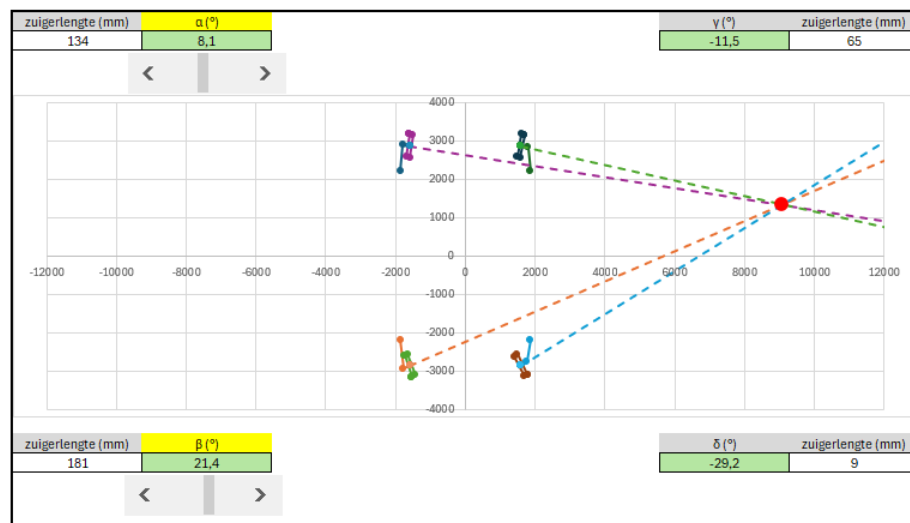
Als masterhoek β gelijkgesteld wordt aan 0° , rijdt de boottransporteur met ideale voorwielsturing. Masterhoek β bepaalt rechte reeks de oriëntatie van het linker achterwiel (figuur 38). Bij een waarde van 0° staan beide achterwielen recht vooruit in de nulpositie. Deze sturing kan vergeleken worden met de sturing van een conventionele personenwagen (figuur 56).



Figuur 56: Geïntegreerde ideale voorwielsturing

6.4.2 Geïntegreerde vierwielsturing

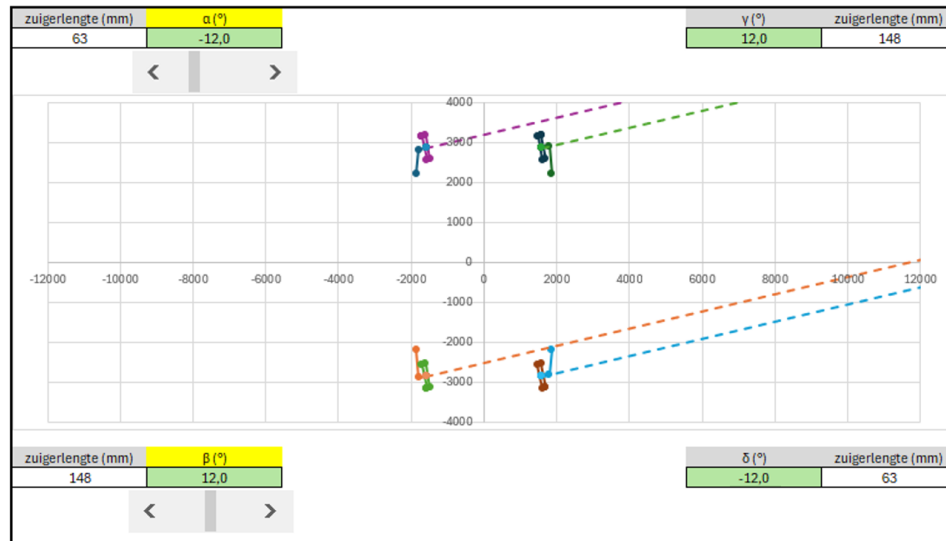
Als masterhoek α en masterhoek β waarden toegekend krijgen die niet gelijk zijn aan 0° , rijdt de boottransporteur met vierwielsturing (figuur 57). Het rotatiepunt kan naar wens verplaatst worden in de x- en y-richting.



Figuur 57: Geïntegreerde vierwielsturing

6.4.3 Geïntegreerde hondsgangsturing

Als masterhoek α tegengesteld is aan masterhoek β , staan de vier stuurwielen in dezelfde richting. De loodlijnen lopen parallel en de boottransporteur zal in hondsgang rijden (figuur 58).



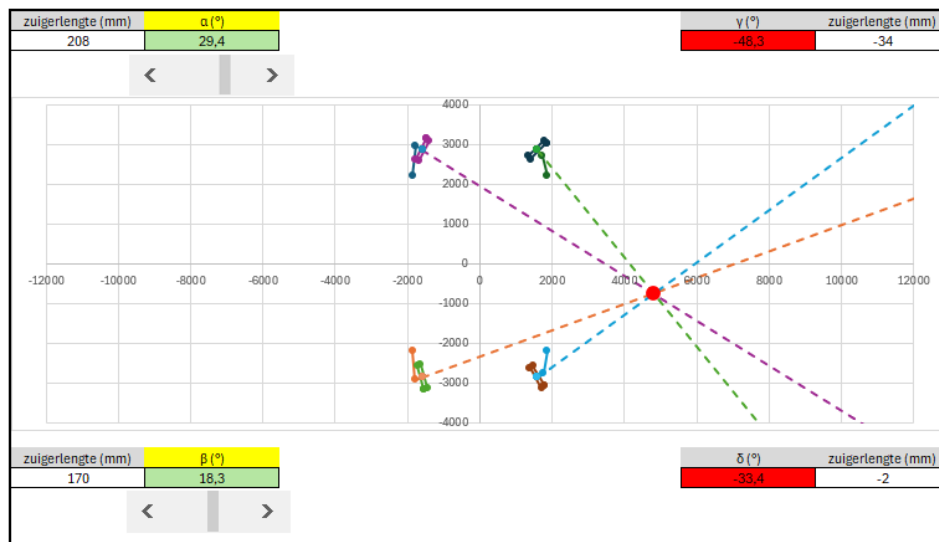
Figuur 58: Geïntegreerde hondsgangsturing

6.5 Beperkingen

De simulatie onthult enkele beperkingen met betrekking tot de stuurhoeken. Reeds bekend was dat de stuurhoeken enkel waarden kunnen aannemen tussen -30° en $+50^\circ$, een bereik dat wordt bepaald door de maximale en minimale slaglengte van de gebruikte stuurcilinders. Wanneer een stuurhoek buiten dit bereik valt, wordt de gekoppelde cel rood gemarkeerd om aan te geven dat deze waarde in de praktijk niet aangenomen kan worden.

Uit de visuele verificatie van de simulatie blijkt dat de hondsgangsturing uitsluitend toepasbaar is binnen het beperkte stuurbereik van -30° tot $+30^\circ$. Dit is logisch te verklaren door de vereiste dat masterhoek α en masterhoek β in deze stuurmodus tegengesteld aan elkaar moeten zijn. Buiten dit bereik kan één van beide hoeken echter niet langer de corresponderende tegenhoek aannemen. Bijvoorbeeld, wanneer masterhoek α een waarde van 45° bereikt, zou masterhoek β theoretisch -45° moeten bedragen. Dit valt echter buiten het opgelegde stuurbereik van masterhoek β , waardoor de stuurmodus in dergelijke situaties niet toepasbaar is.

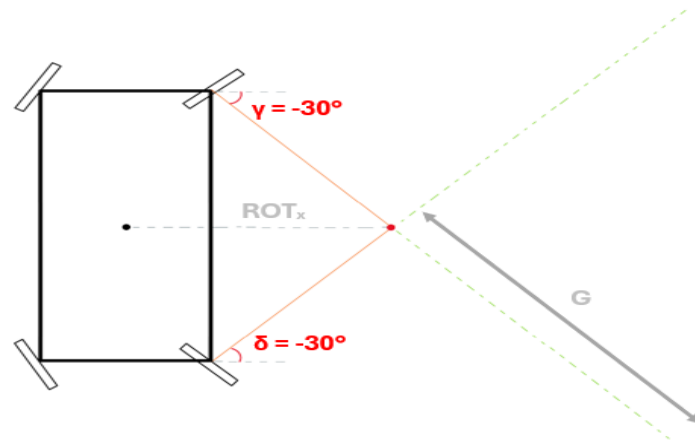
Uit de simulatie blijkt echter ook dat bepaalde combinaties van de stuurhoeken α en β resulteren in onmogelijke waarden voor de slavehoeken, zelfs wanneer α en β zich binnen hun toegestane bereik bevinden (figuur 59).



Figuur 59: Ongeldige configuratie

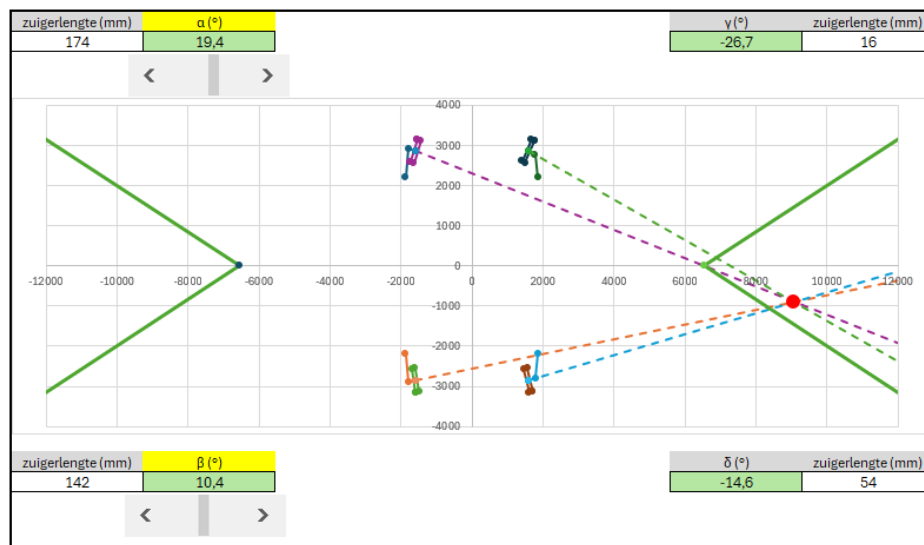
Om deze ongeldige combinaties van stuurhoeken uit te sluiten, is een afbakening van de rotatiepuntzone aan beide zijden van de machine opgesteld. Deze zones kunnen elk beschreven worden aan de hand van twee lijnstukken.

Om de rechter rotatiepuntzone te bepalen aan de hand van lijnstukken, wordt dezelfde methode toegepast als bij het plotten van de loodlijnen, zoals beschreven in sectie 6.3. Het eerste gedeelte punt van de twee lijnstukken wordt gedefinieerd door het dichtst mogelijke rotatiepunt. De coördinaten van dit rotatiepunt worden bepaald op basis van de parameters ROT_x en ROT_y , waarbij de slavehoeken γ en δ hun uiterste waarde van -30° aannemen. Aangezien deze hoeken gelijk zijn, is ROT_y gelijk aan 0. Om het gebied visueel weer te geven, worden de lijnstukken voorzien van een arbitraire lengte G (figuur 60).



Figuur 60: Dichtst mogelijke rotatiepunt

De lijnstukken die de rotatiepuntzone definiëren, liggen eveneens onder de uiterste hoekwaarden van γ en δ . Om het tweede punt van elk lijnstuk te plotten, worden de coördinaten van dit punt berekend op basis van de corresponderende uiterste hoekwaarde, lengte G en de coördinaten van het rotatiepunt. Voor de rotatiepuntzone aan de linkerzijde van de machine worden alle gebruikte coördinaten gespiegeld ten opzichte van de y -as. Het resultaat is een visuele weergave van de rotatiepuntzones in de simulatie (figuur 61).



Figuur 61: Visuele weergave rotatiepuntzones

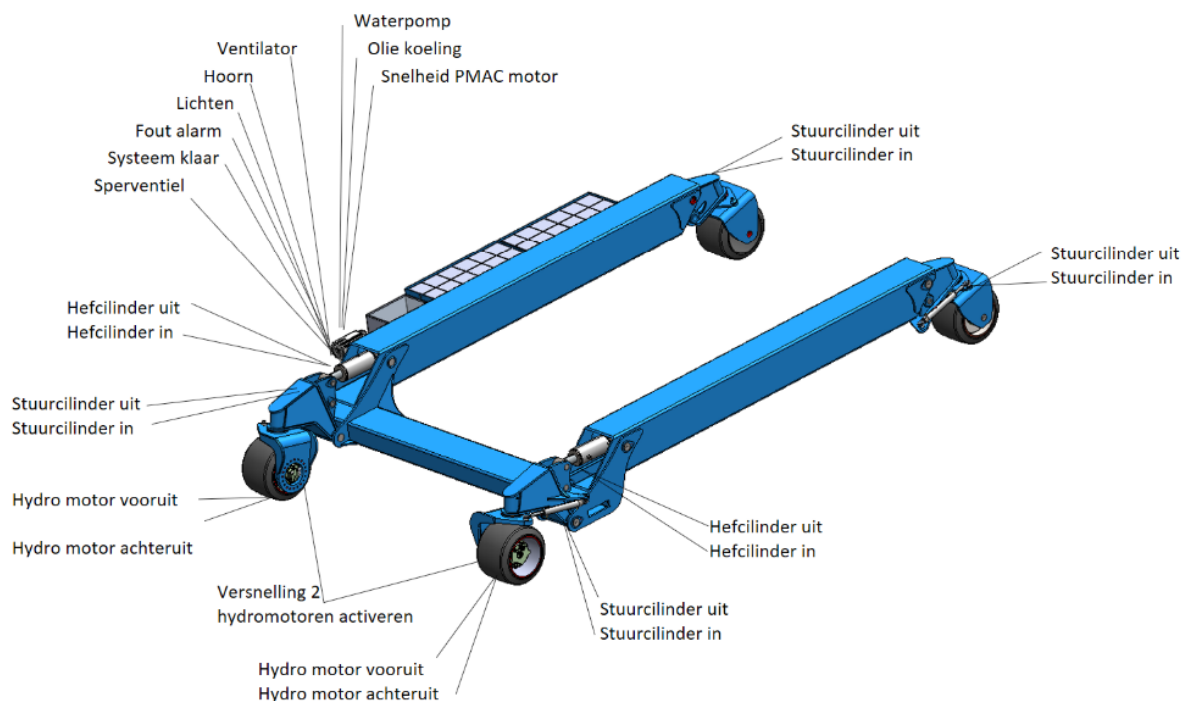
Aangezien van elk lijnstuk nu twee punten bekend zijn, kan elk lijnstuk worden omgezet in een eerstegraadsfunctie met behulp van de algemene vergelijking voor een eerstegraadsfunctie. Hierdoor worden de rotatiepuntzones niet langer beperkt door de arbitraire lengte G , maar strekken ze zich oneindig uit. Deze functies zijn bijzonder nuttig voor de effectieve sturingsprogrammatie. De volledige uitwerking van het opstellen van de lijnstukken en het afleiden van de bijbehorende eerstegraadsvergelijkingen is opgenomen in bijlagen (bijlage E).

7 Documentatie voor Teleradio

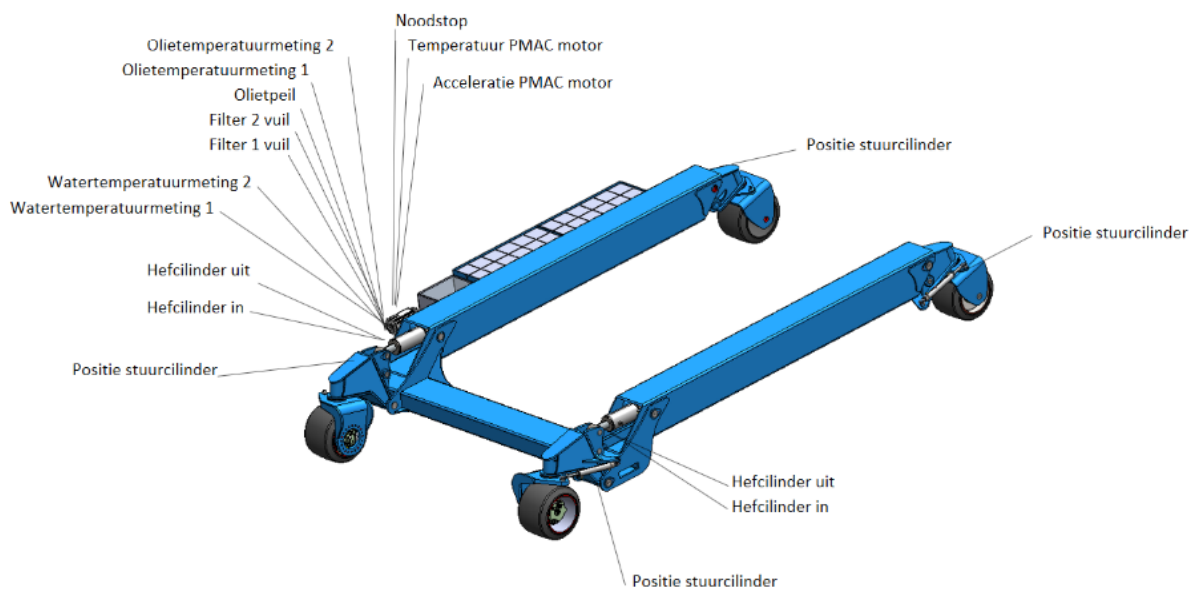
Teleradio heeft drie documenten nodig om de gehele communicatiehardware en -software uit te werken. Als eerste een gestructureerde lijst van de in- en uitgangen van de ontvangermodule voor de communicatie met de actieve componenten van de boottransporteur. Als tweede een structurele oplijsting van de stuurlogica van de machine in pseudocode. Als derde een lay-outvoorstel voor de afstandsbediening.

7.1 In- en uitgangenlijst

Vooraleer een tabeloverzicht van de in- en uitgangen van de ontvangermodule werd opgesteld, zijn eerst twee visuele mindmaps ontwikkeld om de verschillende in- en uitgangen van de actieve componenten te identificeren. Deze visuele weergaven werden tijdens meerdere overlegmomenten met ingenieurs van Werkhuizen Hengelhoeve iteratief aangevuld en verfijnd tot hun uiteindelijke vorm (figuur 62 en figuur 63). Vervolgens werd alle verzamelde informatie systematisch geëxtraheerd, gelabeld, geordend en aangevuld met extra informatie in tabel 3 en tabel 4, zodat een helder en volledig overzicht van de in- en uitgangen verkregen werd om door te geven aan Teleradio.



Figuur 62: Visuele weergave uitgangen



Figuur 63: Visuele weergave ingangen

Tabel 3: Ingangenlijst

Tagnaam	Beschrijving	Type	I/O	Signaaltype	Apparaat
ACC	Acceleratie PMAC motor	AI	Input	CANBUS	Parker drive
MOTOR_TEMP	Temperatuur PMAC motor	AI	Input	CANBUS	Parker drive
LA_STEER_POS	Positie stuurcilinder wiel linksachter	AI	Input	4-20 mA	Positiesensor
LV_STEER_POS	Positie stuurcilinder wiel linksvoor	AI	Input	4-20 mA	Positiesensor
RA_STEER_POS	Positie stuurcilinder wiel rechtsachter	AI	Input	4-20 mA	Positiesensor
RV_STEER_POS	Positie stuurcilinder wiel rechtsvoor	AI	Input	4-20 mA	Positiesensor
LIFT_rechts_DOW_POS	Hefcilinder 1 in	DI	Input	24VDC	Magnetische eindeloop sensor
LIFT_rechts_UP_POS	Hefcilinder 1 uit	DI	Input	24VDC	Magnetische eindeloop sensor
LIFT_links_DOW_POS	Hefcilinder 2 in	DI	Input	24VDC	Magnetische eindeloop sensor
LIFT_links_UP_POS	Hefcilinder 2 uit	DI	Input	24VDC	Magnetische eindeloop sensor
EMERGENCY_STOP	Noodstop	DI	Input	24VDC	Noodstopknop
OIL_TEMP	Olietemperatuur te hoog	DI	Input	24VDC	Temperatuursensor
OIL_TEMP	Olietemperatuur veel te hoog, probleem	DI	Input	24VDC	Temperatuursensor
OIL_LEVEL	Oliepeil te laag	DI	Input	24VDC	Niveausensor
FIL_VUIL	Filter 1 vuil	DI	Input	24VDC	/
FIL_VUIL	Filter 2 vuil	DI	Input	24VDC	/
TEMP_water_hoog	Watertemperatuur te hoog	DI	Input	24VDC	Temperatuursensor
TEMP_WATER_TE_HOOG	Watertemperatuur veel te hoog, probleem	DI	Input	24VDC	Temperatuursensor

Tabel 4: Uitgangenlijst

Tagnaam	Beschrijving	Type	I/O	Signaaltype	Apparaat
SPEED	Snelheid PMAC motor	AO	Output	CANBUS	Parker drive
DIFFLOCK	Sperventiel tussen hydromotoren	DO	Output	24VDC	Hydraulisch ventiel
hydro_mot_RA_vooruit	Stuursignaal voor vooruit te rijden	DO	Output	24VDC	706C3KAA079K044
hydro_mot_RA_achteruit	Stuursignaal voor achteruit te rijden	DO	Output	24VDC	706C3KAA079K044
hydro_mot_LA_vooruit	Stuursignaal voor vooruit te rijden	DO	Output	24VDC	706C3KAA079K044
hydro_mot_LA_achteruit	Stuursignaal voor achteruit te rijden	DO	Output	24VDC	706C3KAA079K044
LIFT_RECHTS_UP	Hefcilinder 1 uitsturen	DO	Output	24VDC	Hydraulisch ventiel
LIFT_RECHTS_DOWN	Hefcilinder 1 insturen	DO	Output	24VDC	Hydraulisch ventiel
LIFT_LINKS_UP	Hefcilinder 2 uitsturen	DO	Output	24VDC	Hydraulisch ventiel
LIFT_LINKS_DOWN	Hefcilinder 2 insturen	DO	Output	24VDC	Hydraulisch ventiel
versnelling_2_activeren	Versnelling 2 van hydromotoren activeren	DO	Output	24VDC	706C3KAA079K044
Rechts_voor_uit	Stuercilinder rechtsvoor uitsturen	AO	Output	PWM	Hydraulisch proportioneel ventiel
Rechts_voor_in	Stuercilinder rechtsvoor insturen	AO	Output	PWM	Hydraulisch proportioneel ventiel
Rechts_achter_uit	Stuercilinder rechtsachter uitsturen	AO	Output	PWM	Hydraulisch proportioneel ventiel
Rechts_achter_in	Stuercilinder rechtsachter insturen	AO	Output	PWM	Hydraulisch proportioneel ventiel
Links_achter_uit	Stuercilinder linksachter uitsturen	AO	Output	PWM	Hydraulisch proportioneel ventiel
Links_achter_in	Stuercilinder linksachter insturen	AO	Output	PWM	Hydraulisch proportioneel ventiel
Links_voor_uit	Stuercilinder linksvoor uitsturen	AO	Output	PWM	Hydraulisch proportioneel ventiel
Links_voor_in	Stuercilinder linksvoor insturen	AO	Output	PWM	Hydraulisch proportioneel ventiel
SYSTEM_READY	Systeem klaar voor ingebruikname	DO	Output	24VDC	Signaallamp
FAULT_ALARM	Foutmelding	DO	Output	24VDC	Signaallamp
LIGHT	Verlichting	DO	Output	24VDC	Lampen
Hoorn	Geluidssignaal	DO	Output	24VDC	Zoemer
START_oil_koeling	Oliekoeler aanzetten	DO	Output	24VDC	Relais
waterpomp	Waterpomp aanzetten	DO	Output	24VDC	Waterpomp
ventilator_voor_pomp	Extra ventilator waterpomp aanzetten	DO	Output	24VDC	Ventilator

7.2 Stuurlogica in pseudocode

Om te verzekeren dat de boottransporteur op de juiste manier reageert op de ingangssignalen, wordt de stuurlogica opgesteld in pseudocode. De stuurlogica omvat het geheel van regels, commando's en instructies waaraan de machine en operator tijdens gebruik aan moeten voldoen om gerichte acties uit te voeren. Instructietermen die gangbaar zijn in programmeertalen, zoals EN, OF, ALS en DAN, worden in vet gemarkeerd om de omzetting naar programmeercode voor Teleradio te vereenvoudigen en eventuele tegenstrijdigheden makkelijker op te sporen. Teleradio zal deze instructies, conform de relevante telecommunicatienormen en -voorschriften, verder vervolledigen en vertalen naar eenduidige programmeercode. De stuurlogica, aangevuld met relevante informatie over de ingangssignalen, wordt gestructureerd weergegeven in tabel 5.

Tabel 5: Stuurlogica in pseudocode

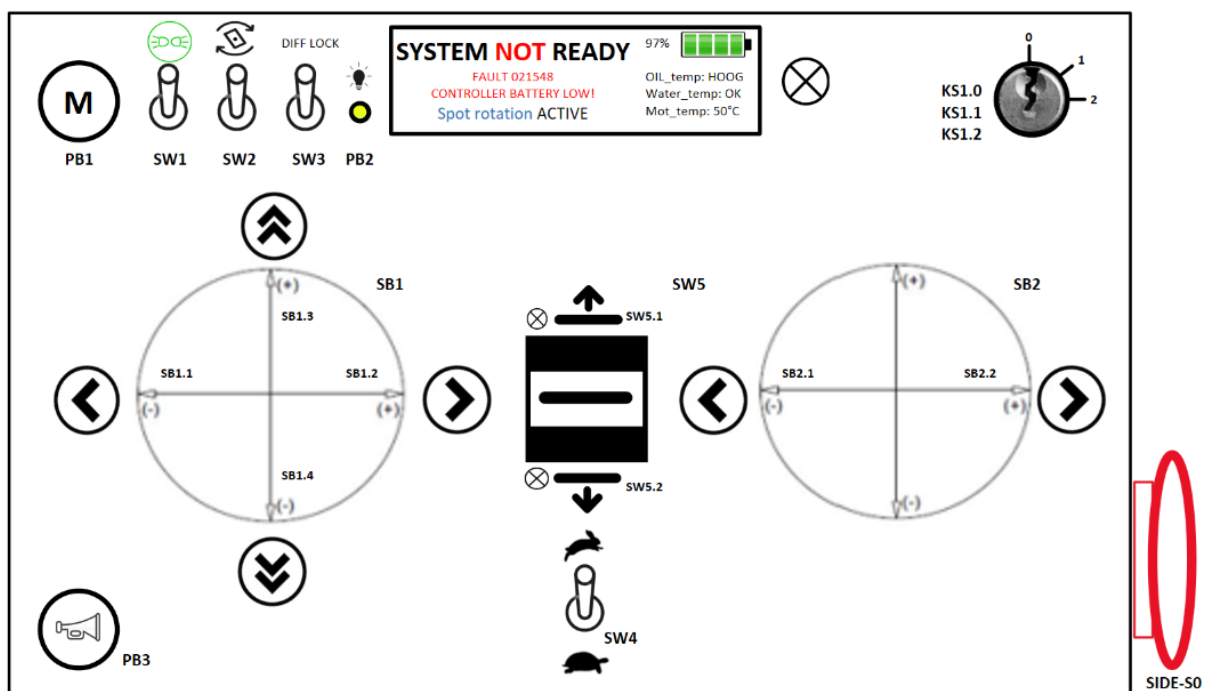
FUNCTIES	LOGICA
Machine aanzetten/afzetten	Noodstop niet ingedrukt EN 'aan'knop op afstandsbediening
Opstart alarm (zoemer)	Eerste 3 seconden nadat machine wordt aangezet
Rijlichten	Toggle switch op afstandsbediening
Bewegingszoemer	Noodstop niet ingedrukt EN , machine AAN EN joystick vooruit/achteruit NIET GELIJK AAN 0 (dus bij beweging)
Claxoneren	Machine AAN EN drukknop op afstandsbediening
Emergency-stop en fout_alarm	Noodstop ingedrukt OF ALS input (OIL_TEMP) HOOG is OF ALS input (FIL_VUIL) HOOG is OF ALS input (FIL_VUIL) HOOG is OF ALS input (TEMP_WATER_TE_HOOG) HOOG is
Motorsnelheid	Noodstop niet ingedrukt EN , lineair afhankelijk van joystick vooruit/achteruit OF basissnelheid indien er een hydraulisch commando wordt gegeven bij stilstand (wielen draaien, lift omhoog/omlaag) OF versnelling 2 moet geactiveerd worden OF naloop
Gewenste hoek LV	Noodstop niet ingedrukt EN , LINKER Joystick L/R, beweging naar links of naar rechts verhoogt of verlaagt de hoek geleidelijk. OF ALS "spot rotation" is geactiveerd DAN = $\text{boogtan}(\text{lengte_machine}/\text{breedte_machine})$ Belangrijk: - joystick veert terug naar het midden - als de joystick in middenstand is, blijft de de laatst ingestelde hoek behouden - joystickbereik is dus NIET gelijk aan stuurhoekbereik!
Gewenste Hoek LA	Noodstop niet ingedrukt EN , RECHTER Joystick L/R, beweging naar links of naar rechts verhoogt of verlaagt de hoek geleidelijk. OF ALS "spot rotation" is geactiveerd DAN = $\text{boogtan}(\text{lengte_machine}/\text{breedte_machine})$ Belangrijk: - joystick veert terug naar het midden - als de joystick in middenstand is, blijft de de laatst ingestelde hoek behouden - joystickbereik is dus NIET gelijk aan stuurhoekbereik!
x_ro (=afstand in de x-richting tussen het rotatiepunt en de linkerwielen)	$=\text{lengte_machine} * \tan(90^\circ - \text{gewenste_hoek_LA}) / (1 + \tan(90^\circ - \text{gewenste_hoek_LA}) / \tan(90^\circ - \text{gewenste_hoek_LV}))$
y_ro (=afstand in de y-richting tussen het rotatiepunt en het linker voorwiel)	$=x_ro / \tan(90^\circ - \text{gewenste_hoek_LV})$

Gewenste Hoek RV	= -boogtan(y_ro/(x_ro - breedte_machine)) OF ALS "spot rotation" is geactiveerd DAN = boogtan(lengte_machine/breedte_machine)
Gewenste Hoek RA	= -boogtan((lengte_machine-y_ro)/(x_ro - breedte_machine)) OF ALS "spot rotation" is geactiveerd DAN = boogtan(lengte_machine/breedte_machine)
Huidige_hoek_LV	=boogcos((-560+positiefeedback_LV) ² +715 ² +205 ²)/(2*715*205))-67,8°
Huidige_hoek_LA	=boogcos((-560+positiefeedback_LA) ² +715 ² +205 ²)/(2*715*205))-67,8°
Huidige_hoek_RV	=boogcos((-560+positiefeedback_RV) ² +715 ² +205 ²)/(2*715*205))-67,8°
Huidige_hoek_RA	=boogcos((-560+positiefeedback_RA) ² +715 ² +205 ²)/(2*715*205))-67,8°
TOE_FM (=toegestane foutmarge)	= 1° (afwijking in graden die aangenomen mag worden, toegestane afwijking moet proefondervindelijk bepaald worden)
Ventiel cilinder LV	Noodstop niet ingedrukt EN, ALS gewenste hoek LV (-+ TOE_FM) niet overeenkomt met huidige hoek EN ALS Links_voor_in HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de uitgaande slag laten bewegen. EN ALS Links_voor_uit HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de ingaande slag laten bewegen.
Ventiel cilinder LA	Noodstop niet ingedrukt EN, ALS gewenste hoek LA (-+ TOE_FM) niet overeenkomt met huidige hoek LA EN ALS Links_achter_in HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de uitgaande slag laten bewegen. EN ALS Links_achter_uit HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de ingaande slag laten bewegen.
Ventiel cilinder RV	Noodstop niet ingedrukt EN, ALS gewenste hoek RV (-+ TOE_FM) niet overeenkomt met huidige hoek RV EN ALS Rechts_voor_in HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de uitgaande slag laten bewegen. EN ALS Rechts_voor_uit HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de ingaande slag laten bewegen.
Ventiel cilinder RA	Noodstop niet ingedrukt EN, ALS gewenste hoek RA (-+ TOE_FM) niet overeenkomt met huidige hoek RA EN ALS Rechts_achter_in HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de uitgaande slag laten bewegen. EN ALS Rechts_achter_uit HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de ingaande slag laten bewegen.
Hefcilinder links	Noodstop niet ingedrukt EN, momentary toggle switch of spring-return toggle switch boven/onder , beweging naar boven of naar onder verhoogt of verlaagt geleidelijk de positie van de hefcilinder. EN ALS LIFT_links_DOW_POS HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de uitgaande slag laten schakelen. EN ALS LIFT_links_UP_POS HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de ingaande slag laten schakelen. Belangrijk: - de toggle switch veert terug naar het midden - als de toggle switch in middenstand is, blijft de laatst ingestelde positie behouden - toggle switchbereik is dus NIET gelijk aan cilinderpositiebereik!
Hefcilinder rechts	Noodstop niet ingedrukt EN, momentary toggle switch of spring-return toggle switch boven/onder , beweging naar boven of naar onder verhoogt of verlaagt geleidelijk de positie van de hefcilinder. EN ALS LIFT_rechts_DOW_POS HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de uitgaande slag laten schakelen. EN ALS LIFT_rechts_UP_POS HOOG is DAN ventiel enkel nog in de richting van de ingaande slag laten schakelen. Belangrijk: - de toggle switch veert terug naar het midden - als de toggle switch in middenstand is, blijft de laatst ingestelde positie behouden - toggle switchbereik is dus NIET gelijk aan cilinderpositiebereik!!!
Versnelling 2	Noodstop niet ingedrukt EN , toggle switch op afstandsbediening
Rijrichting_hydro_m_RA	Noodstop niet ingedrukt EN, ALS "spot rotation" is geactiveerd DAN MOET rijrichting_M_links omgekeerd zijn aan rijrichting_M_rechts ANDERS MOET ALTIJD rijrichting_M_links GELIJK zijn aan rijrichting_M_rechts ALS vooruit-rijden-knop wordt ingedrukt ACTIVEER hydro_mot_RA_vooruit ALS achteruit-rijden-knop wordt ingedrukt ACTIVEER hydro_mot_RA_achteruit
Rijrichting_hydro_m_LA	Noodstop niet ingedrukt EN, ALS "spot rotation" is geactiveerd DAN MOET rijrichting_M_links omgekeerd zijn aan rijrichting_M_rechts ANDERS MOET ALTIJD rijrichting_M_links GELIJK zijn aan rijrichting_M_rechts ALS vooruit-rijden-knop wordt ingedrukt ACTIVEER hydro_mot_RA_vooruit ALS achteruit-rijden-knop wordt ingedrukt ACTIVEER hydro_mot_RA_achteruit
difflock	Noodstop niet ingedrukt EN 'difflock'schakelaar op afstandsbediening
START_oil_koeling	ALS input 4 (OIL_TEMP) HOOG is
waterpomp	ALS input 20 (TEMP_water_hoog) HOOG is
ventilator_pomp	ALS input 20 (TEMP_water_hoog) HOOG is

7.3 Lay-outvoorstel voor de afstandsbediening

De machine wordt bediend met een draadloze afstandsbediening. Teleradio biedt standaard afstandsbedieningsmodellen aan die geschikt zijn voor uiteenlopende industriële toepassingen. Om tegemoet te komen aan de wensen en visie van Werkhuizen Hengelhoef, vraagt Teleradio om een voorstel voor de lay-out van de afstandsbediening, waarin alle knoppen en bedieningselementen duidelijk benoemd worden. Op basis van deze informatie wordt beoordeeld of een bestaand model volstaat, of dat een lichte aanpassing van een standaardmodel nodig is, of dat een volledig op maat gemaakt ontwerp vereist is.

Er wordt gekozen voor een model met twee hoofdjoysticks. De rechter joystick regelt de masterhoek α , terwijl de linker joystick zowel de masterhoek β als de draairichting en snelheid van de hydromotoren bepaalt. Figuur 64 toont het voorgestelde ontwerp van de afstandsbediening, en tabel 6 bevat een overzicht van alle benoemde knoppen en bedieningselementen.



Figuur 64: Afstandsbedieningslay-out

Tabel 6: Bedieningselementen

Element	Onderdeel	Functie
Display	LCD scherm	Systeem status Startcommando Olietemperatuur Watertemperatuur Motortemperatuur Batterijniveau van de machine Batterijniveau van de afstandsbediening Geactiveerde rijmodus
KS1.0	Sleutelschakelaar	Systeem uit
KS1.1	Sleutelschakelaar	Systeem stand-by
KS1.2	Sleutelschakelaar	Systeem aan
SIDE-S0	Noodstopknop	Noodstop
PB1	Drukknop	Start motor
PB2	Drukknop	LCD scherm verlichting
PB3	Drukknop	Hoorn
SB1.1	Joystick 1	Achterwielen links draaien
SB1.2	Joystick 1	Achterwielen rechts draaien
SB1.3	Joystick 1	Vooruit rijden
SB1.4	Joystick 1	Achteruit rijden
SB2.1	Joystick 2	Voorwielen links draaien
SB2.2	Joystick 2	Voorwielen rechts draaien
SW1	Tuimelschakelaar	Lichten
SW2	Tuimelschakelaar	Zero-turn
SW3	Tuimelschakelaar	Diff lock
SW4	Tuimelschakelaar	Versnelling 1 of versnelling 2
SW5.1	Moment wipschakelaar	Stijgen
SW5.2	Moment wipschakelaar	Dalen

8 Besluit

In deze masterproef werden twee hoofddoelstellingen behandeld. De eerste hoofddoelstelling betrof het aanvullen van het projectdossier met een voorontwerp van de mechanische constructie van de machine. Deze doelstelling werd succesvol gerealiseerd door de ontwikkeling van een CAD-model in SolidWorks, waarbij de werking van de machine nauwkeurig werd vastgelegd. Het model biedt de mogelijkheid om de vier wielen onafhankelijk van elkaar te besturen. Ter validatie van het ontwerp zijn sterkteberekeningen uitgevoerd op kritische delen van de mechanische constructie, waarmee de structurele integriteit van het ontwerp werd gecontroleerd.

De tweede hoofddoelstelling richtte zich op de verbetering van de gebruiksvriendelijkheid en de operationele mogelijkheden van de machine. Alle geometrische stuurconfiguraties die mogelijk zijn door de onafhankelijke besturing van de vier wielen werden in kaart gebracht en onderzocht. De gunstig bevonden stuurconfiguraties zijn vervolgens geformuleerd als wiskundige functies. Deze functies zijn gevalideerd en gevisualiseerd met behulp van een 2D-Excelsimulatie van de boottransporteur. Deze geslaagde interactieve simulatie bracht enkele potentiële beperkingen vroegtijdig aan het licht, zoals bepaalde combinaties van de stuurhoeken α en β die resulteren in onmogelijke waarden voor de slavehoeken. Vervolgens werden deze beperkingen aangevuld met gepaste oplossingen, waaronder de afbakening van de rotatiepuntzone.

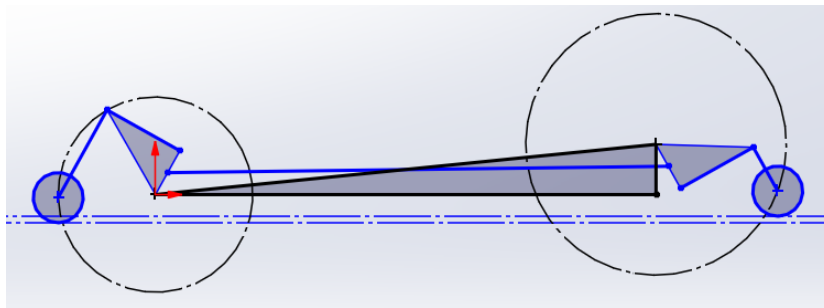
Als bijkomende doelstelling werd een kleinschalig componentenonderzoek uitgevoerd naar de gekozen actieve onderdelen voor dit project. Dit onderzoek werd beperkt gehouden maar leverde waardevolle informatie op, die bijdroeg in de volgende fase om de stuurlogica van de machine correct te definiëren.

Voor de samenwerking met het externe bedrijf Teleradio werden op het einde van het project drie gestructureerde documenten opgesteld: een overzicht van in- en uitgangen van de ontvangermodule, stuurlogica in pseudocode en een voorstel voor de lay-out van de afstandsbediening. Deze documenten dragen bij aan de implementatie van de besturing van de machine, maar kunnen in samenwerking met Teleradio nog verder uitgewerkt worden naar verfijndere versies. Teleradio kan er ook voor kiezen om de verfijning rechtstreeks uit te voeren in de programmeercode.

Samengevat heeft het project succesvol bijgedragen aan de technische ontwerpfase van de herwerkte boottransporteur, maar ook de structurele basis gelegd voor de implementatie van de geavanceerde sturingsmogelijkheden.

8.1 Vervolgonderzoek

Het project biedt tal van deelonderwerpen om verder uit te spitten. Er kan verder onderzoek uitgevoerd worden naar de optimalisatie van het hefmechanisme. Uit het CAD-model is gebleken dat de middenstructuur niet volledig horizontaal blijft tijdens het heffen. Dit fenomeen is het gevolg van de verschillende draaicirkels van de scharnierende delen van het hefmechanisme ten opzichte van hun scharnierassen (figuur 65). De procentuele scheefstelling is verwaarloosbaar binnen dit project en is daarom niet opgenomen in de masterproef, maar kan in toekomstige, kortere ontwerpen mogelijk een negatieve invloed hebben. Een wiskundig model kan ontwikkeld worden om de invloed van factoren zoals de lengte van de verbindingstang, de wielgroottes en de locaties van de rotatiepunten te analyseren.



Figuur 65: Draaicirkels hefmechanisme

Verder kan onderzoek gedaan worden naar welke kenmerken afstandsbedieningen, voor vierwielsturingsvoertuigen moeten hebben om intuïtief gebruik te optimaliseren. Een alternatieve benadering waarbij één joystick de locatie van het rotatiepunt bepaalt en de vier stuurhoeken als slavehoeken worden berekend, kan een mogelijk alternatieve intuïtieve oplossing zijn.

Daarnaast kan het effect van laterale slip bij langzaam bewegende voertuigen met vierwielsturing nader onderzocht worden, met focus op trajectafwijking en de maximale toelaatbare slip zonder negatieve gevolgen.

Ten slotte is het zinvol om de haalbaarheid van de elektrificatie van het huidige hydraulische stuursysteem te onderzoeken. Een volledig elektrisch aandrijving zonder een hydraulische groep, kan bijdragen aan de duurzaamheid en efficiëntie van toekomstige herontwerpen.

9 Referentielijst

- [1] 'Tinnemans Floating Solutions'. Geraadpleegd: 24 september 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.tinnemansfs.com/>
- [2] 'Werkhuizen Hengelhoef'. Geraadpleegd: 25 september 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.werkhuizen-hengelhoef.be/>
- [3] 'Botenwagens - Schilstra Boatliftsystems'. Geraadpleegd: 27 september 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://schilstraboatliftsystems.com/botenwagens/>
- [4] 'Marine Travelifts Industrial Marine Forklifts for Boat Handling'. Geraadpleegd: 27 september 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.marinetraavelift.com/products/marine-forklifts/>
- [5] Next Generation Machinery, 'Twin Track Bootwagen'. Geraadpleegd: 26 oktober 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://nextgenerationmachinery.nl/twin-track-bootwagen/>
- [6] 'Transporter PCT25-120', Geraadpleegd: 26 oktober 2024. [Online]. Beschikbaar op: www.roodberg.com
- [7] Heilig Fabrication, 'Boottransporter met 60 ton hefcapaciteit '. Geraadpleegd: 26 oktober 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.heiligfabrication.com/projecten/boottransporter/>
- [8] 'What is Forklift? Working Mechanism & Where it is used?' Geraadpleegd: 28 oktober 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://torcanlift.com/what-is-forklift-working-mechanism-where-it-is-used/>
- [9] 'How does a pallet truck work?' Geraadpleegd: 28 oktober 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.jungheinrich-profishop.co.uk/en/profi-guide/how-does-a-pallet-truck-work/>
- [10] 'BF-GL pallet truck - with pneumatic tyres - HanseLifter'. Geraadpleegd: 15 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.hanselifter.com/products-detail/bf-gl-pallet-truck.html#mediathek>
- [11] 'Hand pallet jack animation - YouTube'. Geraadpleegd: 15 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.youtube.com/watch?v=yReQnmWfjCw>
- [12] 'Understanding Scissor Lift Mechanism: How It Works and Benefits'. Geraadpleegd: 15 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://handling.com/guide/scissor-lift-mechanism/>

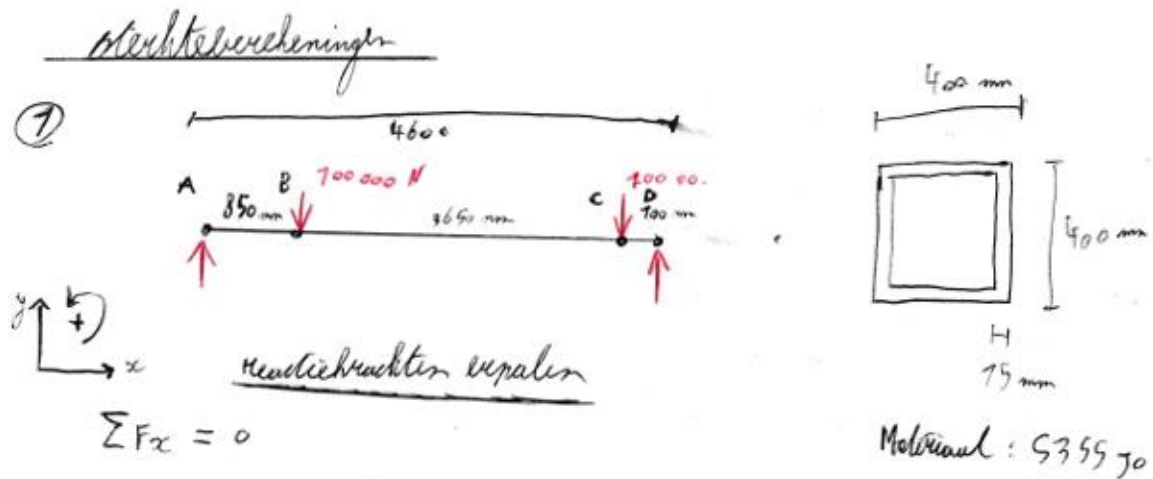
- [13] J.-P. Major, J. Trembley, en D. Pellerin, 'Scissor Lift Jack Review & Equations'. Geraadpleegd: 28 oktober 2024. [Online]. Beschikbaar op: https://www.engineersedge.com/mechanics_machines/scissor-lift.htm
- [14] 'Ackerman Steering'. Geraadpleegd: 27 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <http://datagenetics.com/blog/december12016/index.html>
- [15] P. Gautam, S. Sahai, S. S. Kelkar, P. S. Agrawal, en M. R. D, 'Designing Variable Ackerman Steering Geometry for Formula Student Race Car', *International Journal of Analytical, Experimental and Finite Element Analysis (IJAEEFA)*, vol. 8, nr. 1, feb. 2021, doi: 10.26706/ijaefea.1.8.20210101.
- [16] M. Varad, S. Kumbhar, M. Mangesh Vijaykumar Mali, M. Nitin, en P. Banne, 'Mathematical Study and Design of Ackermann Steering Geometry in Four Wheeler', *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2020, Geraadpleegd: 29 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: www.irjet.net
- [17] 'Ackermann-principe - Wikipedia'. Geraadpleegd: 27 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Ackermann-principe>
- [18] 'Verification of Ackermann steering geometry - YouTube'. Geraadpleegd: 29 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.youtube.com/watch?v=TBwa1HvpHMY>
- [19] S. Verma, S. Shanker, G. Ajith, S. Patil, en S. Dy Director, 'ADVANCED ALL-WHEEL STEERING FOR ALL TERRAIN VEHICLES', vol. 6, 2019, Geraadpleegd: 29 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: www.jetir.org
- [20] Q. Qiu *e.a.*, 'Extended Ackerman Steering Principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot', *Comput Electron Agric*, vol. 152, pp. 40–50, sep. 2018, doi: 10.1016/J.COMPAG.2018.06.036.
- [21] 'All wheel steering | Rear wheel steering | Crab walk - How it works - YouTube'. Geraadpleegd: 31 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.youtube.com/watch?v=UF9kMPGUswv>
- [22] W. Li, F. Yang, E. Mao, M. Shao, H. Sui, en Y. Du, 'Design and Verification of Crab Steering System for High Clearance Self-Propelled Sprayer', *Agriculture*, vol. 12, nr. 11, p. 1893, nov. 2022, doi: 10.3390/agriculture12111893.
- [23] 'Valtra › Kniksturing op de N Serie Direct modellen | Trekkerweb.nl - Mechanisatienieuws voor de landbouw en groensector'. Geraadpleegd: 31 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.trekkerweb.nl/artikel/283252-kniksturing-op-de-n-serie-direct-modellen/>
- [24] 'About Four-Wheel Steer | Vehicle Support | GMC'. Geraadpleegd: 31 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.gmc.com/support/vehicle/driving-safety/ev-driving/four-wheel-steer>

- [25] E. Amitesh Kumar, 'Zero Turn Four Wheel Steering System', *Int J Sci Eng Res*, vol. 5, 2014, Geraadpleegd: 31 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <http://www.ijser.org>
- [26] I.-I. J. for I. R. in S. and Technology, 'Development of 360 0 Rotating Vehicle', Geraadpleegd: 31 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: https://www.academia.edu/33435523/Development_of_360_0_Rotating_Vehicle
- [27] 'Low Voltage Motor for Electro Hydraulic Pump Applications NX8M MOTOR SERIES'.
- [28] A. Becker, '92-300303N5 GVI Configuration Manual GVI Global Vehicle Inverter Configuration Manual', 2024, Geraadpleegd: 4 januari 2025. [Online]. Beschikbaar op: <http://www.parker.com/eme>
- [29] 'GVI GLOBAL VEHICLE INVERTER'.
- [30] 'Excavators 700Ck Series, Track And Slew Drives | International - Bonfiglioli'. Geraadpleegd: 5 januari 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://www.bonfiglioli.com/international/en/product/700ck-series_travel-drives_travel-track-drives
- [31] '706C3KAA079K044 datasheet', mrt. 1997.
- [32] 'Datasheet BLS6 '. Geraadpleegd: 5 januari 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://duplomaticmotionsolutions.com/docs/2024/44150-ed_124_3fb3f935ec.pdf
- [33] 'Datasheet R20-RS01 / 100-001-933-27'. Geraadpleegd: 5 januari 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://api.tele-radio.com/datasheet/294?language=nl&_gl=1*yuhdxq*_gcl_au*MTUyNTg4OTc5LjE3MzYwOTMyNjc.

Bijlagenlijst

Bijlage A: Sterkteberekening vierkant buisprofiel.....	88
Bijlage B: Sterkteberekening scharnieras	93
Bijlage C: Datasheet Bonfiglioli wielmotor	94
Bijlage D: Wielenplot.....	95
Bijlage E: Afbakening rotatiepuntzone	96

Bijlage A: Sterkteberekening vierkant buisprofiel



$$\sum F_y = 0$$

$$0 = F_{Ay} - F_{By} - F_{Cy} + F_{Dy}$$

$$F_{Ay} + F_{Dy} = 200\,000 \text{ N}$$

$$\Rightarrow F_{Ay} = 83696 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$0 = -100\,000 \text{ N} \cdot 0.85 \text{ m} - 100\,000 \text{ N} \cdot 4.5 \text{ m} + F_{Dy} \cdot 4.6 \text{ m}$$

$$F_{Dy} = 77471.6 \text{ N}$$

medekrachten bepalen

medek 1



$$x \rightarrow x \in [0; 0.85 \text{ m}]$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow N = 0 \text{ N}$$

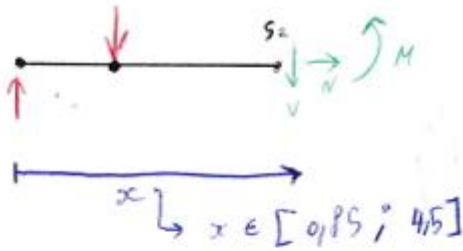
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{Ay} = V = 83696 \text{ N}$$

$$\sum M_{s1} = 0 \Rightarrow 0 = -83696 \cdot x + M$$

$$M(x=0) = 0 \text{ Nm}$$

$$M(x=0.85) = 77747.6 \text{ Nm}$$

Snede 2



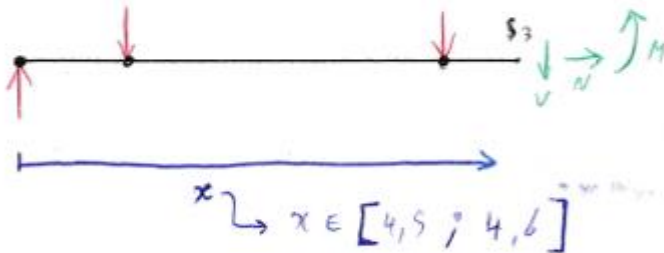
$$\sum F_x = 0 \Rightarrow N = 0 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow 83696 - 100000 - V = 0 \Rightarrow V = -76304 \text{ N}$$

$$\sum M_{G2} = 0 \Rightarrow -83696 \cdot x + 100000 \cdot (x - 0,85) + M = 0$$

$\hookrightarrow M(x = 0,85) = 77747,6 \text{ Nm}$
 $\hookrightarrow M(x = 4,5) = 77632 \text{ Nm}$

Snede 3



$$\sum F_x = 0 \Rightarrow N = 0 \text{ N}$$

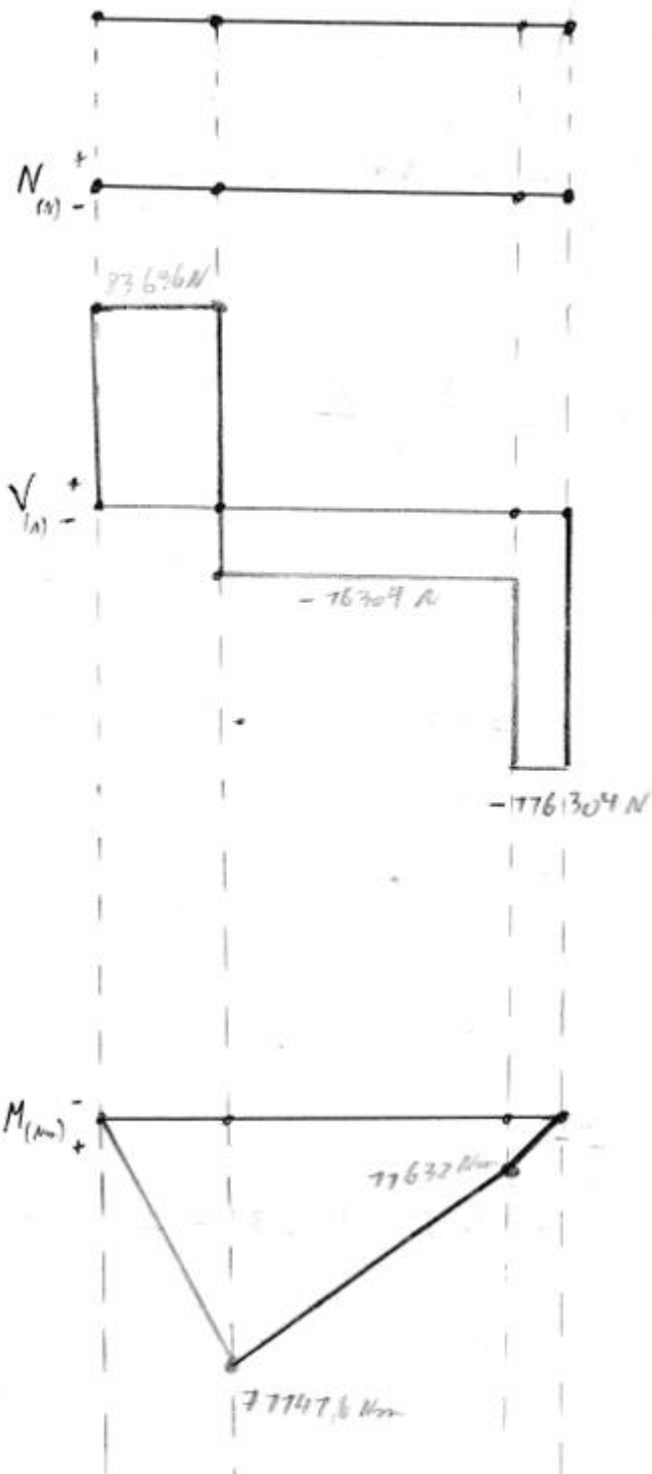
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow 83696 - 100000 - 100000 - V = 0 \Rightarrow V = -776304 \text{ N}$$

$$\sum M_{G3} = 0 \Rightarrow -83696 \cdot x + 100000 \cdot (x - 0,85) + 100000 \cdot (x - 0,85 - 3,65) + M = 0$$

$$\hookrightarrow M(x = 4,5) = 77632 \text{ Nm}$$

$$\hookrightarrow M(x = 4,6) = 0 \text{ Nm}$$

N-, V-, M lijnen opstellen



Spannungen separat in Zweifach geklebte Elemente $\rightarrow$ in B

Normalspannung b.g.v. Biegung

$$\sigma_b = - \frac{M_b \cdot y}{I_z}$$



mit $\left\{ \begin{array}{l} M_b = 77\,147,6 \cdot 10^3 \text{ Nmm} \\ y = 200 \text{ mm} \\ I_z = \frac{b^4}{12} - \frac{(b-2 \cdot d)^4}{12} = \frac{400^4}{12} - \frac{(400-2 \cdot 75)^4}{12} \\ I_z = 57\,753\,2500 \text{ mm}^4 \end{array} \right.$

$$\sigma_b = - \frac{77\,147,6 \cdot 10^3 \text{ Nmm} \cdot 200 \text{ mm}}{57\,753\,2500 \text{ mm}^4} = -24,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Schubspannung b.g.v. Querkraft



$$\tau_n = \frac{V \cdot S_z}{b \cdot I_z}$$

$$\tau_n = \frac{83\,696 \text{ N} \cdot 1,67 \cdot 10^6 \text{ mm}^3}{30 \text{ mm} \cdot 57\,753\,2500 \text{ mm}^4}$$

$$\tau_n = 8,15 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

mit $\left\{ \begin{array}{l} S_z = (200 \cdot 400) \cdot 100 - (175 \cdot 376) \cdot 32,5 \\ S_z = 1,67 \cdot 10^6 \text{ mm}^3 \\ V = 83\,696 \text{ N} \\ b = 30 \text{ mm} \\ I_z = 57\,753\,2500 \text{ mm}^4 \end{array} \right.$

Gesamtwert der Spannungen

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{(-24,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})^2 + 3 \cdot (8,15 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})^2} = 28,62 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Toegelaten spanning

$$\bar{\sigma} = \sigma_{vl} \cdot 0,7 \cdot \frac{2}{3} \quad \text{met} \quad \sigma_{vl, 3399} = 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

||
✓

$$\bar{\sigma} = 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,7 \cdot \frac{2}{3} = 165,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Spanningen vergelijken

$$\sigma_i = 28,62 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{en} \quad \bar{\sigma} = 165,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



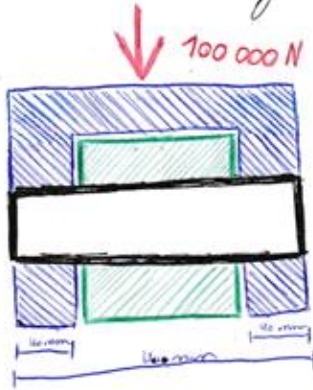
$$\sigma_i < \bar{\sigma} \quad \text{dus ok!}$$

||
✓

$$\bar{\sigma} \approx 5 \cdot \sigma_i$$

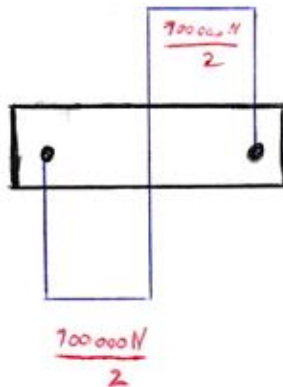
Bijlage B: Sterkteberekening scharnieras

2) Stichtelberekening



Ø 80 mm materiaal C 45

100 000 N



tweezijdige afschuiving

$$\tau_n = \frac{F}{2A}$$

$$\tau_n = \frac{100000 \text{ N}}{2 \cdot 5026,55}$$

$$\tau_n = 9,95 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_n < \bar{\tau}_n \text{ dus OK!} \rightarrow \bar{\tau}_n \approx 15 \cdot \tau_n$$

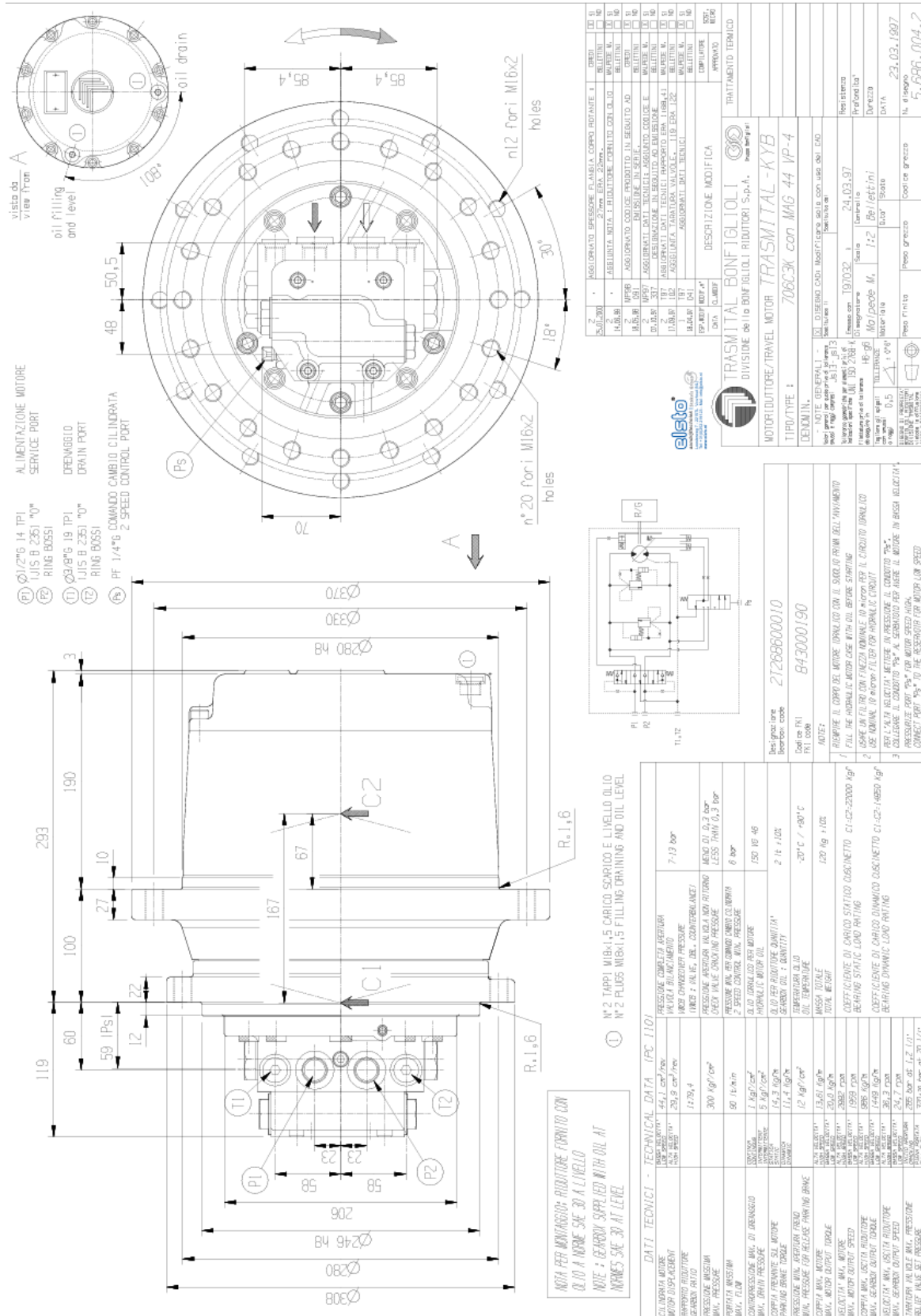
↓
toegestane spanning

$$\bar{\tau}_n = \sigma_{yk} \cdot 0,7 \cdot \frac{2}{3}$$

$$\bar{\tau}_n = 330 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,7 \cdot \frac{2}{3}$$

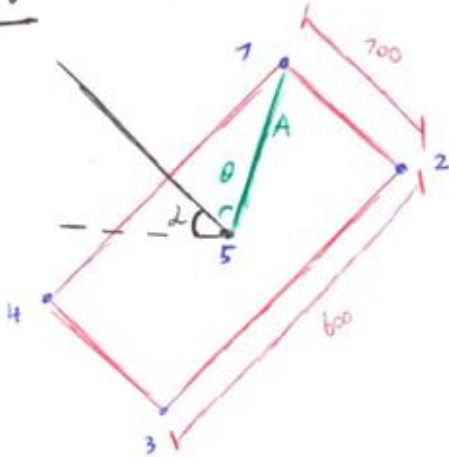
$$\bar{\tau}_n = 154 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bijlage C: Datasheet Bonfiglioli wielmotor



Bijlage D: Wielenplot

LV



Wielen plotter

$$A = \sqrt{500^2 + 300^2}$$

||
v

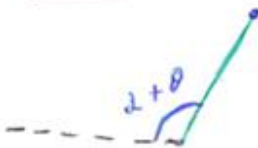
$$A = 304,138$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{300}{500} \right) = 7,47$$

W19 = x wielenmaat punt 5

X19 = y wielenmaat punt 5

LV1



$$x: W19 - 304,138 \cdot \cos(2 + 7,47 \text{ rad})$$

$$y: X19 + 304,138 \cdot \sin(2 + 7,47 \text{ rad})$$

LV2



$$x: W19 - 304,138 \cdot \cos \left(2 + 7,47 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 7,47 \right) \right)$$

$$y: X19 + 304,138 \cdot \sin \left(2 + 7,47 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 7,47 \right) \right)$$

LV3

$$x: W19 + 304,138 \cdot \cos(2 + 7,47 \text{ rad}) \rightarrow \text{spiegelbeeld van LV1 } x$$

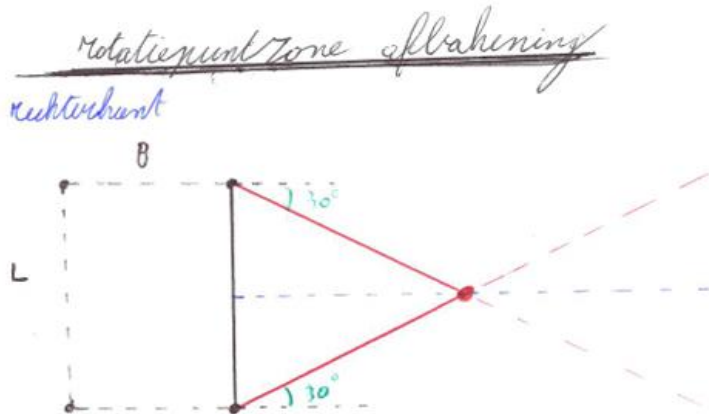
$$y: X19 - 304,138 \cdot \sin(2 + 7,47 \text{ rad}) \rightarrow \text{spiegelbeeld van LV1 } y$$

LV4

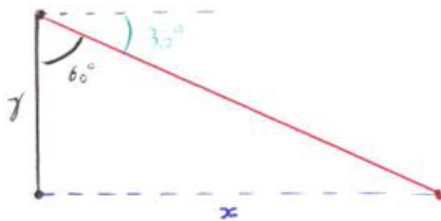
$$x: W19 + 304,138 \cdot \cos \left(2 + 7,47 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 7,47 \right) \right) \rightarrow \text{spiegelbeeld van LV2 } x$$

$$y: X19 - 304,138 \cdot \sin \left(2 + 7,47 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 7,47 \right) \right) \rightarrow \text{spiegelbeeld van LV2 } y$$

Bijlage E: Afbakening rotatiepuntzone

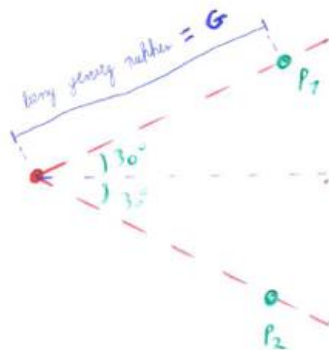


Bovenstaande schets geeft de situatie weer waarbij de rechter wiel op het einde van hun bereik komen ($\rightarrow$ stuurhoek $= -30^\circ$)
 Dit is de kortste draaicirkel die gemaakt kan worden.



$$\tan(60^\circ) = \frac{x}{y} \quad \text{met } y = \frac{L}{2}$$

$$x = \tan(60^\circ) \cdot \frac{L}{2}$$

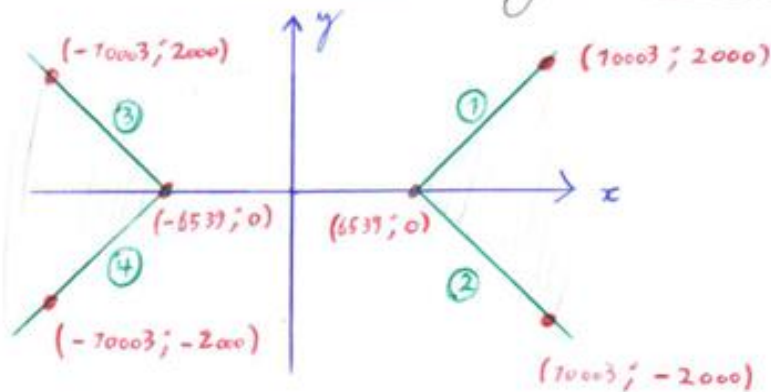


We nemen nu de x en y coördinaten van 2 willekeurige punten die voor de rechter liggen die de rotatiepuntzone afbakenen, de rechten worden gevormd door de maximale stuurhoeken

$$P_1: x = G \cdot \cos(30^\circ); y = G \cdot \sin(30^\circ)$$

$$P_2: x = G \cdot \cos(30^\circ); y = -G \cdot \sin(30^\circ)$$

Notatiepuntreken afbrekening in functieform



Vergelijking opstellen

$$\text{vorm: } y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Rechte ①

$$y - 0 = \frac{2000 - 0}{10003 - 6539} (x - 6539) \rightarrow y_1 = \frac{250}{433} (x - 6539)$$

Rechte ②

$$\dots \dots \dots \rightarrow y_2 = -\frac{250}{433} (x - 6539)$$

Rechte ③

$$\dots \dots \dots \rightarrow y_3 = -\frac{250}{433} (x + 6539)$$

Rechte ④

$$\dots \dots \dots \rightarrow y_4 = \frac{250}{433} (x + 6539)$$

Dus

$$-\infty < x \leq -6539 \text{ of } 6539 \leq x < +\infty$$

$$\text{ALS } x \leq -6539 \quad \text{DAN } \frac{250}{433} (x + 6539) \leq y \leq -\frac{250}{433} (x + 6539)$$

$$\text{ALS } x \geq 6539 \quad \text{DAN } -\frac{250}{433} (x - 6539) \leq y \leq \frac{250}{433} (x - 6539)$$

