

Het potentieel en de impact van gekoppeld rijden op routekeuze en -planning bij transportbedrijven

Thomas Vyncke

Thesis voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master of Science
in de ingenieurswetenschappen:
verkeer, logistiek en intelligente
transportsystemen

Promotor:

Prof. dr. ir. Dirk Cattrysse

Assessoren:

Prof. dr. ir. Alex Van Breedam
Dr. ir. Bart Vannieuwenhuysse

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor als de auteur is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot Centre for Industrial Management, Celestijnenlaan 300A Bus 2422, B-3001 Heverlee, +32-16-322567.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	i
Samenvatting	iii
I Inleiding	1
1 Introductie	3
1.1 Contextbeschrijving	3
1.2 Onderzoeksonderwerp, -vragen en -doelstellingen	6
1.3 Conclusie	7
2 Literatuurstudie	9
2.1 Geautomatiseerde voertuigen	9
2.2 Gekoppeld rijden	11
2.3 Conclusie	26
II Hoofdttekst	27
3 Methodologie	29
3.1 Onderzoeksonderwerp	29
3.2 Onderzoeksvragen en -doelstellingen	30
3.3 Literatuurstudie	31
3.4 Theoretische afleiding en experimenten	31
3.5 Discussie en algemene conclusie	32
3.6 Conclusies	32
4 Basisinzichten	33
4.1 Vereenvoudigingen en assumpties	33
4.2 Potentiële impact op de routekeuze	34
4.3 Impact op de planning	39
4.4 Conclusie	43
5 Theoretisch Model	45
5.1 ‘Best Pair’ heuristiek	45
5.2 Routekeuze	47
5.3 Planningsynchronisatie	50
5.4 Conclusie	51

6 Experimenten	53
6.1 Cirkelvormig netwerk	54
6.2 Het Duitse Autobahn-netwerk	59
6.3 Trans-Europees Transportnetwerk	72
6.4 Conclusie	79
III Conclusies	81
7 Discussie	83
7.1 Gekoppeld rijden als logische stap in de evolutie naar geautomatiseerd vrachttransport	83
7.2 Het effect van gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost van transportbedrijven	83
7.3 Het potentieel en de impact van gekoppeld rijden op de routekeuze en -planning van transportbedrijven	84
7.4 De implementatie van gekoppeld rijden	85
7.5 Verder onderzoek naar gekoppeld rijden	85
8 Algemene conclusie	87
A Introductie: grootte van de Belgische goederenstromen per wegtransport	91
B Literatuurstudie: geautomatiseerde voertuigen	93
B.1 Definitie	93
B.2 Technologische haalbaarheid	95
B.3 Implementatie	98
B.4 Conclusie	99
C Basisinzichten: extra voorbeelden	101
C.1 Impact op de routekeuze	101
C.2 Impact op de planning	103
D Theoretisch model: ondersteunende pseudocode van algoritmes	107
E Experimenten: ondersteunende tabellen	111
Bibliografie	115

Samenvatting

Dit onderzoek ontwikkelt en valideert een algoritme om het potentieel van gekoppeld rijden en de impact ervan op routekeuze en -planning te kwantificeren. Een contextstudie (Hoofdstuk 1) leidt immers tot het inzicht dat gekoppeld rijden een logische stap is bij het implementeren van geautomatiseerde voertuigen.

Een studie van onderzoek en literatuur (Hoofdstuk 2) laat toe het effect van gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost in te schatten. Deze bijdrage onderscheidt drie kostscenario's die respectievelijk 5%, 11% en 15% besparen tijdens gekoppeld rijden.

Het ontwikkelde algoritme (Hoofdstuk 5) bestaat uit een formulering van het routekeuze en vertrektijdstipprobleem bij gekoppeld rijden en een 'Best Pair' heuristiek die een routekeuze heuristiek en vertrektijdstipkeuze probleem integreert.

Dit algoritme leidt, aan de hand van experimenten op zowel artificiële als reële data (Hoofdstuk 6), tot het besluit dat gekoppeld rijden een groot potentieel heeft. Grote bedrijven met meer dan 200 verplaatsingen per week vanuit een gemeenschappelijk vertrekpunt kunnen, gedreven door natuurlijke overlap van routes en planningen, door gekoppeld rijden zo'n 97% van de bovengrens van de besparingen realiseren. Dit komt overeen met een besparing van 4,5% – 5% voor het eerste kostscenario. De impact op routekeuze en -planning is hierbij, tenzij bij tijdsvensters nauwer dan één dag, beperkt. Bij kleinere bedrijven zijn de mogelijke besparingen lager. De natuurlijke overlap van routes en planning is immers veel beperkter. Hierdoor zouden kleine bedrijven, door extra kosten van routewijzingen en planningsynchronisatie, slechts 0% – 2% kunnen besparen. Het effect op de routekeuze en -planning is bij kleine bedrijven dus wel voelbaar. Dit effect is sterk afhankelijk van de aard van de verplaatsingen en moet op basis van 'case-studies' bepaald worden voor elk bedrijf.

De implementatie van gekoppeld rijden (Hoofdstuk 7) zal bijgevolg eerst plaatsvinden in grote bedrijven. Het betrekken van transporteurs, verladers, transportorganisaties en overheden kan het opzetten van enkele pilotprojecten faciliteren. Wanneer gekoppeld rijden succesvol is bij grote bedrijven, kunnen derde partijen gekoppeld rijden binnen kleinere bedrijven – gebruik makend van de synergieën met bedrijven die reeds gekoppeld rijden – organiseren.

Deel I
Inleiding

Hoofdstuk 1

Introductie

Dit hoofdstuk maakt de context, het onderwerp en het belang van het onderzoek duidelijk.

Het start met het schetsen van de context. De context van het onderzoek is de Europese en Belgische vrachttransportsector. De sector heeft momenteel te kampen met enkele uitdagingen. De tekst beschrijft deze uitdagingen in detail en introduceert gekoppeld rijden, het onderzoeksonderwerp, als mogelijk antwoord hierop.

Uit de contextbeschrijving en het onderzoeksonderwerp volgen de onderzoeksvragen en -doelstellingen.

1.1 Contextbeschrijving

De context van dit thesisonderzoek is de Europese en Belgische vrachttransportsector. De vrachttransportsector vertegenwoordigt ongeveer 4.6% van het Europese Bruto Binnenlands Product (BBP) [1]. Het is dus een belangrijke economische sector. In 2013 schatte de Europese Commissie [2] het inlands vrachttransport in de Europese Unie op 2.200 miljard tonkilometer. Wegtransport vertegenwoordigde ongeveer 75% hiervan. Goederentreinen ($\approx 18\%$) en binnenschepen ($\approx 7\%$) namen de overige 25% van het vrachttransport voor hun rekening. Ook voor België is de vrachttransportsector erg belangrijk. De geografische ligging van ons land is interessant voor de import in en export uit heel West-Europa. Dit vertaalt zich in bloeiende zeehavens, een dicht wegennet en een grote transportsector. Appendix A geeft een overzicht van de omvang van de goederenstromen van het wegtransport in België. Dit thesisonderzoek beschouwt enkel vrachttransport over de weg. In de rest van deze thesis zal het woord ‘vrachttransport’ staan voor vrachttransport over de weg.

Enkele belangrijke uitdagingen, zowel intern als extern aan de sector, zorgen ervoor dat de vrachttransportsector een kantelpunt nadert.

1.1.1 Interne uitdagingen

Dit deel beschrijft twee interne uitdagingen die relevant zijn voor dit onderzoek, namelijk het nakend werknemerstekort in de sector en de erg lage verkoopsmarges.

Het nakende werknemerstekort in de vrachttransportsector

Binnen de Europese Unie werken ongeveer 5 miljoen mensen in de vrachttransportsector [3]. In België stelt de sector ongeveer 90.000 mensen te werk. FEBETRA (de Koninklijke federatie van Belgische transporteurs en logistieke dienstverleners) publiceert elk jaar cijfers over de tewerkstelling in de transportsector. Eind 2014 rapporteerden ze een totaal van 87.389 tewerkgestelden waarvan 28.464 bedienden en 58.925 arbeiders. Van deze arbeiders zijn ongeveer 60% chauffeur. De helft van deze groep is ouder dan 45 jaar. Deze cijfers geven een dreigend werknemerstekort aan. [4] [5]

De knelpuntberoepengids die VDAB jaarlijks publiceert [6], beaamt dit. Vrachtwagenchauffeur is een van de zwaarste knelpuntberoepen in België. De kwaliteit van het aanbod chauffeurs, het aantal chauffeurs en het beleid in de sector bemoeilijkt het vinden van geschikte werkkrachten.

Ook elders kampt men met dit probleem. In Nederland schatte het VTL, het Nederlands sectorinstituut voor Transport en Logistiek, het chauffeurstekort op 50.000 in 2015 [7]. In het Verenigd Koninkrijk schat de Freight Transport Association (FTA) het huidige arbeidstekort op 45.000 [8] chauffeurs. In de Verenigde Staten maakte Bob Costello, hoofdeconoom van de American Trucking Association (ATA), in 2014 op de jaarlijkse 'ATA Management Conference & Exhibition' bekend [9] dat er een chauffeurstekort van 35.000 tot 40.000 chauffeurs dreigt.

De lage verkoopsmarges in de vrachttransportsector

Lage marges kenmerken de transportsector over de hele wereld. In België is dit niet anders. Kenners hanteren momenteel netto verkoopmarges van -2% tot 2% als vuistregel. De beslissing om de kilometerheffing voor vrachtwagens in te voeren legt een nog hogere druk op deze marges. De Koninklijke federatie van Belgische transporteurs en logistieke dienstverleners (FEBETRA), vermeldt:

De impact is aanzienlijk. Voor het algemeen nationaal vervoer stijgt de kostprijs van een transport met gemiddeld 7,94%. Voor stukgoed bedraagt dit gemiddelde 8,02%. (...) Omwille van de uiterst krappe marges in de transportsector zullen vervoerders dus geen andere keuze hebben dan deze aanzienlijke meerkost door te rekenen. [10]

1.1.2 Externe uitdagingen

Het voorgaande beschrijft enkele interne tendensen die de vrachttransportsector uitdagen. Enerzijds heeft de sector te kampen met een tekort aan werkkrachten.

Anderzijds is er een stevige druk op de winstmarges van bedrijven in de sector. Er is echter nog een bijkomende externe druk vanuit de Europese Commissie.

De Europese Commissie heeft als doel de maatschappelijke kost van de vrachttransportsector te verlagen. Er zijn enkele investeringsprogramma's [11] opgericht met als doel:

- **Innovatie in de transportsector aansporen**

De transportsector is, door de kritieke toestand hierboven beschreven, een sector met weinig innoveringsvermogen. Transportbedrijven hebben gemiddeld oude werkkrachten en weinig 'cash-on-hand'. Europa wil dit veranderen door beginnende, innovatieve bedrijven in de vrachttransportsector te steunen.

- **Het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen**

Transport vertegenwoordigt een significant deel van de totale Europese uitstoot van broeikasgassen. De transportsector is de op één na grootste uitstoter (24,3% van de totale uitstoot in 2012) van deze gassen. De wegtransportsector vertegenwoordigt ongeveer 70% hiervan. Dit betekent dat het Europese vrachttransport ongeveer 17% van de broeikasgasemissies in Europa uitstoot. De Commissie stelt als concreet doel tegen 2030 de Europese uitstoot van koolstofdioxide te verminderen met 20% met 2008 als basisjaar.

- **Het verhogen van de verkeersveiligheid**

Een belangrijk doel is dat er in 2050 geen verkeersslachtoffers vallen. De Europese Unie wil tegen 2020 het aantal verkeersdoden halveren ten opzichte van het jaar 2011.

- **Het verlagen van de filekost**

De file op de wegen neemt alsmaar toe en vertegenwoordigt een groot deel van de maatschappelijke kost van wegvervoer. Europa moedigt initiatieven aan die de file kunnen verminderen. Voorbeelden hiervan zijn initiatieven om vervoer correct te beprijzen, technologieën die de capaciteit van wegen verhogen en cetera.

1.1.3 Conclusies

De contextbeschrijving van de vrachttransportsector maakt duidelijk dat deze een kantelpunt nadert. De sector staat onder extreme druk. Een nakend werknemerstekort en lage verkoopsmarges zorgen voor druk van binnenuit. Tezelfdertijd spoort de Europese Commissie aan op het verlagen van de maatschappelijke kost van de sector.

Dit zorgt ervoor dat er nood is aan vernieuwingen binnen de sector die helpen om het hoofd te bieden aan deze uitdagingen. Deze bijdrage onderzoekt een veelbelovende vernieuwing, namelijk gekoppeld rijden.

1.2 Onderzoeksonderwerp, -vragen en -doelstellingen

Dit thesisonderzoek heeft als doel een academische bijdrage te leveren om het hoofd te helpen bieden aan de uitdagingen binnen de vrachttransportsector.

Uit voorbereidend onderzoek van persberichten en literatuur bleek dat de toenemende automatisering van voertuigen een tendens is die alle eerder genoemde uitdagingen kan aanpakken. Verder onderzoek, gedreven door persoonlijke interesse en academische achtergrond, leidde tot het vernauwen van de focus naar het potentieel van gekoppeld rijden en meer specifiek de effecten hiervan op de routekeuze en planning van transportbedrijven. De literatuurstudie verduidelijkt deze vernauwing verder.

Gekoppeld rijden is een rijregime waarbij verschillende geautomatiseerde voertuigen mekaar op korte afstand volgen en zo een ‘trein’ op de weg vormen. Dit heeft voor de hand liggende voordelen zoals een vermindering van brandstofkosten en personeelskosten, maar ook minder voor de hand liggende voordelen zoals een verhoging van de wegcapaciteit. Aan de andere kant zijn er ook enkele uitdagingen verbonden met het implementeren van gekoppeld rijden op de openbare weg. Deze voor- en nadelen kunnen een effect hebben op de routekeuze en planning van transportbedrijven.

1.2.1 Onderzoeksvragen

Om het onderzoek vorm te geven zijn onderzoeksvragen erg belangrijk. Vanuit het concreet onderzoeksonderwerp zijn drie onderzoeksvragen opgesteld.

1. Is gekoppeld rijden een logische stap in de evolutie naar geautomatiseerde voertuigen in de vrachttransportsector?
2. Welk effect heeft gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost van transportbedrijven?
3. Wat is het besparingspotentieel van gekoppeld rijden en welk effect heeft dit op de routekeuze en -planning van transportbedrijven?

1.2.2 Onderzoeksdoelstellingen

Concrete onderzoeksdoelstellingen helpen om op een efficiënte manier de onderzoeksvragen te beantwoorden. De doelstellingen geven meer duidelijkheid over de onderzoeksrichting en leiden tot een hogere specificiteit dan het formuleren van bijkomende ondergeschikte onderzoeksvragen.

Onderzoeksvraag 1 Is gekoppeld rijden een logische stap in de evolutie naar geautomatiseerde voertuigen in de vrachttransportsector?

- Beschrijven van de huidige status van ontwikkeling van geautomatiseerde voertuigen

- Onderzoeken of gekoppeld rijden past binnen de implementatie van geautomatiseerde voertuigen in de vrachttransportsector

Onderzoeksvraag 2 Welk effect heeft gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost van transportbedrijven?

- Kwalitatief beschrijven van het effect van gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost
- Kwantificeren van het effect van gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost

Onderzoeksvraag 3 Wat is het besparingspotentieel van gekoppeld rijden en welk effect heeft dit op de routekeuze en -planning van transportbedrijven?

- Opzetten van enkele theoretische experimenten
- Toetsen van de bevindingen uit deze theoretische voorbeelden aan reële data

1.3 Conclusie

De Europese, en meer specifiek Belgische, wegtransportsector heeft te kampen met zowel interne als externe uitdagingen. Reageren op deze uitdagingen is een prioriteit. Dit thesisonderzoek tracht hiertoe een steentje bij te dragen. Een onderzoek naar het potentieel van gekoppeld rijden en de effecten ervan op routekeuze en -planning gaat na of gekoppeld rijden, zoals velen suggereren, inderdaad een logische stap is bij de implementatie van geautomatiseerde voertuigen.

Hoofdstuk 2

Literatuurstudie

Dit hoofdstuk geeft een overzicht en kritische reflectie van bestaand onderzoek en bestaande literatuur over gekoppeld rijden. Het eerste deel van de literatuurstudie richt zich tot het beantwoorden van de eerste onderzoeksvraag. Het deel beschrijft geautomatiseerde voertuigen en bespreekt hun huidige staat van ontwikkeling en implementatie op de openbare weg. Hieruit blijkt dat, hoewel volledig geautomatiseerde voertuigen (niveau 4, cfr. infra) technisch haalbaar zijn, het nog even zal duren voor de implementatie op de openbare weg plaatsvindt. De regelgeving, infrastructuur en publieke opinie zijn hier immers nog niet klaar voor.

Het tweede deel beschrijft gekoppeld rijden in detail. Een overzicht en kritische reflectie van eerder onderzoek en literatuur beantwoorden de tweede onderzoeksvraag. Een inleiding tot de derde onderzoeksvraag maakt de brug naar de hoofdtekst van dit onderzoek.

2.1 Geautomatiseerde voertuigen

Dit deel definieert geautomatiseerde voertuigen en bespreekt de technologische haalbaarheid en implementatie ervan. Appendix B beschrijft al deze zaken meer in detail.

2.1.1 Definitie

De Amerikaanse organisatie voor snelwegveiligheid ‘National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)’ definieert geautomatiseerde voertuigen als ‘voertuigen waarbij bepaalde aspecten van controlefuncties van veiligheidssystemen kunnen uitgevoerd worden zonder directe input van de chauffeur’ [12]. De organisatie verfijnt deze definitie door geautomatiseerde voertuigen op te splitsen in vijf niveaus op basis van de graad van automatisatie.

- Niveau 0 —Geen automatisatie

- Niveau 1 —Functiespecifieke automatisatie
- Niveau 2 —Gecombineerde functiespecifieke automatisatie
- Niveau 3 —Beperkte zelfrijdende automatisatie
- Niveau 4 —Volledige zelfrijdende automatisatie

Andere organisaties hanteren dezelfde of een gelijkaardige definitie. SAE International, een kenniscentrum omtrent ingenieurspraktijken in mobiliteit, definieert in totaal zes niveaus [13]. Het splitst niveau 3 op in twee verschillende niveaus. Deze extra opsplitsing is echter eerder arbitrair. Voor het vervolg van het onderzoek gaat de tekst uit van de indeling gedefinieerd door het NHTSA.

2.1.2 Technologische haalbaarheid

Geautomatiseerde voertuigen vereisen gespecialiseerde technologie. Deze technologie is op te splitsen in verschillende domeinen.

- Boordsensoren
- Omgevingsperceptie
 - Infrastructuur- en markeringsdetectie
 - Objectdetectie
- Locatiebepalingssystemen
- Telecommunicatiesystemen
 - ‘Vehicle-to-vehicle’
 - ‘Vehicle-to-infrastructure’
 - ‘Vehicle-to-objectX’
- Primaire controlesystemen

Geautomatiseerde voertuigen zijn een amalgaam van deze opgelijste technologieën. Verschillende test- en pilootprojecten (zie ook sectie 2.2 van dit hoofdstuk) hebben reeds aangetoond dat deze technologieën voldoende op punt staan.

2.1.3 Implementatie

Hoewel de geavanceerde technologie reeds in grote mate op punt staat, is deze nog niet verspreid in het verkeer. Dit heeft enkele redenen. De meest relevante redenen voor dit onderzoek zijn:

- Er is geen concreet wetskader
- Er is geen aangepaste infrastructuur

- De kostprijs van geautomatiseerde voertuigen is hoog
- Er is weinig consumentenvertrouwen in geautomatiseerde voertuigen

Het gedetailleerd onderzoeken van deze zaken valt buiten de scope van dit onderzoek, maar vooral het wetskader en het consumentenvertrouwen vormen een probleem voor een snelle implementatie. Dit pleit voor een geleidelijke implementatie van geautomatiseerde voertuigen in de vrachttransportsector. Gekoppeld rijden komt naar voor als één van de oplossingen bij uitstek. Dit heeft drie belangrijke redenen, met name:

- Gekoppeld rijden is erg schaalbaar over de verschillende niveaus van geautomatiseerde voertuigen heen
- Gekoppeld rijden is veelvuldig onderzocht
- Gekoppeld rijden biedt een antwoord op ongeveer elk actueel pijnpunt van de transportsector

2.2 Gekoppeld rijden

Uit de vorige sectie bleek dat de implementatie van gekoppeld rijden op de autosnelweg een logische stap is in de evolutie naar volledig geautomatiseerd vrachttransport. Veel specialisten zijn hier ook van overtuigd. Claes Avedal, Safety Manager bij Volvo Trucks, vertelt in een interview voor het tijdschrift ‘Transport Business’[14] dat hij en andere experts geloven dat:

“... een stap-voor-stap introductie van meer en meer geautomatiseerde vrachtwagens de verkeersveiligheid, het brandstofverbruik en de fileproblematiek sterk zal verbeteren. [14]”

Deze sectie poneert een definitie van gekoppeld rijden. Daarna wordt besproken hoe gekoppeld rijden tot stand komt en welke pilootprojecten er reeds zijn uitgevoerd. Deze pilootprojecten hebben geleid tot kennis rond de voor- en nadelen van gekoppeld rijden. Een SWOT analyse bespreekt deze voor- en nadelen. Na deze kwalitatieve benadering hiervan volgt een kwantitatieve studie van de impact van gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost. De verandering in voertuigkilometerkost kan een invloed hebben op de routekeuze en -planning. Deze invloed is deel van de kern van dit onderzoek. De sectie besluit met een samenvatting van de bestaande literatuur hierover.

2.2.1 Definitie

Deze tekst hanteert volgende definitie van gekoppeld rijden:

Gekoppeld rijden is een rijregime waarbij verschillende geautomatiseerde voertuigen mekaar op korte afstand volgen en zo een ‘trein’ op de weg vormen.

Deze definitie laat een zekere vrijheid van invulling toe. Afhankelijk van het niveau van automatisatie van de voertuigen die gekoppeld rijden, kan men verschillende verschijningsvormen onderscheiden. Dit onderzoek beschouwt drie verschijningsvormen die kunnen optreden met vrachtwagens. Verschijningsvormen met personenwagens vallen buiten de scope van dit onderzoek.

- **Niveau 2 geautomatiseerde voertuigen**

Bij geautomatiseerde voertuigen van niveau 2 zullen de vrachtwagens tijdens gekoppeld rijden steeds een bestuurder hebben. De actieve voertuigcontrole kan in de gecontroleerde omgeving van gekoppeld rijden op de autosnelweg aan het voertuig worden overgelaten. Dit kan echter enkel op voorwaarde dat de bestuurder steeds beschikbaar is om binnen enkele seconden de controle over het voertuig terug over te nemen.

- **Niveau 3 geautomatiseerde voertuigen**

Dit niveau van automatisatie laat bestuurders toe om te rusten en hun aandacht weg te nemen van de rij-activiteit tijdens gekoppeld rijden. Louter uitzonderlijk – en met hoge transitietijd – zal hun aandacht op het rijden vereist zijn. Om de verkeersveiligheid te garanderen zal de bestuurder van het eerste voertuig steeds beschikbaar moeten zijn om in enkele seconden tijd de actieve controle over het voertuig terug over te nemen.

- **Niveau 4 geautomatiseerde voertuigen**

Volledig automatische voertuigen vereisen geen bestuurder om in wegtreinverband te opereren. Toch kan er voor de veiligheid in het eerste voertuig een bestuurder aanwezig zijn die in geval van nood kan ingrijpen om de veiligheid van de weggebruikers in de buurt van de wegtrein te garanderen.

Het feit dat de bestuurder van het leidende voertuig steeds een rol vervult die overeenkomt met een lager niveau van automatisatie is een louter redundante veiligheidsmaatregel. De wegtreinen gaan immers opereren op de openbare weg in interactie met reguliere of weinig geautomatiseerde voertuigen.

2.2.2 Vorming

Het vormen van gekoppeld rijden is een complex gegeven. Dit onderzoek maakt voor de beslissing van gekoppeld rijden onderscheid tussen ‘ad hoc’ en ‘ex ante’ vormingsstrategieën.

‘Ad Hoc’ strategie

Met ‘ad hoc’ wordt bedoeld dat de beslissing om gekoppeld te rijden plaatsvindt tijdens de verplaatsing onder gedecentraliseerde controle. Rijdende vrachtwagens communiceren met elkaar en gaan gekoppeld rijden indien dit wederzijds voordelig is. Dit impliceert echter vaak coöperatie tussen bestuurders van verschillende bedrijven, infrastructuraanpassingen en het delen van informatie over bestemmingen tussen

verschillende voertuigen. Dit is vaak moeilijk om ‘on-the-fly’ te doen. Het billijk verdelen van de winsten door gekoppeld rijden over de verschillende deelnemende voertuigen is ook een uitdaging.

‘Ex Ante’ strategie

Het werkstuk gaat wegens pragmatische redenen uit van een ‘ex ante’ strategie. Dit betekent dat de beslissing om gekoppeld te rijden plaatsvindt voor de verplaatsing begint. Een onderscheid is te maken tussen:

- **‘Ex ante’ strategie door één partij**
Hierbij organiseert één partij het gekoppeld rijden intern in het bedrijf. Dit gaat dan bijvoorbeeld over een transportbedrijf dat zelf gekoppeld rijden regelt tussen eigen voertuigen.
- **‘Ex ante’ strategie tussen N verschillende partijen**
Hierbij werken N partijen samen om gekoppeld te rijden alvorens hun verplaatsing te starten. Dit probleem vertoont vele interessante parallellen met het carpool probleem. Dit is een computationeel NP-moeilijk probleem waarvoor zowel exacte oplossingsmethodes [15] als heuristische [16] zijn gepubliceerd. Wanneer verschillende partijen samen werken om gekoppeld te rijden, komen hier ook speltheoretische aspecten bij kijken. Indien twee bedrijven zich engageren tot het vormen van een wegtrein, moet het vormen van gekoppeld rijden een voordelige strategie zijn. Bovendien moet het in stand houden van gekoppeld rijden ook een voordelige strategie zijn. Dit zijn respectievelijk de participatie- en continuïteitsvoorwaarden. Speltheorie kan deze verschillende interacties modelleren met een zogenaamde ‘atomic congestion game’, zoals Farokhi en Johansson (2015) onderzochten [17].

Dit onderzoek focust initieel op de ‘ex ante’ strategie door één partij. Hiervoor is geen coöperatie tussen verschillende bedrijven vereist. Door coöperatie is er waarschijnlijk meer voordeel te boeken, maar het brengt de nood aan complexe communicatie, alsook mogelijk infrastructuraanpassingen met zich mee. Daarom is de implementatievolgorde van de besproken strategieën waarschijnlijk de volgende:

1. ‘Ex Ante’ strategie door één partij
2. ‘Ex Ante’ strategie tussen N verschillende partijen
3. ‘Ad Hoc’ strategie

Fysieke vorming

Voor de fysieke vorming van gekoppeld rijden zijn er veel mogelijkheden. Hall en Chin (2005) [18] stellen in hun onderzoek de vorming op opritten voor. Dao (2008) [19] stelt een methode voor om de vorming van gekoppeld rijden gecontroleerd op de autosnelweg te doen. Het is echter ook mogelijk om gekoppeld rijden te vormen op een carpoolparking, bij een tankstation, een depot, een distributiecentrum, ...

2.2.3 Pilootprojecten

De voorbije 15 jaar zijn er enkele grote pilootprojecten georganiseerd met gekoppeld rijden, uitgaande van verschillende vormingstrategieën. Er volgt een opsomming, gebaseerd op Bergenheim et al. (2012) [20] van de meest relevante projecten voor deze thesis.

- **Promote Chauffeur**
Een door Europa gesteund project binnen het ‘Telematics Application Programme’. Het project bestond uit twee delen en had vooral als doel de technische haalbaarheid van wegtreinen te onderzoeken en te verbeteren. [21]
- **SARTRE (Safe Road Trains for the Environment)**
Een project [22] dat liep van 2009 tot 2012. Het was gedeeltelijk gefinancierd via de Europese Commissie. Het onderzocht gekoppeld rijden van een mix van vracht- en personenwagens. Het project onderzocht hoe dit soort wegtreinen kunnen geïmplementeerd worden met minieme infrastructuuraanpassingen.
- **PATH**
PATH is een project uitgevoerd door de universiteit van Californië. Het was een van de eerste onderzoeken binnen dit domein (2004) en beschouwde twee voertuigen die elektronisch gecontroleerd reden met tussenafstanden van 3 tot 10 meter. De gemiddelde brandstofbesparingen lagen rond de 10% [23].
- **KONVOI**
Een interdisciplinair project dat liep van 2005 tot 2009 aan de RWTH Universiteit Aachen. Het onderzoek besteedde specifieke aandacht aan de invloed van de automatisatie op het rijgedrag van de chauffeur. Het onderzoek stelde geen verontrustende invloeden vast [24].
- **Energy ITS**
Een Japans project, opgestart in 2008 en beëindigd in 2012, dat ITS technologie wil gebruiken om energie beter te benutten. Ook heeft het project als doel het nakend tekort aan vrachtwagenchauffeurs aan te pakken.
- **GCDC (Grand Cooperative Driving Challenge)**
Een Nederlandse wedstrijd met als doel om de doorstroom van verkeer te verbeteren door het toepassen van gekoppeld rijden. Er worden coöperatieve voertuigsystemen gedemonstreerd. De focus ligt op V2V en V2I communicatie en gebruik van hoogwaardige sensoren.
- **COMPANION (Cooperative mobility solution for supervised platooning)** Een project met Europese steun dat geleid wordt door SCANIA. In de literatuur spreekt men dan ook vaak over het ‘SCANIA Project’ (zie [20]). Het project onderzoekt de dynamische vorming van wegtreinen bestaande uit zware vrachtwagens met als doel de emissies van broeikasgassen te verlagen. [25]

Tabel 2.1 geeft een overzicht dat het ITS World Congress in 2012 [20] publiceerde van enkele onderzoeken.

Tabel 2.1: Overzicht van verschillende onderzoeken naar platooning. Het voertuigtype kan drie verschillende waarden aannemen: W (wagens), Z (zware vrachtwagens), M (mixed) en W/Z (wagens of zware vrachtwagens). Voor de controle van de wegtrein onderscheidt men longitudinale controle (Long), laterale controle (Lat) of beiden. Het gebruik van zogenaamde ‘Next-gen’ sensoren duidt aan dat het om erg dure sensoren gaat die nog niet in de massaproductie fase zijn.

Onderzoek	Voertuigtype	Controle	Infrastructuur	Verkeersintegratie	Sensoren
SARTRE	M	Lat + Long	Geen	Snelweg, gemengd	Productie
PATH	W/Z	Lat + Long	Oppervlakmarkering	Apart baanvak	Gemengd
GCDC	M	Long	GPS+	Gemengd	Next-gen
Energy-ITS	Z	Lat + Long	Vakmarkering	Apart baanvak	Next-gen
COMPANION	Z	Long	Geen	Snelweg, gemengd	Geen V2V

In het kader van dit onderzoek is het COMPANION project het interessantst. Het gaat uit van gekoppeld rijden van enkel zware vrachtwagens, die longitudinaal gecontroleerd worden en geen extra infrastructuur of complexe sensorische of communicatiesystemen vereisen.

2.2.4 SWOT analyse

De pilootprojecten, besproken in vorig deel, leidden tot kennis over de voor- en nadelen van gekoppeld rijden. De SWOT-analyse in dit deel geeft een overzicht van deze verschillende voor- en nadelen, zonder toe te spitsen op een bepaalde verschijningsvorm.

Tabel 2.2: SWOT analyse van gekoppeld rijden door logistieke bedrijven

<p>Sterktes</p> <p>Minder brandstofverbruik</p> <p>Een lagere personeelskost</p>	<p>Zwaktes</p> <p>Een complex systeem</p> <p>Weinig consumentenvertrouwen</p> <p>Set-up kost van gekoppeld rijden</p> <p>Verkeershinder</p>
<p>Opportunities</p> <p>Flexibelere planning (nachttransport e.d.)</p> <p>Verhoogde wegcapaciteit</p> <p>Verhoging verkeersveiligheid</p>	<p>Gevaren</p> <p>Weerstand van vakbonden</p> <p>Complexe regelgeving nodig</p> <p>Infrastructuraanpassing nodig</p>

Sterktes

- **Minder brandstofverbruik**

Bij het rijden in een wegtrein komt het verminderde brandstofverbruik voort

uit de verlaagde lucht- en rolweerstand die vrachtwagens in een wegtrein ervaren. Het PATH onderzoeksprogramma in Californië [23] onderzocht in 2004 het brandstofverbruik van een wegtrein met twee vrachtwagens, een zogenaamde tandem. Dit resulteerde voor het leidend voertuig in een verlaging van brandstofgebruik van 5%. Voor het volgend voertuig leidde dit tot een vermindering van 10-15%. Deze cijfers zijn echter afhankelijk van weg- en weercondities. Een demonstratie in Japan waarbij vier vrachtwagens aan 80 $\frac{km}{u}$ reden met een tussenafstand van vier meter [26] toonde een gemiddelde brandstofbesparing van 15% aan. De vertaling hiervan naar de kilometerkost gebeurt in een volgend deel. De verlaging van het brandstofverbruik werkt ook een verlaging van de CO₂ emissies [27] in de hand.

- **Lagere personeelskost**

Dit is erg afhankelijk van de implementatievorm. Bij geautomatiseerde voertuigen van niveau 2 is er geen lagere personeelskost aangezien de aandacht ten allen tijde op de weg moet worden gehouden. Bij niveau 3 geautomatiseerde voertuigen zouden de vrachtwagenchauffeurs hun verplichtte rusttijd al rijdend kunnen opnemen. Dit verlaagt de personeelskost per gereden kilometer. Bij niveau 4 geautomatiseerde voertuigen zou een bestuurder zelfs niet meer nodig zijn. Bijgevolg zou de personeelscomponent in de voertuigkilometerkost verwaarloosbaar zijn.

Zwaktes

- **Complex systeem**

Gekoppeld rijden brengt allerlei extra kosten met zich mee. De technologie, in een eerder deel uitgelegd, in zo'n systeem kost veel geld om te ontwikkelen en op de markt te brengen.

- **Weinig consumentenvertrouwen**

In een Europees onderzoek [28] verklaart 52% van de respondenten zich 'Totaal oncomfortabel' bij geautomatiseerd goederenvervoer door vrachtwagens. Een implementatie van geautomatiseerd goederenvervoer zal dus in de huidige context tot protest leiden.

- **Set-up kost van gekoppeld rijden**

Het opzetten van gekoppeld rijden kost geld. Dit is voornamelijk de tijdskost die overeen komt met het vormen van de wegtrein. Afhankelijk van de concrete implementatie kunnen er ook nog monetaire set-up kosten optreden, bijvoorbeeld betalingen aan een mogelijke service provider die gekoppeld rijden regelt.

- **Verkeershinder**

Gekoppeld rijden kan verkeershinder veroorzaken. De dichte opeenvolging van vrachtwagens maakt het voor andere weggebruikers moeilijker om in te voegen bij op- of afritten. Daarom beschouwt dit onderzoek maximaal drie vrachtwagens die samen gekoppeld rijden.

Opportunities

- **Flexibeler planning**

Dit kan mee bijdragen tot een lagere piekbelasting van de weg. Geautomatiseerde voertuigen kunnen nachttransport veel goedkoper maken waardoor de spits kan worden ontlast.

- **Verhoogde wegcapaciteit**

Vrachttransport kan enerzijds flexibeler gebeuren in tijd (zie vorige paragraaf), anderzijds nemen volgens simulaties van Zhao en Sun [29] vrachtwagens tijdens gekoppeld rijden minder plaats in.

- **Verhoogde verkeersveiligheid**

Menselijke fouten liggen in meer dan 90% van de verkeersongevallen (deels) aan de basis van het ongeval [30]. Het wegnemen van menselijke voertuigcontrole kan dus een positieve invloed hebben op de verkeersveiligheid. Er gaan wel stemmen op dat er extra gevaar is door potentiële cyberaanvallen. Dit valt echter buiten de scope van dit werkstuk.

Gevaren

- **Weerstand van vakbonden en lobbygroepen**

Een commerciële introductie van gekoppeld rijden zal waarschijnlijk op weerstand van vakbonden binnen de vrachttransportsector botsen omdat er door gekoppeld rijden minder chauffeurs nodig zijn. Ook lobbygroepen voor spoor- en binnenvaartvracht zullen zich afzetten tegen gekoppeld rijden omdat gekoppeld rijden een competitief voordeel kan genereren voor wegtransport tegenover spoortransport of binnenvaart. Een verdere evaluatie hiervan valt buiten de scope van deze thesis.

- **Nood aan complexe regelgeving**

In sommige landen zijn er aangepaste wetskaders voor het testen van gekoppeld rijden. Tot op heden zijn er nog geen concrete wetskaders voor de implementatie op de weg. Waarschijnlijk dient het verkeersreglement enkele wijzigingen te doorgaan in functie van een kwaliteitsvolle implementatie van gekoppeld rijden. Een verder onderzoek hierover valt buiten de scope van dit onderzoek.

- **Nodige infrastructuuraanpassingen**

Geautomatiseerde tolweg systemen, aangepaste baanvakken en dergelijke kunnen bijdragen tot het goed functioneren van gekoppeld rijden. De rest van het onderzoek maakt hier abstractie van.

Het is duidelijk dat gekoppeld rijden op belangrijke vlakken een effect zal hebben. Dit thesisonderzoek focust zich op het effect op de voertuigkilometerkost en de impact van dit effect op de routekeuze en planning van transportbedrijven.

2.2.5 Impact op de voertuigkilometerkost

De besproken voor- en nadelen hebben een impact op de voertuigkilometerkost. Dit deel kwantificeert deze impact van gekoppeld rijden op de kost per voertuigkilometer. Eerst beschrijft de tekst de voorspelde voertuigkilometerkost voor 2020. Gesprekken met logistieke professionals bevestigen dat dit een geaccepteerde schatting is. Gekoppeld rijden zal deze kosten echter veranderen. De veranderingen zijn afhankelijk van de implementatie. Dit onderzoek beschouwt drie scenario's gebaseerd op de 'white paper' (2015) [31] van TNO, een onafhankelijke kennisorganisatie.

Voertuigkilometerkost

De kostenstructuur binnen de sector verschilt uiteraard van bedrijf tot bedrijf en van land tot land. In het kader van een onderzoek voor de Vlaamse overheid kwantificeerde Transport & Mobility Leuven (TML) [32] in 2008 de kosten per voertuigkilometer in de vrachttransportsector met behulp van het TREMOVE model. Deze kosten extrapoleerden ze naar 2020. De voorspelde voertuigkilometerkosten voor vrachtwagens >32 ton zijn samengevat in tabel 2.3.

Tabel 2.3: Voorspelde kost per voertuigkilometer

	Kilometerkost 2020
Loonkost	€ 0,42
Brandstofkost	€ 0,24
Aankoopkost	€ 0,22
Onderhoud en verzekering	€ 0,13
Verkeersbelasting + Eurovignet	€ 0,02
BIV en verzekeringsbelasting	€ 0,00
Totaal	€ 1,03

Uit deze tabel blijkt dat de loon- en brandstofkost samen zo'n 64% van de totale loonkost vertegenwoordigen. Initiatieven die deze kosten verlagen hebben dus een grote impact op de kostenstructuur van vrachttransport.

De kilometerheffing, ingevoerd op 1 april 2016, is nog niet inbegrepen in bovenstaande overzicht. Tabel 2.4 vat de tarieven [33] hiervan samen voor vrachtwagens >32 ton.

Tabel 2.4: Kilometerheffing in Vlaanderen voor vrachtwagens >32 ton

Kilometerheffing	
Euronorm 0	€ 0,200
Euronorm 1	€ 0,200
Euronorm 2	€ 0,200
Euronorm 3	€ 0,180
Euronorm 4	€ 0,149
Euronorm 5	€ 0,128
Euronorm 6	€ 0,128

Het vervolg van dit onderzoek beschouwt een uniforme verdeling van vrachtwagens van >32 ton van Euronorm 2 tot en met Euronorm 6. Dit leidt tot een gemiddelde kilometerheffing van €0,157 per voertuigkilometer, die ook de wegbelasting en het Eurovignet bevat. Het vervolg beschouwt deze kilometerheffing als een extra kost die representatief is voor het hele traject van de vrachtwagens. Dit leidt tot de volgende kosten per voertuigkilometer:

Tabel 2.5: Veronderstelde kost per voertuigkilometer

Kilometerkost 2020	
Loonkost	€ 0,42
Brandstofkost	€ 0,24
Aankoopkost	€ 0,22
Kilometerheffing	€ 0,157
Onderhoud en verzekering	€ 0,13
Totaal	€ 1,167

Gekoppeld rijden zal een besparing tot gevolg hebben op de loonkost, de brandstofkost en de onderhoud- en verzekeringskost. De aankoopkost gaat echter toenemen. De kost van de kilometerheffing wordt verondersteld niet te wijzigen. Het vervolg veronderstelt dat de verlaging van de onderhoud- en verzekeringskost en de verhoging van de aankoopkost mekaar opheffen. Bijgevolg zal enkel het effect op de loonkost en brandstofkost in rekening worden gebracht in de rest van het onderzoek.

Volgende kostscenario's kwantificeren de invloed van gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost en vormen zo een antwoord op de tweede onderzoeksvraag.

Scenario 0

Kostscenario 0 is het scenario zonder gekoppeld rijden. De kosten hiervan werden gedetailleerd besproken in vorig deel en samengevat in Tabel 2.5.

Scenario 1

Dit scenario beschouwt een tandem van voertuigen. Het gaat ervan uit dat chauffeurs hun rusttijd kunnen opnemen tijdens het gekoppeld rijden. De wettelijk verplichte rusttijd bedraagt 45 minuten. Aangezien deze rusttijd al rijdend kan doorgebracht worden in scenario 1, verlaagt de loonkost per voertuigkilometer met $1 - \frac{8,25u}{9u} \approx 8\%$. Ditzelfde resultaat wordt bekomen door TNO [31]. Dit komt neer op een loonkost van € 0,385 per voertuigkilometer.

De brandstofbesparingen voor de leider zijn in dit scenario gemiddeld 5%, voor de volger gemiddeld 15%. Dit komt overeen met een brandstofkost van respectievelijk € 0,228 en € 0,204 per voertuigkilometer.

Verondersteld wordt dat de (negatieve) invloed van gekoppeld rijden op de aankoopkost, de (positieve) invloed op de kost voor onderhoud en verzekering exact zal compenseren en dat er geen extra netto kosten komen kijken bij gekoppeld rijden. Het kostenplaatje van scenario 1 ziet er dus als volgt uit:

Tabel 2.6: Veronderstelde voertuigkilometerkost in 2020 van scenario 1 als leider en volger tijdens gekoppeld rijden

	<i>Kilometerkost 2020</i>	
	Leider	Volger
Loonkost	€ 0,385	€ 0,385
Brandstofkost	€ 0,228	€ 0,204
Aankoopkost	€ 0,22	€ 0,22
Kilometerheffing	€ 0,157	€ 0,157
Onderhoud en verzekering	€ 0,13	€ 0,13
Totaal	€ 1,12	€ 1,096

Gemiddeld gezien bedraagt de totale kost per voertuigkilometer in dit scenario dus € 1,108 bij gekoppeld rijden. Dit betekent een gemiddelde verlaging van 5%.

Scenario 2

Dit scenario veronderstelt wederom gekoppeld rijden in tandem, dezelfde brandstofbesparingen, maar ook een grotere versoepeling van het wettelijk kader. Het is nu niet verplicht meer om in de volgende trucks bij gekoppeld rijden een chauffeur te hebben. Hierdoor is een flexibelere planning van chauffeurs mogelijk. Het volgende netwerk kan dit verduidelijken.



Veronderstel dat er twee verplaatsingen gepland zijn op dit netwerk. Eén verplaatsing van A naar E, een andere verplaatsing van B naar F. Normaliter rijden twee vrachtwagens met twee chauffeurs de volledige rit. In dit scenario kan er bijvoorbeeld één chauffeur het volledige traject van B tot F doen, een andere chauffeur een vrachtwagen van A naar punt C rijden en nog een andere chauffeur een vrachtwagen van punt D naar punt E rijden. Dit zorgt voor een lagere loonkost, sterk afhankelijk van de gemaakte veronderstellingen. Deze bijdrage veronderstelt, gebaseerd op [31] een reductie van 25%. Dit leidt tot volgend gemiddeld kostenplaatje:

Tabel 2.7: Veronderstelde gemiddelde voertuigkilometerkost scenario 2

	Kilometerkost 2020
Loonkost	€ 0,315
Brandstofkost	€ 0,216
Aankoopkost	€ 0,22
Kilometerheffing	€ 0,157
Onderhoud en verzekering	€ 0,13
Totaal	€ 1,038

Dit komt gemiddeld overeen met een kostreductie van $\approx 11\%$ per voertuigkilometer.

Scenario 3

Dit scenario veronderstelt dat gekoppeld rijden met drie vrachtwagens mogelijk is. De brandstofbesparingen die hiermee gepaard gaan worden verondersteld respectievelijk 5%, 25% en 15% te zijn. Gemiddeld is dit 15%, wat leidt tot een gemiddelde brandstofkost per voertuigkilometer van €0,204.

De veronderstelling wordt gemaakt dat de voordelen van twee tandems herverdeeld worden over 3 trucks. Volgens scenario 2 ervaart een vrachtwagen een kostreductie van $\approx 11\%$. De gemaakte veronderstelling zorgt ervoor dat in scenario 3 deze kostreductie per vrachtwagen $\approx 15\%$ zal zijn. Dit leidt tot volgende kosten per voertuigkilometer:

Tabel 2.8: Veronderstelde gemiddelde voertuigkilometerkost scenario 3

	Kilometerkost 2020
Loonkost	€ 0,285
Brandstofkost	€ 0,204
Aankoopkost	€ 0,22
Kilometerheffing	€ 0,157
Onderhoud en verzekering	€ 0,13
Totaal	€ 0,996

2.2.6 Impact op routekeuze en -planning

De veranderende voertuigkilometerkost kan een effect hebben op de routekeuze en -planning van transportbedrijven. De impact op routekeuze en -planning van gekoppeld rijden is een relatief jong onderzoeksdomein. Tot voorheen concentreerde onderzoek naar gekoppeld rijden zich vooral rond de technische haalbaarheid ervan. De belangrijkste aspecten hiervan zijn in het voorgaande besproken.

De idee van routewijzigingen die volgen uit potentiële brandstofbesparingen is niet eigen aan gekoppeld rijden. Ericsson et. al (2006)[34] onderzochten het potentieel van een navigatiesysteem dat de route berekent met als basis het brandstofverbruik. Op basis van een wegencategorisering berekenden ze het verbruik per route. Ze concludeerden dat, mits real-time beschikbare verkeersinformatie, er brandstofbesparingen mogelijk waren van ongeveer 5%.

Een van de eersten die de routekeuze in verband met gekoppeld rijden onderzochten waren Meisen et. al (2008) [35]. Ze ontwikkelden een algoritme om uit routedata van vrachtwagens gemeenschappelijke subroutes te ontdekken. Op deze gemeenschappelijke subroutes zouden vrachtwagens dan gekoppeld kunnen rijden en zo brandstof besparen. De mogelijkheid om de routes van andere vrachtwagens te verleggen naar een frequent gereden subroute onderzochten ze echter niet. Hun onderzoek maakte duidelijk dat het controleren van de vorming van gekoppeld rijden computationeel intensief is. Dit maakt het moeilijk om de controle van gekoppeld rijden centraal en op grote schaal te organiseren. Larson et al. (2013) [36] formuleerden dit als volgt:

Een globaal controlesysteem dat de route van elke vrachtwagen tracht te coördineren ligt niet binnen de huidige capaciteiten. Naast het feit dat zo'n systeem nog niet bestaat is het computationeel niet aantrekkelijk om elk voertuig in een netwerk centraal te coördineren. Daarom vereenvoudigen we het probleem sterk door gedistribueerde controlesystemen aan kruispunten in te voeren. [36]

In hun onderzoek gingen ze dus uit van een netwerk van lokale controlesystemen op kruispunten. In een eerste fase bepaalden de onderzoekers hoe ze de snelheid van vrachtwagens die de gecontroleerde kruispunten naderden konden controleren om

zo vanaf het kruispunt gekoppeld te kunnen rijden. Dit is een vorm van ‘ad hoc’ vorming van gekoppeld rijden. Uit een simulatie op het Duitse snelwegennetwerk besloten ze dat hiermee een vermindering in brandstofverbruik van 2 – 2,5 % bereikt kan worden voor een netwerk met 300 vrachtwagens. Hun voorgestelde systeem kan met minder dan 10.000 vrachtwagens een vermindering in brandstofverbruik opleveren van zo’n 9%. In hun onderzoek nemen ze ook potentiële routewijzigingen in acht. Ze voegden in hun model een parameter toe die de maximaal toelaatbare afwijking van een route bevatte. Hierover schreven ze het volgende:

De meerderheid van de besparingen van de lokale controlesystemen zijn toe te wijzen aan de snelheidsynchronisatie. Het verhogen van de maximaal toelaatbare route-afwijking resulteert enkel in erg kleine besparingen. We besluiten dat de lokale controlesystemen vrachtwagens niet van hun korte route laat afwijken voor het netwerk in kwestie. [36]

Ze besloten dus dat vrachtwagens die aan het rijden zijn hun kortste route gaan blijven volgen, maar wel aan snelheidsynchronisatie doen om gekoppeld rijden tot stand te laten komen. Hierbij zijn twee kritische bedenkingen te formuleren die in dit thesisonderzoek verder onderzocht zullen worden:

- De besparingen door routewijzigingen zijn in andere netwerken misschien wel significant
- Het gecentraliseerd coördineren van alle verplaatsingen op het netwerk ligt inderdaad buiten de huidige mogelijkheden. Echter, het gedecentraliseerd coördineren van alle verplaatsingen langs bepaalde kruispunten lijkt dit evenzeer. De besparingen door gekoppeld rijden zijn niet gelijk verdeeld over de deelnemende voertuigen. Hierdoor zullen bedrijven niet zomaar met elkaar coöpereren. Het systeem heeft een grote kritische massa nodig heeft om veel besparingen te faciliteren. Dit is dit ongewenst. Zoals deel 2.2.2 reeds beschreef, lijkt een ‘ex ante’ coördinatie van gekoppeld rijden binnen een bedrijf een logische eerste stap

Larsson et al. (2015) [37] onderzochten routewijzigingen ten gevolge van de mogelijkheid tot gekoppeld rijden. Ze definieerden een specifiek routekeuze probleem genaamd het ‘platooning probleem’.

We definiëren formeel het ‘platooning probleem’, een routekeuze probleem dat het brandstofverbruik minimaliseert door gekoppeld rijden te introduceren. Beperkingen waarmee rekening gehouden wordt zijn de startpunten, de bestemmingen en de deadlines van de verplaatsingen. [37]

Larsson et al. (2015) geven ook de lineaire geheeltallige formulering van dit algemeen ‘platooning probleem’, alsook het ‘platooning probleem’ toegepast op verplaatsingen met dezelfde oorsprong. Dit noemen de auteurs het ‘same-start platooning probleem’. Larsson et al. (2015) gebruiken in hun formulering de variabelen samengevat in Tabel 2.9.

Tabel 2.9: De variabelen gebruikt door Larsson et al. (2015) in hun formulering van het routekeuzeprobleem bij gekoppeld rijden

Variabele	Betekenis
x_{ijn}	Vrachtwagen n rijdt over link (i,j)
b_{ij}	Een vrachtwagen rijdt over link (i,j)
g_{ij}	Relatieve brandstofkost voor link (i,j)
$w(i, j)$	Het brandstofverbruik over link (i,j)
η	De relatieve brandstofbesparing door gekoppeld rijden

De probleemformulering ziet als volgt uit:

$$\min h = \sum_{(i,j) \in E} w(i, j) * g_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_j x_{ijn} - \sum_j x_{jin} = \begin{cases} 1 & \text{als } i = s \\ -1 & \text{als } i = d_n \\ 0 & \text{anders} \end{cases} \quad \forall i \in V, 1 \leq n \leq N \quad (2)$$

$$b_{ij} = x_{ij1} \vee \dots \vee x_{ijN} \quad \forall (i, j) \in E \quad (3)$$

$$g_{ij} = b_{ij} + \eta * ([\sum_{n=1}^N x_{ijn}] - b_{ij}) \quad \forall (i, j) \in E \quad (4)$$

$$x_{ijn} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in E, 1 \leq n \leq N$$

$$b_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in E$$

$$g_{ij} \in \mathbb{R} \quad \forall (i, j) \in E$$

Beperkingen (2), (3) en (4) zorgen er respectievelijk voor dat de vrachtwagens van oorsprong naar bestemming rijden, dat b_{ij} gelijk wordt aan 1 van zodra een vrachtwagen van i naar j rijdt en dat het brandstofverbruik over de link i,j correct berekend wordt. Verdere details met betrekking tot deze formulering zijn terug te vinden in de originele paper [37].

Het model voor gekoppeld rijden met gelijke oorsprongen is vaak toe te passen bij transportbedrijven, distributiecentra, tankstations en dergelijke. De tijdscomplexiteit van deze problemen wordt bewezen ‘NP-moeilijk’ te zijn. Voor het oplossen van grote netwerken leidt dit tot de nood aan heuristieken. Larsson et al. (2015) [37] stellen drie heuristieken voor.

1. De ‘Best pair’ heuristiek

Deze heuristiek is gebaseerd op de eerder besproken publicatie van Larson et al. [36]. Voor een paar gekoppeld rijdende voertuigen wordt in elke stap het optimale punt berekend waarop gekoppeld rijden tot stand komt en wordt opgeheven. Een bedenking bij de implementatie van de auteurs van de ‘Best Pair’ heuristiek is dat, indien deze niet gevolgd wordt door een lokale zoekheuristiek, deze niet steeds het gewenste resultaat levert. De heuristiek vermindert iteratief het aantal mogelijkheden. Dit is gunstig voor de rekentijd, maar ongunstig voor de kwaliteit van het resultaat.

2. De ‘Hub’ heuristiek

Dit algoritme verdeelt het ‘platooning probleem’ in verschillende subproblemen door een selectie knooppunten te maken waardoor een aantal vrachtwagens verplicht moeten rijden. Deze selectie van knooppunten, de zogenaamde ‘hubs’ en welke vrachtwagens erdoor moeten rijden kan op verschillende manieren gebeuren. Larsson et. al (2015) [37] doen dit door de verschillende takken van het netwerk een score te geven op basis van de waarschijnlijkheid dat er een vrachtwagen over rijdt. De takken met de hoogste scores worden in een volgende stap gegroepeerd.

3. De lokale zoekheuristiek

Deze heuristiek tracht telkens de route van één vrachtwagen per keer te optimaliseren. Het is een veralgemening van het Dijkstra algoritme. De volgorde waarin deze routes worden geoptimaliseerd kan belangrijk zijn. De auteurs vermelden dat er meer besparingen geïdentificeerd kunnen worden indien tijdens het optimaliseren van één route, de andere vrachtwagens kunnen stilstaan op de knooppunten.

Larsson et al. (2015) besluiten dat deze drie heuristieken goed werken. Hun simulaties identificeren brandstofbesparingen tot 10 % op hun beschouwde netwerk. Dit is op hetzelfde netwerk waarvan Larson et al. (2013) simulaties op uitvoeren. Later in dit onderzoek, in Hoofdstuk 6 zal dit netwerk ook behandeld worden. Daaruit blijkt dat deze geïdentificeerde brandstofbesparingen vooral voortkomen uit overlappende kortste routes.

Een aanvulling op het voorgestelde routekeuzemodel kan een vertrektijdstipkeuze model zijn. Nu laten de auteurs de vrachtwagens wachten op knooppunten. Het wijzigen van hun vertrektijdstip kan een elegantere oplossing zijn. Dit lijkt nog onontgonnen terrein binnen het onderzoek over gekoppeld rijden. Er lijkt nog geen geïntegreerd model beschreven dat zowel routekeuze en vertrektijdstipkeuze bevat.

Een andere onderzoekspiste is de verdeling van de bereikte besparingen door gekoppeld rijden over de verschillende actoren. Deze besparingen zijn immers verschillend voor de leider en volger in gekoppeld rijden. In hun onderzoek met betrekking tot snelheidsynchronisatie voor de controle van gekoppeld rijden op grote schaal brachten van de Hoef et al. [38] dit in rekening. Ze bepaalden de selectie van de leider tijdens gekoppeld rijden op interessante wijze door een ‘clustering’ algoritme. Ze stelden hierbij vier maatstaven voor om de leider te selecteren. Eén ervan is paarsgewijze winst, waarbij de voordelen van gekoppeld rijden volgens een bepaalde verhouding worden verdeeld.

Deze insteek gebruiken Farokhi en Johansson [17] ook in hun onderzoek. Zij onderzoeken hoe verschillende vrachtwagens (ergo bedrijven) met mekaar interageren gegeven dat ze elk hun winst willen optimaliseren. Hiervoor gebruiken ze een ‘atomic congestion game’. Ze besluiten dat het nodig kan zijn om een specifieke subsidie

te geven of belasting te heffen met betrekking tot gekoppeld rijden. Deze kan dienen om de verschillende voordelen door gekoppeld rijden te herverdelen onder de betrokken partijen. Ook geven ze aan dat een combinatie van hun redenering met de routekeuzebeslissing een interessante onderzoekspiste is.

In deze paper hebben we geen routekeuze aspecten van het probleem in rekening gebracht. Het zou erg interessant zijn moest toekomstig onderzoek de keuze van vertrektijdstip en route combineren om de drijfveren tot gekoppeld rijden te begrijpen. [17]

Uit dit deel van de literatuurstudie is dus te concluderen dat er op volgende vlakken nog zeer interessante onderzoeksopportunities zijn:

- Aanvullen van huidige onderzoekspistes met een combinatie van een routekeuze- en vertrektijdstipkeuzemodel
- In rekening brengen van de speltheoretische overwegingen tussen verschillende transportbedrijven tijdens gekoppeld rijden. Een interessante onderzoekspiste kan het toepassen van coöperatieve spelen zijn op gekoppeld rijden

Zoals eerder besproken focust dit onderzoek zich rond de eerste onderzoeksopportunititeit.

2.3 Conclusie

Het ontbrekende wetskader en het weinige vertrouwen in het systeem verhinderen een snelle implementatie van geautomatiseerde voertuigen. Gekoppeld rijden is ideaal om geautomatiseerde voertuigen geleidelijk aan te implementeren. Het is haalbaar, schaalbaar en voegt belangrijke waarde toe om het hoofd te bieden aan de uitdagingen gedefinieerd in het vorige hoofdstuk. Bijgevolg is het antwoord op de eerste onderzoeksvraag dat gekoppeld rijden inderdaad een logische stap in de implementatie van geautomatiseerde voertuigen is.

Dit onderzoek kwantificeert het effect van gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost van transportbedrijven in drie kostscenario's met respectievelijk 5%, 11% en 15% besparingen. Deze besparingen zijn te wijten aan zowel brandstof als loonkostbesparingen. Deze resultaten beantwoorden de tweede onderzoeksvraag.

Hoewel de technische haalbaarheid van gekoppeld rijden veelvuldig onderzocht werd, is het onderzoeken van de impact ervan nog een vrij jong onderzoeksdomein. Enkele onderzoeken behandelden reeds algoritmen voor snelheidsynchronisatie en routekeuze. Het in dit onderzoek ontwikkelde algoritme, dat een routekeuze- en planningsprobleem combineert, is een aanvulling hierop.

Deel II

Hoofdstekst

Hoofdstuk 3

Methodologie

Dit hoofdstuk legt de toegepaste onderzoeksmethode uit. Het onderzoek start bij het kiezen van een geschikt onderwerp. Dit onderwerp moet dan vertaald worden naar enkele onderzoeksvragen en -doelstellingen. Het opbouwen van basiskennis rond het onderzoeksonderwerp gebeurt met een literatuurstudie. Gericht experimenteren met deze basiskennis kan dan leiden tot het beantwoorden van de onderzoeksvragen. Deze antwoorden worden door een discussie teruggekoppeld naar de context van het onderzoek. Van daaruit kunnen dan de algemene conclusies getrokken worden.

3.1 Onderzoeksonderwerp

Het departement stelde vorig academiejaar een lijst met mogelijke thesisonderwerpen voor. Vijf keuzedimensies dienden als basis om een keuze te maken tussen het uitvoeren van één van deze voorgestelde thesisonderzoeken en het aanbrengen van eigen onderzoeksonderwerp rond geautomatiseerde voertuigen. Dit eigen onderzoeksonderwerp kwam tot stand door een sterke persoonlijke interesse hierin. De keuzedimensies zijn:

- Persoonlijke interesse
- Fit met competenties
- Innovativiteit
- Vrijheid
- Voorbereidingswerk

Een toepassing van een gewogen factor score model helpt bij het maken van een keuze. Dit is een numeriek model dat verschillende keuzes vergelijkt en de meest geschikte keuze behoudt. Tabel 3.1 vergelijkt de top 3 van keuzemogelijkheden op basis van de eerder vernoemde dimensies. Deze top 3 ziet er als volgt uit:

1. Eigen onderwerp: impactstudie van gekoppeld rijden op routekeuze en planning

3. METHODOLOGIE

2. Ontwerp een mobiliteitsapp met open data
3. Optimization of reverse-logistics of solar energy systems

Tabel 3.1: Gewogen factor score model van de keuzemogelijkheden volgens 5 dimensies. De score geeft aan hoe gunstig een project scoort op een bepaalde dimensie.

Criterium (gewicht)	1.	2.	3.
Persoonlijke interesse (0,25)	$5 * 0,25 = 1,25$	$5 * 0,25 = 1,25$	$5 * 0,25 = 1,25$
Fit met competenties (0,2)	$5 * 0,2 = 1$	$3 * 0,2 = 0,6$	$4 * 0,2 = 0,8$
Innovativiteit (0,25)	$5 * 0,25 = 1,25$	$5 * 0,25 = 1,25$	$3 * 0,25 = 0,75$
Vrijheid (0,2)	$5 * 0,2 = 1$	$5 * 0,2 = 1$	$4 * 0,2 = 0,8$
Vorbereidingswerk (0,1)	$3 * 0,1 = 0,3$	$4 * 0,1 = 0,4$	$5 * 0,1 = 0,5$
Totaal	4,8	4,5	4,1

Uit Tabel 3.1 blijkt dat het uitvoeren van een eigen gekozen onderwerp, het gunstigste was.

3.2 Onderzoeksvragen en -doelstellingen

Het onderzoeksonderwerp ‘geautomatiseerde voertuigen’ is te vaag. Dit onderwerp moest verder vernauwd worden. Een preliminair onderzoek van literatuur, persberichten en online media leidde tot het vernauwen van het onderwerp van geautomatiseerde voertuigen naar gekoppeld rijden. Hoofdstuk 2 schetst dit proces, alsook de distillatie van enkele concrete onderzoeksvragen hieruit. Clough en Nutbrown (2002) [39] raden hiervoor het gebruik van de ‘Goldilocks test’ en het ‘Russian Doll’ principe aan.

In hun boek over onderzoeksmethoden leggen Saunders, Lewis en Thornhill (2009) [40] deze twee principes uit. De ‘Goldilocks test’ bepaalt of onderzoeksvragen ‘te groot’, ‘te klein’, ‘te controversieel’ of ‘juist goed’ zijn. Onderzoeksvragen die te groot zijn, zijn te moeilijk om in het gedefinieerde tijdsbestek door de onderzoeker te behandelen. ‘Te kleine’ onderzoeksvragen zijn dan weer te makkelijk. Onderzoeksvragen die ‘te controversieel’ zijn gaan over een te maatschappelijk gevoelig thema. Dit onderzoek tracht uiteraard onderzoeksvragen te definiëren die ‘juist goed’ zijn.

Onderzoeksvragen die ‘juist goed zijn’ zijn deze die juist goed zijn om te onderzoeken op dit tijdstip, door de onderzoeker in kwestie in deze context. [39]

Het toepassen van deze principes leidt tot de drie onderzoeksvragen besproken in deel 1.2.2 van deze tekst.

3.3 Literatuurstudie

Na het bepalen van de concrete onderzoeksvragen en -doelstelling is het nodig een antwoord op deze onderzoeksvragen te formuleren. Daarom volgt een literatuurstudie in Hoofdstuk 2. Het doel van deze studie is tweeledig.

Ten eerste tracht de literatuurstudie een antwoord te formuleren op de eerste en tweede onderzoeksvraag, met name het onderzoeken of gekoppeld rijden een logische stap is in de evolutie naar geautomatiseerd vrachtvervoer en het bepalen de impact van gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost. Een studie van het onderzoek en de implementatie van de technische systemen die geautomatiseerd en gekoppeld rijden mogelijk maken volstaat om de eerste onderzoeksvraag te beantwoorden. Een studie van de huidige voertuigkilometerkost en de kwalitatieve en kwantitatieve invloed van gekoppeld rijden hierop beantwoordt de tweede onderzoeksvraag.

Ten tweede geeft de literatuurstudie een kritische reflectie op het gedane onderzoek naar de impact op de route- en planningskeuze van transportbedrijven van gekoppeld rijden. Dit deel belicht ook de opportuniteiten tot wetenschappelijke bijdrage van dit thesisonderzoek, namelijk het verder onderzoeken van de impact van gekoppeld rijden op de routekeuze en -planning van transportbedrijven.

3.4 Theoretische afleiding en experimenten

De literatuurstudie toont aan dat gekoppeld rijden een logische stap is in de evolutie naar geautomatiseerd vrachtvervoer. Ook kwantificeert de studie de mogelijke invloed die gekoppeld rijden heeft op de voertuigkilometerkost van transportbedrijven. Dit vormt een belangrijke basis voor het beantwoorden van de derde onderzoeksvraag, namelijk het onderzoeken van het potentieel van gekoppeld rijden en de impact ervan op routekeuze en -planning. Dit is nog niet uitvoerig behandeld in onderzoek en literatuur.

Hoofdstuk 4 stelt op basis van een eenvoudig economisch kostenmodel enkele theoretische experimenten voor. Deze experimenten leiden tot basisinzichten in verband met het effect dat gekoppeld rijden op de routekeuze en planning van transportbedrijven kan hebben.

Hoofdstuk 5 consolideert deze inzichten in een theoretisch model. Dit model wordt getest in *CPLEX* en uiteindelijk geïmplementeerd in *Matlab*. Gezien de computationele complexiteit ervan stelt deze bijdrage ook een heuristiek voor. Deze heuristiek wordt toegepast op een artificieel modelnetwerk en twee reële netwerken in Hoofdstuk 6. Deze toepassingen leiden tot verder inzicht en laten toe het potentieel van gekoppeld rijden voor transportbedrijven in te schatten.

3.5 Discussie en algemene conclusie

Na het beantwoorden van alle onderzoeksvragen is het nodig een stap terug te nemen en de antwoorden op deze onderzoeksvragen kritisch te toetsen aan de context. Dit doet Hoofdstuk 7. Na deze terugkoppeling kan het onderzoek besluiten met de algemene conclusies in Hoofdstuk 8.

3.6 Conclusies

Het eigen gekozen onderzoeksonderwerp is door het toepassen van de ‘Goldilocks test’ en het ‘Russian doll principle’ vertaald naar concrete onderzoeksvragen en -doelstellingen. Het beantwoorden van deze onderzoeksvragen gebeurt door eerst een basis van kennis en inzicht op te bouwen vanuit bestaand onderzoek en bestaande literatuur. Dit laat het beantwoorden van de eerste twee onderzoeksvragen toe. Enkele eenvoudige theoretische experimenten verbreden deze basisinzichten. Een theoretisch model laat toe deze inzichten te vertalen naar een algoritme. Experimenten met dit algoritme op zowel artificiële als reële datasets laten toe de derde onderzoeksvraag te beantwoorden. De antwoorden op de onderzoeksvragen worden teruggekoppeld naar de context van het onderzoek en samengevat in een algemene conclusie.

Hoofdstuk 4

Basisinzichten

Dit hoofdstuk beschrijft aan de hand van eenvoudige economische kostenmodellen de mogelijke impact van gekoppeld rijden op de planning en de routekeuze van transportbedrijven. Eerst documenteert dit hoofdstuk de gehanteerde assumpties en vereenvoudigingen. Daarna bespreekt het de mogelijke impact op de planning en de routekeuze. Hieruit blijkt dat gekoppeld gereden afstanden relatief groot moeten zijn ten opzichte van planningswijzigingen of routewijzigingen om besparingen te genereren.

4.1 Vereenvoudigingen en assumpties

Dit hoofdstuk gaat uit van de volgende vereenvoudigingen en assumpties:

1. Eénzelfde bedrijf voert de beschouwde verplaatsingen uit en factureert aan de klanten dezelfde kilometerprijs. Gezien de aangerekende afstanden constant blijven bij gekoppeld rijden negeert het vervolg de inkomstenzijde. De inzichten worden gevormd op basis van de kostenfunctie.
2. De beschouwde verplaatsingen worden uitgevoerd met identieke vrachtwagens en bestuurders met identiek rijgedrag.
3. Enkel de potentiële volgers passen hun route aan.
4. Dit hoofdstuk negeert de impact van routewijzigingen op het aankomsttijdstip.
5. Dit hoofdstuk hanteert enkel kostscenario 1, beschreven in deel 2.2.5. Tabel 4.1 vat de beschouwde voertuigkilometerkosten samen. De basisinzichten uit dit hoofdstuk zijn onafhankelijk van het gehanteerde kostscenario. De kosten in de voorbeelden zijn uiteraard wel specifiek aan het gehanteerde kostscenario.

Tabel 4.1: Gehanteerde voertuigkilometerkosten. Deze komen overeen met kostscenario 1, beschreven in deel 2.2.5

	Voertuigkilometerkost ($\frac{\text{€}}{\text{km}}$)
Onafhankelijk rijden	1,167 $\frac{\text{€}}{\text{km}}$
Gekoppeld rijden als leider	1,120 $\frac{\text{€}}{\text{km}}$
Gekoppeld rijden als volger	1,096 $\frac{\text{€}}{\text{km}}$
Gemiddelde kost gekoppeld rijden	1,108 $\frac{\text{€}}{\text{km}}$

6. Aan te vroeg en te laat aankomen zijn kosten verbonden. Indien t^* het gewenste aankomsttijdstip is en t is het feitelijke aankomsttijdstip, dan gaat het volgende uit van de volgende ‘out-of-pocket’ kosten in € per uur:

$$c_t(t^* - t) = \begin{cases} 125 & \text{Als een vrachtwagen te laat komt} \\ 25 & \text{Als een vrachtwagen te vroeg komt} \\ 0 & \text{Als een vrachtwagen op tijd is} \end{cases}$$

Het is logisch dat de kost van te laat aankomen veel hoger is dan te kost van te vroeg aankomen. Industriespecialisten bevestigen dit. ¹

7. Het model beschouwt in dit hoofdstuk enkel tandems van twee vrachtwagens

4.2 Potentiële impact op de routekeuze

Dit deel onderzoekt de mogelijke impact van gekoppeld rijden op de routekeuze van transportbedrijven. Een transportbedrijf kan er immers voor kiezen om vrachtwagens te laten afwijken van hun geplande route om zo gekoppeld te rijden en zo te besparen. Dit deel leidt tot het inzicht dat de gekoppeld gereden afstand groot moet zijn, ofwel de extra te rijden afstand door de routewijziging erg klein om besparingen door gekoppeld rijden mogelijk te maken.

4.2.1 Kostenmodel

Het economisch model in deze sectie weegt de besparingen van gekoppeld rijden af tegen kosten van een routewijziging.

¹Deze kost bevat enkel de ‘out-of-pocket’ kosten. De opportuniteitskosten van te vroeg komen bedragen ongeveer € 50 per uur. Later, in Hoofdstuk 6, blijkt echter dat dit weinig invloed heeft op de bereikte resultaten.

Routekeuze zonder gekoppeld rijden

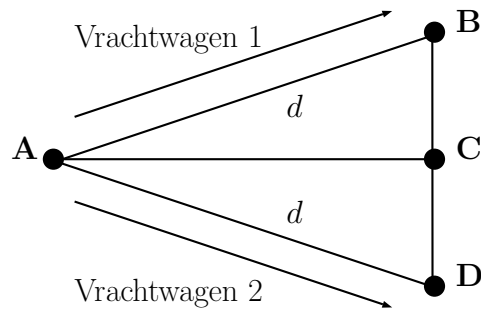
Voor een bepaalde verplaatsing zonder wegtreinovorming, zoals getoond in Figuur 4.1, ziet de kostenfunctie er als volgt uit:

$$C = c * d \quad (4.1)$$

waarbij:

- d : de trajectafstand
- c : de kilometerkost

Het minimaliseren van de kosten leidt tot het kiezen van de kortste route. Voor een fictief netwerk met twee verplaatsingen ziet dit er grafisch bijvoorbeeld als volgt uit:



Figuur 4.1: De kortste routes op een netwerk van twee verplaatsingen.

Routekeuze met gekoppeld rijden

Voor de **leider** tijdens gekoppeld rijden (zie Figuur 4.2) ziet deze kostenfunctie er als volgt uit:

$$C^l = c_1^l * d_1^l + c_0^l * d_0^l \quad (4.2)$$

waarbij:

- d^l : de afstand aangerekend aan de klant
- c_1^l : de kilometerkost tijdens gekoppeld rijden
- c_0^l : de kilometerkost tijdens het onafhankelijk rijden
- d_1^l : de afstand afgelegd tijdens gekoppeld rijden
- d_0^l : de afstand afgelegd tijdens het onafhankelijk rijden

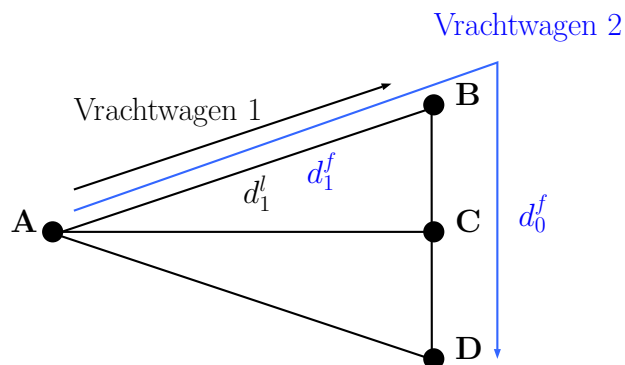
De kosten voor de **volger** tijdens gekoppeld rijden (zie Figuur 4.2) ziet er als volgt uit:

$$C^f = c_1^f * d_1^f + c_0^f * d_0^f \quad (4.3)$$

waarbij:

- d^f : de afstand aangerekend aan de klant
- c_1^f : de kilometerkost tijdens gekoppeld rijden
- c_0^f : de kilometerkost tijdens het onafhankelijk rijden
- d_1^f : de afstand afgelegd tijdens gekoppeld rijden
- d_0^f : de afstand afgelegd tijdens het onafhankelijk rijden

In de veronderstelling dat vrachtwagen 1 de leider is en vrachtwagen 2 de volger ziet dit er als volgt uit in het reeds aangehaalde fictief netwerk:



Figuur 4.2: De route tijdens gekoppeld rijden onder de gegeven assumpties als vrachtwagen 1 de leider is.

Interessante verbanden

Op basis van de opgesomde assumpties kan men volgende verbanden afleiden:

Wanneer gekoppeld rijden opgeheven wordt of nog niet tot stand gekomen is, onder vinden de leider en de volger dezelfde kilometerkost.

$$c_0^f = c_0^l = c \quad (4.4)$$

De kilometerkost tijdens gekoppeld rijden is zowel voor de leider als volger lager dan tijdens onafhankelijk rijden.

$$\begin{aligned} c_1^l &< c_0^l \\ c_1^f &< c_0^f \end{aligned}$$

De kilometerkost tijdens gekoppeld rijden is lager voor de volger dan voor de leider.

$$c_1^f < c_1^l$$

De gereden afstand van de leider wijzigt niet door gekoppeld rijden.

$$d = d_0^l + d_1^l$$

De volger kan beslissen om zijn route te veranderen om gekoppeld te rijden en de totale verplaatsingskost te verlagen. De gereden afstand bij gekoppeld rijden is dus groter dan of gelijk aan de gereden afstand zonder gekoppeld rijden.

$$d \leq d_0^f + d_1^f$$

Uit deze ongelijkheid volgt:

$$d + \Delta d = d_0^f + d_1^f \quad (4.5)$$

Voor een bepaalde verplaatsing zal de mogelijke besparing door gekoppeld rijden bepalend zijn in de planningsbeslissing. Een bedrijf zal pas gekoppeld willen rijden indien de kost daalt.

$$C^f + C^l < C$$

met C de kost van leider én volger zonder gekoppeld rijden.

Vergelijkingen 4.2 en 4.3 leveren dan, gebruik makend van vergelijking 4.4:

$$\frac{c_1^f * d_1^f + c_1^l * d_1^l}{c} \leq d^f + d^l - d_0^f - d_0^l \quad (4.6)$$

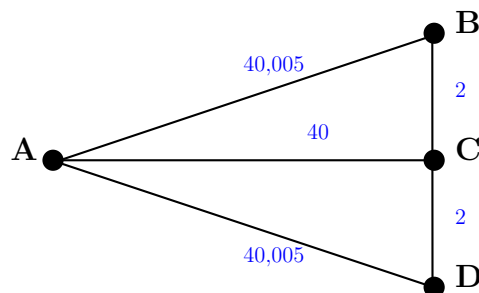
Bovenstaande vergelijking brengt de gekoppeld gereden afstand in verband met de oorspronkelijke afstand en de afstand die onafhankelijk gereden wordt. Indien voldaan is aan deze ongelijkheid leidt de routewijziging om gekoppeld te kunnen rijden tot een besparing.

4.2.2 Voorbeeld

Invullen van vergelijking 4.6 met de veronderstelde voertuigkilometerkosten geeft:

$$\frac{1,096 \frac{\text{€}}{\text{km}} * d_1^f + 1,12 \frac{\text{€}}{\text{km}} * d_1^l}{1,167 \frac{\text{€}}{\text{km}}} \leq d^f + d^l - d_0^f - d_0^l$$

Figuur 4.3 toont een netwerk waarvoor gekoppeld rijden besparingen kan opleveren door het wijzigen van de route volgens bovenstaande vergelijking. Veronderstel de verplaatsingen gegeven in Tabel 4.2.



Figuur 4.3: Netwerk waarop besparingen door routewijzigingen mogelijk zijn. De linkafstanden zijn aangeduid in het blauw.

Tabel 4.2: Verplaatsingen waarvoor gekoppeld rijden besparingen kan opleveren op het netwerk in Figuur 4.3

	Oorsprong	Bestemming
Verplaatsing 1	A	B
Verplaatsing 2	A	D

Zonder gekoppeld rijden kiest het bedrijf voor de kortste route, wat tot de volgende kosten leidt:

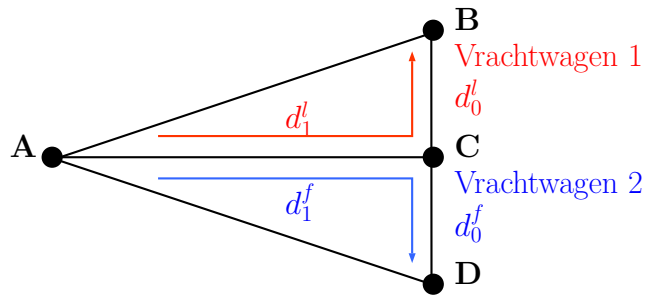
	Verplaatsing 1	Verplaatsing 2	Totaal
Routelengte onafhankelijk rijden	40,005 km	40,005 km	80,01 km
Routekost	€ 46,69	€ 46,69	€ 93,37

Gekoppeld rijden leidt tot de volgende kosten:

	Verplaatsing 1	Verplaatsing 2	Totaal
Routelengte onafhankelijk rijden	0 km	4 km	4km
Routelengte gekoppeld rijden	40,005 km	40,005 km	80,01 km
Routekost	€ 44,81	€ 48,51	€ 93,32

Gekoppeld rijden levert dus besparingen op terwijl de totale gereden afstand 4 kilometer langer is. De besparingen zijn echter wel beperkt ($< 0,1\%$). Dit komt omdat de extra gereden afstand door de volger relatief groot is ten opzichte van de afstand gereden tijdens onafhankelijk rijden ($\approx 10\%$). Om grote besparingen op te leveren moet dus de extra gereden afstand door de routewijziging klein zijn ten opzichte van de gekoppeld gereden afstand.

Een aandachtige lezer merkt op dat het in rekening brengen van assumptie 4 tot gevolg heeft dat de routekeuze niet optimaal is. De bestaansreden van assumptie 4 is het verlagen van de computationele complexiteit in een later stadium van het onderzoek. Hoofdstuk 5 maakt dit duidelijk. Figuur 4.4 schetst de optimale routekeuze voor gekoppeld rijden.



Figuur 4.4: De optimale routekeuze met gekoppeld rijden op het beschouwde netwerk. Assumptie 4 verhindert deze routekeuze omwille van pragmatische redenen (cfr. supra)

4.3 Impact op de planning

Dit deel zal, analoog aan vorig hoofdstuk, aantonen dat planningswijzigingen om gekoppeld te rijden tot besparingen kunnen leiden. Deze planningswijzigingen zullen besparingen opleveren indien de gekoppeld gereden afstand relatief groot is ten opzichte van de nodige planningswijzigingen.

4.3.1 Kostenmodel

Dit deel stelt een eenvoudig economisch model voor om de mogelijke impact van gekoppeld rijden op de planning te schetsen.

Planning zonder gekoppeld rijden

Voor een bepaalde verplaatsing zonder gekoppeld rijden ziet de kostenfunctie voor een bepaalde verplaatsing van een vrachtwagen er als volgt uit:

$$C = c_k * d + c_t(t^* - t) * |(t^* - t)| \quad (4.7)$$

waarbij:

- d : de trajectafstand
- c_k : de kilometerkost
- $c_t(t^* - t)$: de kost van te vroeg/te laat arriveren
- t^* : het gewenste aankomsttijdstip
- t : het eigenlijke aankomsttijdstip

Planning met gekoppeld rijden

Voor een bepaalde verplaatsing met gekoppeld rijden ziet de kostenfunctie voor een bepaalde verplaatsing van de **leider** er als volgt uit:

$$C^l = c_{k,1}^l * d_1^l + c_{k,0}^l * d_0^l + c_t(t^{*,l} - t^l) * |(t^{*,l} - t^l)| \quad (4.8)$$

waarbij:

- d^l : de afstand aangerekend aan de klant
- $c_{k,1}^l$: de kilometerkost tijdens gekoppeld rijden
- $c_{k,0}^l$: de kilometerkost tijdens het onafhankelijk rijden
- d_1^l : de afstand afgelegd tijdens gekoppeld rijden
- d_0^l : de afstand afgelegd tijdens het onafhankelijk rijden
- $c_t(t^* - t)$: de kost van te vroeg/te laat arriveren
- $t^{*,l}$: het gewenste aankomsttijdstip van de leider
- t^l : het eigenlijke aankomsttijdstip van de leider

De kostenfunctie voor een **volger** ziet er als volgt uit:

$$C^f = c_{k,1}^f * d_1^f + c_{k,0}^f * d_0^f + c_t(t^{*,f} - t^f) * |(t^{*,f} - t^f)| \quad (4.9)$$

waarbij:

- d^f : de afstand aangerekend aan de klant
- $c_{k,1}^f$: de kilometerkost tijdens gekoppeld rijden
- $c_{k,0}^f$: de kilometerkost tijdens het onafhankelijk rijden
- d_1^f : de afstand afgelegd tijdens gekoppeld rijden
- d_0^f : de afstand afgelegd tijdens het onafhankelijk rijden
- $c_t(t^* - t)$: de kost van te vroeg/te laat arriveren
- $t^{*,f}$: het gewenste aankomsttijdstip van de volger
- t^f : het eigenlijke aankomsttijdstip van de volger

Inzichtelijke verbanden

Volgende verbanden volgen uit bovenstaande kostenmodellen en de opgesomde assumpties:

De leider en volger ondervinden dezelfde kilometerkost tijdens onafhankelijk rijden.

$$c_{k,0}^f = c_{k,0}^l = c_k \quad (4.10)$$

De kilometerkost tijdens gekoppeld rijden is zowel voor de leider als volger lager dan tijdens onafhankelijk rijden.

$$\begin{aligned} c_{k,1}^l &< c_{k,0}^l \\ c_{k,1}^f &< c_{k,0}^f \end{aligned}$$

De kilometerkost tijdens gekoppeld rijden is lager voor de volger dan voor de leider.

$$c_{k,1}^f < c_{k,1}^l$$

Dit deel onderzoekt de potentiële impact op de planning en negeert mogelijke routewijzigingen. Hieruit volgt dat:

$$\begin{aligned} d &= d_0^l + d_1^l \\ d &= d_0^f + d_1^f \end{aligned}$$

Voor een bepaalde verplaatsing zal de mogelijke besparing door gekoppeld rijden bepalend zijn in de planningsbeslissing. Een bedrijf zal pas gekoppeld willen rijden indien de kost daalt.

$$C^f + C^l < C$$

met C de kost van leider én volger zonder gekoppeld rijden.

Vergelijkingen 4.8 en 4.9 leveren dan, gebruik makend van vergelijking 4.10, tot:

$$\begin{aligned} c_t(t^{*,f} - t^f) * |(t^{*,f} - t^f)| + c_t(t^{*,l} - t^l) * |(t^{*,l} - t^l)| < \\ d_1^l * (c_k - c_{k,1}^l) + d_1^f * (c_k - c_{k,1}^f) \end{aligned}$$

Bovenstaande vergelijking stelt dat de verhoogde kosten door te vroeg of te laat aankomen kleiner moeten zijn dan de besparingen door gekoppeld rijden. Dit is een logisch resultaat. Invullen van de veronderstelde kilometerkosten levert:

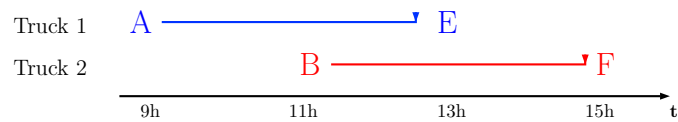
$$\begin{aligned} c_t(t^{*,f} - t^f) * |(t^{*,f} - t^f)| + c_t(t^{*,l} - t^l) * |(t^{*,l} - t^l)| < \\ d_1^f * (0,047 \frac{\text{€}}{\text{km}}) + d_1^f * (0,071 \frac{\text{€}}{\text{km}}) \\ \Downarrow \end{aligned}$$

$$c_t(t^{*,f} - t^f) * |(t^{*,f} - t^f)| + c_t(t^{*,l} - t^l) * |(t^{*,l} - t^l)| < d_1 * (0,118 \frac{\text{€}}{\text{km}}) \quad (4.11)$$

Met de bovenstaande vergelijking kan men voor twee verplaatsingen op een gegeven netwerk de maximale planningswijziging bepalen. Men kan ook, gegeven twee geplande verplaatsingen, de minimale gekoppeld gereden wegafstand berekenen waarvoor gekoppeld rijden besparingen oplevert.

4.3.2 Voorbeeld

Beschouw volgende twee verplaatsingen:



Figuur 4.5: Beschouwde verplaatsingen in dit voorbeeld.

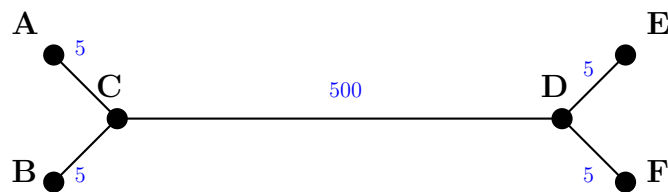
Uit assumptie 6 volgt dat een rationeel handelend bedrijf steeds zal kiezen om verplaatsing 2 te vervroegen. Vergelijking 4.11 invullen voor het synchroniseren van de planning door het vervroegen van verplaatsing 2 levert:

$$c_t(t^{*,f} - t^f) * |(t^{*,f} - t^f)| < d_1 * (0,118 \frac{\text{€}}{\text{km}})$$

$$\Updownarrow$$

$$424 \text{ km} < d_1$$

Dit betekent dat het vervroegen van verplaatsing 2 besparingen oplevert wanneer de gekoppeld gereden afstand groter is dan 424 km. Figuur 4.6 toont een netwerk waarop dit mogelijk is. Tabellen 4.3 en 4.4 vatten de kosten van de gedefinieerde verplaatsingen samen voor respectievelijk onafhankelijk en gekoppeld rijden.



Figuur 4.6: Netwerk waarop besparingen door planningsynchronisatie mogelijk zijn. De linkafstanden zijn aangeduid in het blauw.

Tabel 4.3: Kosten van het uitvoeren van de verplaatsingen in onafhankelijk rijregime

	Verplaatsing 1	Verplaatsing 2	Totaal
Routelengte onafhankelijk rijden	510 km	510 km	1020 km
Routekost	€ 595,17	€ 595,17	€ 1.190,34

Tabel 4.4: Kosten van het uitvoeren van de gedefinieerde verplaatsingen met gekoppeld rijden door het vervroegen van verplaatsing 2

	Verplaatsing 1	Verplaatsing 2	Totaal
Routelengte onafhankelijk rijden	10 km	10 km	20 km
Routelengte gekoppeld rijden	500 km	500 km	1000 km
Routekost	€ 559,67	€ 571,67	€ 1.131,34
Kost te vroeg komen	€ 0	€ 50	€ 50
Totaal	€559,67	€ 621,67	€ 1.181,34

De besparingen door gekoppeld rijden compenseren de extra kost van te vroeg aankomen. In dit geval is het dus voordelig om de planning te wijzigen en gekoppeld te rijden. Het verschil in dit voorbeeld, € 9, is echter beperkt.

Men kan ook, gegeven een bepaald traject waarop gekoppeld rijden mogelijk is, de maximale verandering van de planning bepalen. Neem hiervoor bijvoorbeeld het traject Antwerpse haven – Leuven. De afstand van dit traject bedraagt 85 km. Onderstaande berekening gaat uit van de – naïeve – veronderstelling dat tijdens het volledige traject gekoppeld rijden kan plaatsvinden. Uit vergelijking 4.3.1 volgt dan:

$$c_t(t^{*,f} - t^f) * |(t^{*,f} - t^f)| + c_t(t^{*,l} - t^l) * |(t^{*,l} - t^l)| < €10,03$$

Een rationeel handelend bedrijf zal steeds kiezen om een verplaatsing te vervroegen. Dit leidt tot:

$$(t^{*,f} - t^f) < 0,40 u$$

Dit betekent dat gekoppeld rijden bedrijven ertoe kan aanzetten verplaatsingen 24 minuten te vervroegen op het traject Antwerpse haven – Leuven onder de gegeven assumpties.

4.4 Conclusie

Dit hoofdstuk leidt, aan de hand van enkele vereenvoudigingen en assumpties, tot enkele basisinzichten over gekoppeld rijden. Uit de ontwikkelde economische kostenmodellen en daarbij horende voorbeelden volgt dat het wijzigen van de planning en route om gekoppeld te kunnen rijden besparingen kan opleveren. Dit is echter geen evidentie.

Om significante besparingen te bereiken door routeveranderingen moet de verhouding van de gekoppeld gereden afstand ten opzichte van de extra te rijden afstand door de volger groot (> 10 voor kostscenario 1) zijn.

Voor wijzigingen van de planning moet ofwel de gekoppeld gereden afstand groot zijn, ofwel het te overbruggen planningsverschil beperkt om besparingen te bereiken. Bedrijven zullen steeds neigen naar het vervroegen van verplaatsingen omdat dit

goedkoper is. Het vervroegen van een verplaatsing met 1 uur vereist volgens kostscenario 1 een gekoppeld gereden afstand van 250 km.

Dit hoofdstuk behandelde route- en planningswijzigingen onafhankelijk. In realiteit vereisen routewijzigingen echter vaak een planningswijziging. Volgende hoofdstukken integreren deze potentiële impact op route- en planningskeuze in een algoritme.

Hoofdstuk 5

Theoretisch Model

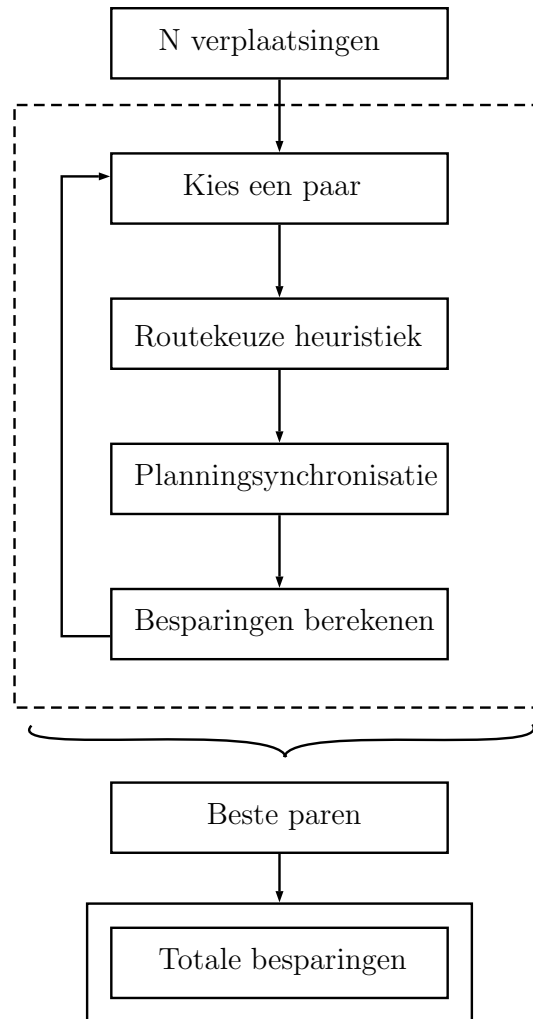
Dit hoofdstuk consolideert de basisinzichten uit het vorige hoofdstuk. Vorig hoofdstuk maakte duidelijk hoe gekoppeld rijden een invloed kon hebben op de routekeuze en planning. De voorbeelden uit vorig hoofdstuk waren echter erg kleine netwerken met weinig verplaatsingen. Het is nodig om op grote netwerken met N verplaatsingen de mogelijke besparingen door gekoppeld rijden te kunnen berekenen. Dit hoofdstuk stelt hiervoor een heuristische optimalisatie voor.

Deze heuristische optimalisatie, een variant op de ‘Best Pair’ heuristiek, bepaalt met een routekeuze heuristiek en een daarop volgende planningsynchronisatie voor elk mogelijk paar verplaatsingen de mogelijke besparingen door gekoppeld rijden. Dit hoofdstuk bespreekt deze ‘Best Pair’ heuristiek, de routekeuze heuristiek en de planningsynchronisatie in detail.

5.1 ‘Best Pair’ heuristiek

Deze heuristiek is gebaseerd op de heuristiek die Larson et al. (2013) [36] voorstelden om de mogelijke besparingen te berekenen van gekoppeld rijden door snelheidssynchronisatie.

Het in dit onderzoek ontwikkelde algoritme maximaliseert de besparing door gekoppeld rijden van N verplaatsingen op een netwerk. Om dit te doen integreert het een routekeuze algoritme en planningsynchronisatie. Hierdoor kan het algoritme de besparingen bepalen en selecteert het op basis van deze besparingen een set paren van verplaatsingen die zullen besparen door gekoppeld te rijden. Figuur 5.1 toont het werkingsprincipe van de heuristiek. De pseudocode, beschreven in Algoritme 1, maakt de details van de heuristiek duidelijk. Een uitbreiding naar gekoppeld rijden met 3 voertuigen, gebruikt in deel 6.2.3 van de tekst, is gegeven door Algoritme 2 (Appendix D).



Figuur 5.1: Het werkingsprincipe van de 'Best Pair' heuristiek. Deze berekent voor alle mogelijke combinaties van N verplaatsingen de mogelijke besparingen door gekoppeld rijden. Hiermee wordt dan een set van paren bepaald die gekoppeld zullen rijden en op die manier besparen.

Algorithm 1 Deze pseudocode geeft de werking van het ‘Best Pairs’ algoritme weer. Het algoritme berekent de besparing van alle mogelijke combinaties van verplaatsingen en selecteert op basis hiervan een set combinaties.

Input: oorsprongen, bestemmingen

Output: de ‘best pairs’ van verplaatsingen

paren \leftarrow lijst met mogelijke combinaties van 2 verplaatsingen

for $i = 1$ tot *aantal combinaties* **do**

kortsteRouteKost(i) berekenen

gekoppeldRijdenKost(i) berekenen door oplossen routekeuze probleem

if *gekoppeldRijdenKost*(i) < *kortsteRouteKost*(i) **then**

beparing(i) = *kortsteRouteKost*(i) – *gekoppeldRijdenKost*(i)

end if

end for

Sorteer *paren* op basis van besparing in dalende volgorde

for $i = 1$ tot *aantal gesorteerde paren in lijst* **do**

if *beparing*(i) > 0 **then**

 plaats paar i in outputlijst

beparing(*verplaatsing* \in paar i) = 0

end if

end for

5.2 Routekeuze

In de ‘Best Pair’ heuristiek zit een routekeuze probleem ingebed. Deze bijdrage stelt een 0–1 geheeltallig lineaire programmering voor van het routekeuze probleem wanneer men gekoppeld kan rijden in tandem. De rekenkundige complexiteit hiervan is NP-moeilijk. Voor elk paar van verplaatsingen de optimale routekeuze bepalen is dus niet haalbaar. Daarom maakt de ontwikkelde ‘Best Pair’ heuristiek gebruik van een routekeuze heuristiek, ook beschreven in deze sectie.

5.2.1 0–1 geheeltallig lineaire programmering van het routekeuze probleem bij gekoppeld rijden in tandem

Dit probleem beschouwt een paar van vrachtwagens. Noem deze vrachtwagens a en b . Ze hebben respectievelijk een oorsprong o_a en o_b en bestemming d_a en d_b .

Sets

N set van knooppunten

K set van vrachtwagens

P set van rijregimes

1: onafhankelijk rijden

2: gekoppeld rijden in tandem

Parameters

c_{ijp}	$i, j \in N; p \in P$	kost om van knooppunt i naar j te rijden in regime p
s_{ij}	$i, j \in N$	besparingen door gekoppeld te rijden van knooppunt i naar j

Beslissingsvariabelen

$$x_{ijkp} = \begin{cases} 1 & \text{Als vrachtwagen } k \text{ van } i \text{ naar } j \text{ rijdt in rijregime } p \\ 0 & \text{Als vrachtwagen } k \text{ niet van } i \text{ naar } j \text{ rijdt in rijregime } p \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Als er gekoppeld gereden wordt van } i \text{ naar } j \\ 0 & \text{Als er niet gekoppeld gereden wordt van } i \text{ naar } j \end{cases}$$

Objectieffunctie en beperkingen

$$\min_x \sum_i \sum_j \sum_k \sum_p c_{ijp} * x_{ijkp} - \sum_i \sum_j s_{ij} * y_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_j \sum_p x_{o_a j a p} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_j \sum_p x_{o_b j b p} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_p x_{i d_a a p} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_p x_{i d_b b p} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_p x_{ijkp} = \sum_z \sum_p x_{jz kp} \quad \forall k \in K \ \& \ i, j, z \in N \ \& \ j \neq o_k, d_k \quad (6)$$

$$\sum_p x_{iikp} = 0 \quad \forall k \in K \ \& \ i \in N \quad (7)$$

$$\sum_p x_{ijkp} + \sum_p x_{jikp} \leq 1 \quad \forall k \in K \ \& \ i, j \in N \quad (8)$$

$$y_{ij} \leq x_{ijk2} \quad \forall k \in K \ \& \ i, j \in N \quad (9)$$

$$x_{ija2} = x_{ijb2} \quad \forall i, j \in N \quad (10)$$

$$x_{ijkp} \in \{0, 1\} \quad (11)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad (11)$$

Uitleg beperkingen

- (1) – (2): deze beperkingen dwingen de vrachtwagens te vertrekken op hun oorsprong
- (3) – (4): deze beperkingen dwingen de vrachtwagens aan te komen op hun bestemming
- (5): deze beperking zorgt ervoor dat de vrachtwagens een aaneengesloten pad afleggen
- (6): deze beperking verbiedt vrachtwagens om eenzelfde oorsprong en bestemming te hebben in een pad
- (7): deze beperking elimineert subtours van eerste orde. Subtours van hogere orde kunnen niet plaatsvinden door de voorgaande beperkingen

- (8): deze beperking laat de indicator voor gekoppeld rijden slechts gelijk zijn aan één van zodra beide vrachtwagens gekoppeld rijden
- (9): deze beperking stelt dat gekoppeld rijden enkel mogelijk is wanneer beide vrachtwagens dit doen
- (10): deze beperking legt op dat de beslissingsvariabele x_{ijkp} binair is
- (11): deze beperking legt op dat de beslissingsvariabele y_{ij} binair is

5.2.2 Computationale complexiteit

Karp (1972) [41] toont aan dat 0–1 geheeltallige problemen NP-moeilijke problemen zijn. Larsson et al. (2015) [37] breiden dit inzicht uit naar het routekeuze probleem bij gekoppeld rijden.

De computationele moeilijkheid van het algemene routekeuze probleem bij gekoppeld rijden is NP-moeilijk. Het bewijs is een reductie van het probleem van verzamelingenoverdekking, hetwelk Karp (1972) aantoonde NP-moeilijk te zijn, naar het routekeuze probleem bij gekoppeld rijden. Deze reductie toont aan dat het routekeuze probleem bij gekoppeld rijden op een algemeen netwerk NP-moeilijk is, zelfs wanneer tijdsvensters genegeerd worden. Men kan echter veronderstellen dat wegnetwerken planaire netwerken zijn. Deze bijdrage toont aan dat ook dit probleem NP-moeilijk is. [37]

De NP-moeilijkheid heeft ongewenste repercussies op de rekentijd om een optimale routekeuze te berekenen. Daarom stelt dit onderzoek een heuristiek voor. Dit maakt het mogelijk om de impact van gekoppeld rijden op de routekeuze op grote netwerken met veel verplaatsingen na te gaan.

5.2.3 Routekeuze heuristiek

De heuristiek voor het oplossen van het routekeuze probleem ziet er als volgt uit:

1. Het Dijkstra algoritme bepaalt de kortste afstanden en paden tussen de verschillende knooppunten van het netwerk. De *Matlab* code van Joseph Kirk [42] is hiervoor getest en gebruikt
2. Het algoritme dat de mogelijke besparingen van gekoppeld rijden berekent gaat als volgt:
 - a) Elke stap beschouwt twee vrachtwagens die verplaatsingen i en j doen om beurten als potentiële leider en volger bij gekoppeld rijden
 - b) Een algoritme bepaalt alle ‘sub-paden’ van de kortste routes van deze twee verplaatsingen. De pseudocode van dit algoritme is gegeven in Appendix D (Algoritme 3)

- c) Op elke mogelijke plaats in de kortste route van de potentiële volger (wiens route wordt aangepast) wordt elk mogelijk ‘sub-pad’ van de kortste route van de potentiële leider geplaatst. Het vervolg van de oorspronkelijke kortste route wordt genegeerd
- d) De kortste route van de laatste toegevoegde node van het ‘sub-pad’ tot aan de bestemming van de potentiële volger vervolledigt de route van de potentiële volger. Appendix D geeft wederom de pseudocode van deze operatie (Algoritme 4)

5.3 Planningsynchronisatie

Een planningsynchronisatie volgt het routekeuze probleem in de ‘Best Pair’ heuristiek. Twee vrachtwagens die gekoppeld rijden moeten immers op hetzelfde tijdstip op dezelfde plaats zijn. Er is reeds onderzoek gedaan naar het tot stand brengen van gekoppeld rijden door snelheids-synchronisatie [36]. Deze bijdrage beschouwt de snelheid constant maar synchroniseert de planning op basis van de keuze van vertrektijdstip. Dit past beter in de ‘Ex ante’ vormingstrategie, beschreven in deel 2.2.2, waar dit onderzoek van uitgaat.

Deze sectie stelt een lineaire programmering voor van het vertrektijdstipkeuze probleem met tijdsvensters. Dit deel weidt niet uit over de computationele complexiteit. Aangezien de vertrektijdstipkeuze slechts moet gebeuren per paar verplaatsingen, is het berekenen van het optimum mogelijk.

Planning met in begripname van gekoppeld rijden: lineaire programmering

Dit deel beschouwt een vertrektijdstipkeuze probleem. Dit probleem beschouwt een paar van vrachtwagens (uit de ‘Best Pair’ heuristiek) en bepaalt het optimale vertrektijdstip. Noem de vrachtwagens a en b met een respectievelijke oorsprong o_a, o_b en bestemming d_a, d_b .

Sets

- N set van knooppunten waarlangs gereden wordt
- P set van knooppunten waarop gekoppeld rijden begint
- K set van vrachtwagens

Parameters

- c_e kost om te vroeg aan te komen
- c_l kost om te laat aan te komen
- $[l_k, u_k]$ tijdsvenster waarin vrachtwagen k mag aankomen
- t_{ij} $i, j \in N$ reistijd van knooppunt i tot j

Beslissingsvariabelen

$g_k =$ Aantal uur dat vrachtwagen k te vroeg aankomt

$h_k =$ Aantal uur dat vrachtwagen k te laat aankomt

$w_{ki} =$ Vertrektijdstip van vrachtwagen k op knooppunt i

Objectieffunctie en beperkingen

$$\begin{aligned} \min_x \quad & c_e * \left(\sum_k g_k\right) + c_l * \sum_k (h_k) \\ \text{s.t.} \quad & w_{ki} + t_{ij} = w_{kj} && \forall i, j \in N \ \& \ \forall k \in K \quad (1) \\ & g_k \geq l_k - w_{kd_k} && \forall k \in K \quad (2) \\ & h_k \geq w_{kd_k} - u_a && \forall k \in K \quad (3) \\ & w_{ai} = w_{bi} && \forall i \in P \quad (4) \\ & h_k \geq 0 && \forall k \in K \quad (5) \\ & g_k \geq 0 && \forall k \in K \quad (6) \\ & w_{ki} \geq 0 && \forall j \in N \ \& \ \forall k \in K \quad (7) \end{aligned}$$

Uitleg beperkingen

- (1): deze beperking zorgt ervoor dat een vrachtwagen niet kan vertrekken op een knooppunt vooraleer hij er aangekomen is
- (2): deze beperking registreert hoeveel uur een vrachtwagen te vroeg aankomt
- (3): deze beperking registreert hoeveel uur een vrachtwagen te laat aankomt
- (4): deze beperking zorgt ervoor dat vrachtwagens die gekoppeld rijden op hetzelfde tijdstip vertrekken op een knooppunt
- (5) – (6): deze beperkingen leggen vast dat het aantal uur te laat of te vroeg aankomen positief is
- (7): deze beperking zorgt ervoor dat vertrektijdstippen positief zijn

5.4 Conclusie

Dit hoofdstuk veralgemeent de methodes en inzichten uit vorig hoofdstuk in een algoritme dat de besparingen door gekoppeld rijden kan maximaliseren voor een netwerk met N verplaatsingen. De basis van dit algoritme, een ‘Best Pair’ heuristiek, is gebaseerd op de literatuur. Dit hoofdstuk streeft de te bereiken onderzoeksdoelstellingen na door de ‘Best Pair’ heuristiek te integreren met een routekeuze en vertrektijdstipkeuze probleem. Deze integratie vindt plaats in de vorm van een routekeuze heuristiek gevolgd door een planningsynchronisatie.

Hoofdstuk 6

Experimenten

Dit hoofdstuk past de theoretische modellen uit vorig hoofdstuk toe op enkele netwerken. Een eerste, artificieel, netwerk dient om de werking van het model te demonstreren aan de hand van enkele experimenten en de resultaten hiervan te toetsen aan de reeds verworven inzichten. Vervolgens dienen enkele experimenten met willekeurige verplaatsingen op het Autobahn-netwerk als validatie voor het ontwikkelde model. Hiertoe worden de resultaten van enkele experimenten vergeleken met behaalde resultaten uit eerder onderzoek. De experimenten op het Autobahn-netwerk breiden dit eerder onderzoek bovendien ook uit. Tot slot onderzoekt dit hoofdstuk het effect van gekoppeld rijden op een reële dataset met verplaatsingen van een transportbedrijf in het Trans-Europese Transportnetwerk.

Dit hoofdstuk toont aan dat gekoppeld rijden tot significante besparingen kan leiden voor transportbedrijven. Meer dan 95% van de theoretische bovengrens van de besparingen kan bereikt worden, vooral door bedrijven met veel verplaatsingen vanuit gemeenschappelijke vertrekpunten. Voor bedrijven met weinig verplaatsingen is het moeilijker zo'n niveau van besparingen te bereiken. Deze kleinere bedrijven kunnen hun besparingen wel optrekken door, eventueel via een derde partij, samen te werken met andere bedrijven. Ook het flexibeler maken van tijdsvensters kan voor kleine bedrijven leiden tot hogere besparingen.

Het is nodig enkele begrippen te definiëren:

$$\begin{aligned}
 \text{Besparing}[\text{€}] &= c_{\text{niet gekoppeld rijden}} - c_{\text{gekoppeld rijden}} \\
 \text{Besparing}[\%] &= \frac{c_{\text{niet gekoppeld rijden}} - c_{\text{gekoppeld rijden}}}{c_{\text{niet gekoppeld rijden}}} \\
 \text{Bovengrens}[\%] &= \begin{cases} 5\% & \text{voor kostscenario 1} \\ 11\% & \text{voor kostscenario 2} \\ 15\% & \text{voor kostscenario 3} \end{cases} \\
 \text{Besparingspotentieel}[\%] &= \frac{\text{Te realiseren besparingen} [\%]}{\text{Bovengrens}} \\
 \text{Relatieve te realiseren besparing} [\%] &= \frac{\text{Besparingspotentieel in bepaald scenario}}{\text{Besparingspotentieel}}
 \end{aligned}$$

Deel 2.2.5 van dit onderzoek bespreekt de verschillende kostscenario's in detail. Onderstaande tabel vat de gemiddelde voertuigkilometerkost nogmaals samen van deze scenario's.

Tabel 6.1: De voertuigkilometerkosten in de beschouwde kostscenario's. De details hiervan zijn gedocumenteerd in deel 2.2.5

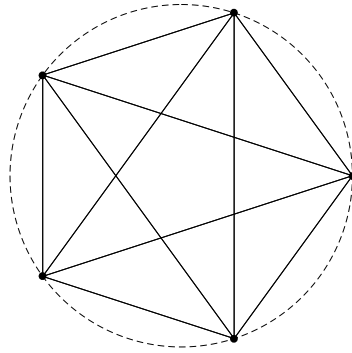
Scenario	Voertuigkilometerkost [$\frac{\text{€}}{\text{km}}$]
0	1,167 $\frac{\text{€}}{\text{km}}$
1	1,108 $\frac{\text{€}}{\text{km}}$
2	1,038 $\frac{\text{€}}{\text{km}}$
3	0,996 $\frac{\text{€}}{\text{km}}$

6.1 Cirkelvormig netwerk

Het doel van dit experiment is om na te gaan of het toepassen van het ontwikkelde model leidt tot logische resultaten.

Netwerk

Dit experiment beschouwt een netwerk van K regelmatige punten op een cirkel, zoals Figuur 6.1 toont. De diameter van de cirkel bedraagt 100 km. Het experiment veronderstelt dat er tussen elk knooppunt van het netwerk wegen zijn.



Figuur 6.1: Netwerk met 5 regelmatige punten op een cirkel met diameter 100 km. Er zijn wegen tussen elk punt. Simulaties behandelen netwerken met 5, 10, 15 en 20 knooppunten.

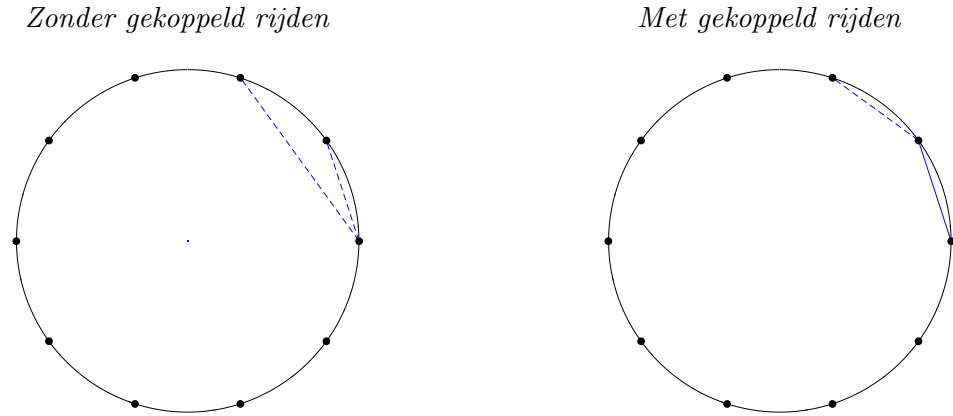
Verplaatsingen

Dit experiment beschouwt alle mogelijke verplaatsingen tussen de knooppunten. Dit zijn er $(K * K) - K$ met K het aantal knooppunten. De verplaatsingen worden verondersteld geen tijdsvensters te hebben.

Resultaten

Het doel van dit experiment is om de mogelijke besparingen voor de gedefinieerde verplaatsingen te bepalen op het cirkelvormig netwerk. Het experiment onderzoekt de impact van het verlagen van de voertuigkilometerkost op de geïdentificeerde mogelijke verplaatsingen. Hiervoor beschouwt het experiment enkel kostscenario 0, 1 en 2. Daarnaast onderzoekt het experiment ook welke invloed het verhogen van de netwerkdensiteit – in dit geval dus het aantal knooppunten K – heeft op de mogelijke besparingen.

Tabel 6.2 vat de mogelijke besparingen op het beschouwde netwerk samen in functie van de netwerkdensiteit en het kostscenario. Merk op dat elke besparing voortvloeit uit een routewijziging. Doordat er wegen zijn tussen elk knooppunt is er immers geen enkele kortste route in het netwerk die overlapt met een andere. Figuur 6.2 visualiseert van één paar verplaatsingen die gekoppeld gaan rijden de routewijziging op een netwerk met 10 knooppunten. Gezien de regelmatigheid van het netwerk is dit patroon van routewijzigingen uitbreidbaar over het hele netwerk.



Figuur 6.2: Vergelijking van twee verplaatsingen in onafhankelijk rijregime (links) en dezelfde verplaatsingen in gekoppeld rijregime (rechts). De blauwe stippellijnen in duiden wegen aan waarop onafhankelijk gereden wordt. De blauwe volle lijn duidt een weg aan waarop gekoppeld gereden wordt.

Tabel 6.2: Resulterende besparingen in functie van het kostscenario en het aantal knooppunten K van een cirkelnetwerk. Er zijn $K^2 - K$ verplaatsingen en wegen tussen elk knooppunt.

K	Kostscenario	Kost [€]	Besparing [€]	Besparing [%]
5	0	€ 1.795,80	€ 0	0%
	1	€ 1.795,80	€ 0	0%
	2	€ 1.795,80	€ 0	0%
10	0	€ 7.368,10	€ 0	0%
	1	€ 7.366,58	€ 1,52	0%
	2	€ 7.271,17	€ 96,93	1,3%
15	0	€ 16.655	€ 0	0%
	1	€ 16.606,65	€ 48,35	0,3%
	2	€ 16.004,28	€ 650,72	3,9%
20	0	€ 29.656	€ 0	0%
	1	€ 29.419,16	€ 236,84	0,8%
	2	€ 28.060,99	€ 1.595,01	5,4%

Het eerste wat opvalt is dat de te realiseren besparingen stijgen met de netwerk-densiteit. Dit is een logisch resultaat. Naarmate de netwerk-densiteit stijgt, daalt immers de extra te rijden afstand om gekoppeld rijden tot stand te brengen. In Hoofdstuk 4 bleek dat de verhouding van de gekoppeld gereden afstand en de extra te rijden afstand om gekoppeld rijden tot stand te brengen groot moet zijn. Deze simulaties bevestigen dit. Voor een netwerk met 20 knooppunten stijgen de mogelijke besparingen voor kostscenario 2 tot 5,4 %. Dit betekent dat er een besparingspo-

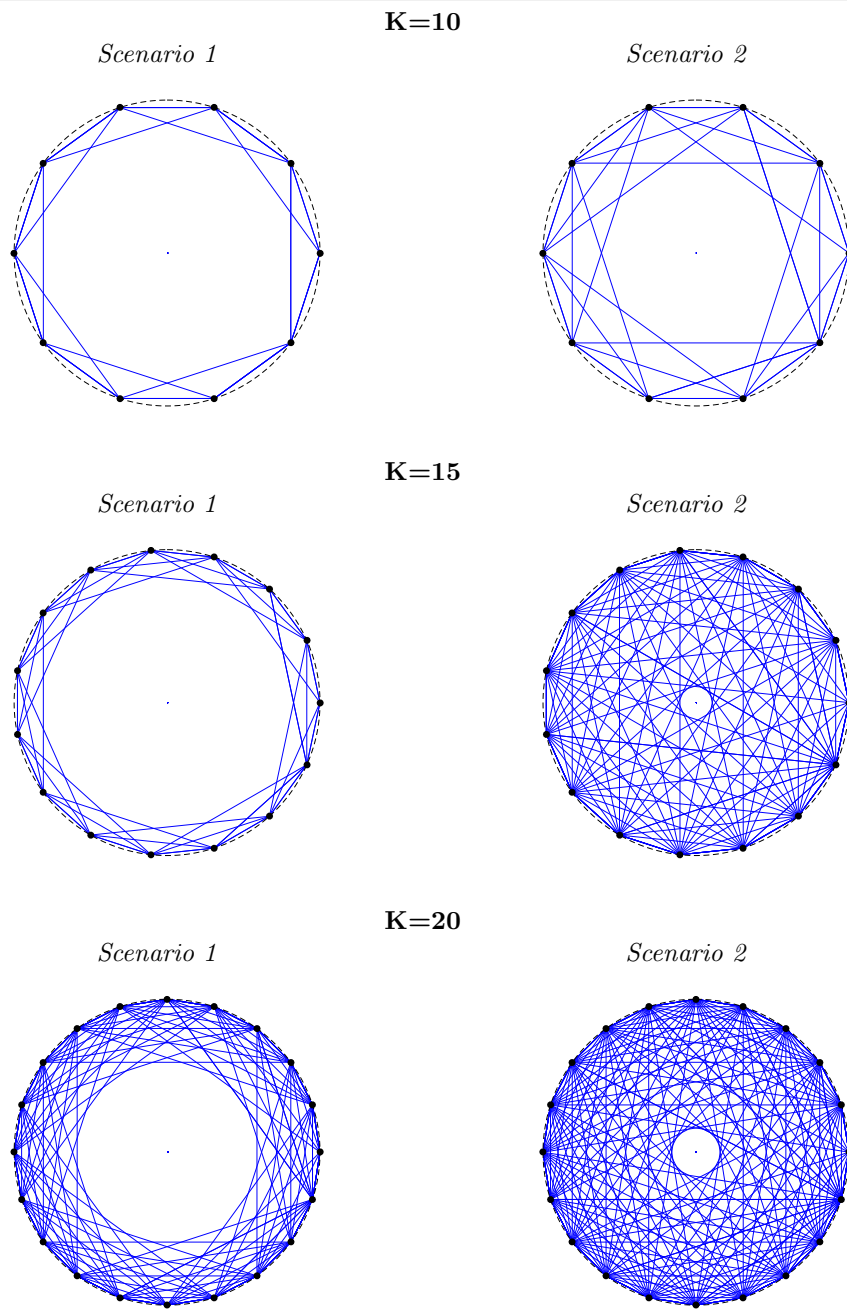
tentieel is van $\frac{5,4}{11} = 49\%$. Latere experimenten zullen tonen dat dit komt doordat alle verplaatsingen een verschillende oorsprong hebben en sowieso hun route moeten wijzigen om gekoppeld te rijden.

Een tweede inzicht is dat de verhouding van de te realiseren besparingen tussen kostscenario 2 en 1 groter is dan de verhouding van de bijhorende voertuigkilometerkosten. Dit resultaat suggereert dat meer verplaatsingen gekoppeld rijden in het tweede kostscenario. Figuur 6.3 visualiseert de resultaten uit Tabel 6.2. De figuur toont de kortste routes van de verplaatsingen die in het beschouwde kostscenario op het beschouwde netwerk gekoppeld gaan rijden. Uit een verdere analyse van de oplossing blijkt ook dat verplaatsingen met een gemeenschappelijke oorsprong of bestemming de meeste besparingen opleveren. Figuur 6.3 reflecteert dit inzicht ook.

Conclusie

De toepassing van het ontwikkelde model op het artificiële cirkelvormige netwerk met K regelmatige punten geeft logische resultaten. Uit de resultaten blijkt dat het verlagen van de voertuigkilometerkost meer besparingen met zich meebrengt. Het verhogen van de netwerkdensiteit heeft hetzelfde effect doordat de extra te rijden afstand om gekoppeld rijden in stand te brengen daalt. Voor een netwerk met 20 knooppunten kan er met kostscenario 2 een besparingspotentieel van 49% bereikt worden. Paren van verplaatsingen met eenzelfde oorsprong of bestemming zorgen voor de meeste besparingen. Dit komt ook in de volgende experimenten aan bod.

Het potentieel van gekoppeld rijden in dit experiment is groot. Een besparing van meer dan 5% is erg veel. Door de aard van het netwerk is de volledige besparing toe te kennen aan routewijzigingen. De impact op de routekeuze van gekoppeld rijden is in dit experiment dus groot.



Figuur 6.3: Vrachtwagens die gekoppeld gaan rijden. De blauwe lijnen duiden voor een cirkelvormig netwerk met $K = 10, 15$ en 20 de kortste routes aan van de verplaatsingen die gekoppeld zullen rijden in kostscenario 1 en 2.

6.2 Het Duitse Autobahn-netwerk

Het doel van dit experiment is om de werking van het ontwikkelde model te valideren door de resultaten ervan te vergelijken met eerder onderzoek. Het experiment tracht dit onderzoek ook uit te breiden. Simulaties van verplaatsingen met verschillende, willekeurige oorsprongen, simulaties met verplaatsingen met tijdsvensters en simulaties van gekoppeld rijden met 3 vrachtwagens leveren extra inzichten over gekoppeld rijden die waardevol kunnen zijn voor verder onderzoek.

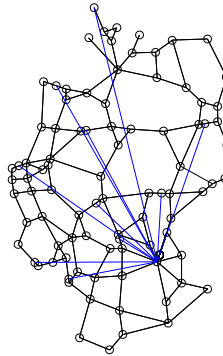
6.2.1 Netwerk

Eerder onderzoek, bijvoorbeeld het werk van Larson et al. (2013) [36] en Larsson et al. (2015) [37], gebruikte het Duitse Autobahn-netwerk om simulaties op uit te voeren. Het netwerk bestaat uit 647 knooppunten en 1390 links. Figuur 6.4 toont dit netwerk.

Het grote aantal knooppunten en links is nefast voor de rekentijd van het gebruikte algoritme. In het kader van dit onderzoek is daarom een dynamisch netwerk ontwikkeld. Dit gaat als basis uit van een sterk vereenvoudigde vorm van het Autobahn-netwerk (zie Figuur 6.4). Aan dit netwerk worden op dynamische wijze, afhankelijk van de oorsprongen en bestemmingen (cfr. supra), knooppunten toegevoegd. Dit zorgt er voor dat het aantal knooppunten minder snel problemen geeft bij het simuleren.



Figuur 6.4: Links: het originele Autobahn netwerk met 647 knooppunten, gebruikt in eerder onderzoek. Rechts: de basisvorm van het Autobahn-netwerk met 81 knooppunten waaraan het ontwikkelde algoritme dynamisch knooppunten toevoegt.



Figuur 6.5: Het dynamisch gegenereerde Autobahn netwerk. Het is duidelijk te zien hoe er voor de bestemmingen extra knooppunten zijn toegevoegd. De blauwe lijnen verbinden de oorsprong met de bestemmingen.

6.2.2 Verplaatsingen

Het gebruikte netwerk breidt dynamisch uit naargelang de beschouwde oorsprongen en bestemmingen. Figuur 6.5 toont een voorbeeld hiervan voor tien willekeurige verplaatsingen vanuit een willekeurige oorsprong.

De gebruikte sets van verplaatsingen zijn geïnspireerd door de onderzoeken van Larson et al. (2013) [36] en Larsson et. al. (2015) [37]. Ze zijn op te delen in twee groepen: ‘same-start’ problemen waarbij alle verplaatsingen een gemeenschappelijke oorsprong hebben en sets van verplaatsingen waarbij dit niet zo is. Per categorie simuleert dit experiment verschillende aantallen verplaatsingen.

6.2.3 Resultaten

De resultaten zijn onderverdeeld volgens het doel van de simulatie. Een eerste deel over simulaties met gemeenschappelijke oorsprong bespreekt de validiteit van het ontwikkelde model. Het tweede deel behandelt simulaties met verschillende oorsprongen. De impact van tijdsvensters op de besparingen door gekoppeld rijden wordt besproken in een derde deel. Tot slot behandelt het vierde deel simulaties met gekoppeld rijden van drie voertuigen.

Simulaties met gemeenschappelijke oorsprong

Tabel 6.3 vat de resultaten samen van één simulatie van verplaatsingen op het Autobahn netwerk met eenzelfde oorsprong en willekeurige bestemmingen. Dit zijn zogenoemde ‘same-start’ problemen. De parameter N duidt het aantal gesimuleerde verplaatsingen aan.

Tabel 6.3: Simulaties met N verplaatsingen met een zelfde oorsprong en een willekeurige bestemming in het Autobahn netwerk.

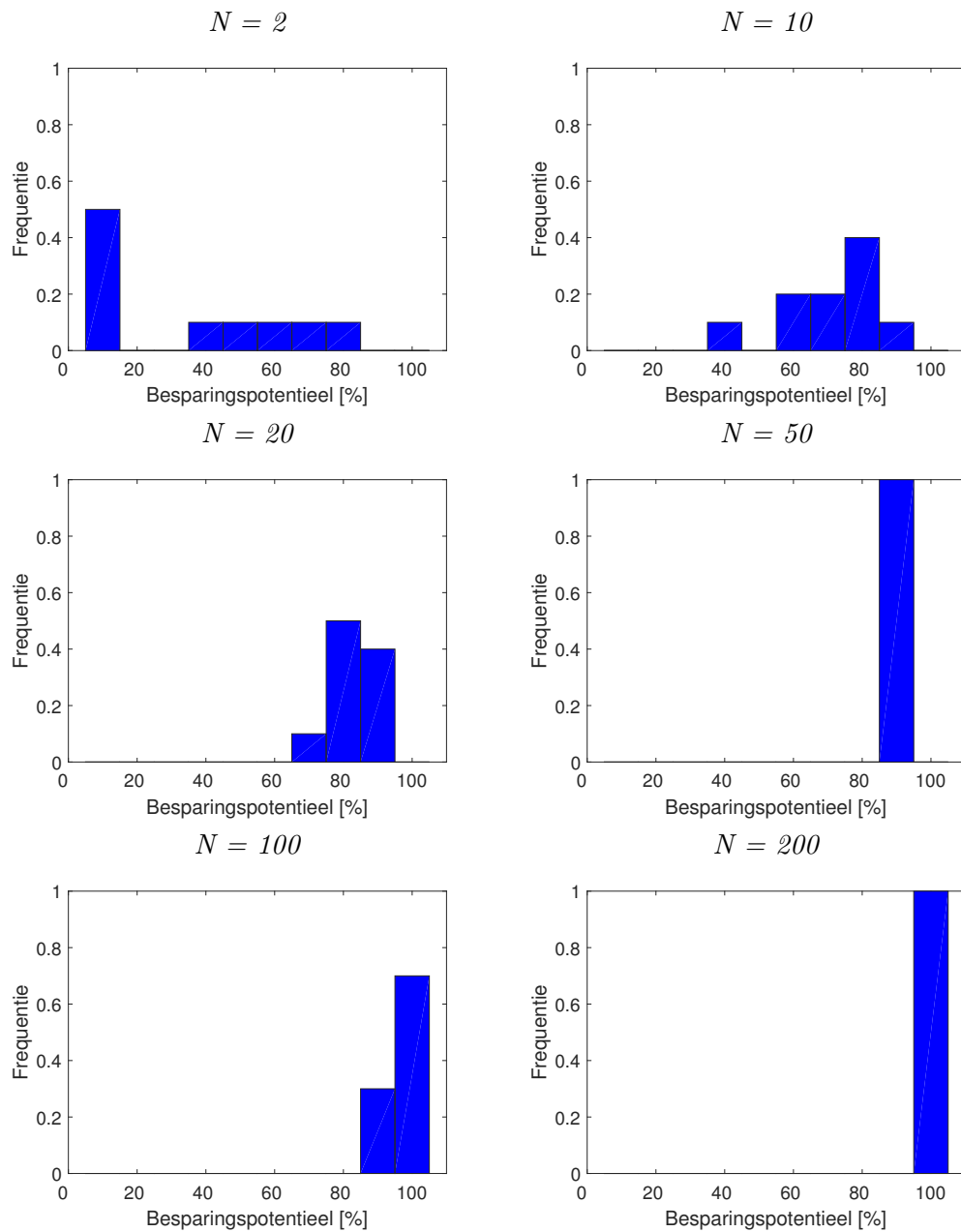
N	Scenario	Kost [€]	Besparing [€]	Besparing [%]
	0	€ 1.335	–	–
2	1	€ 1.284,94	€ 50,06	3,8%
	2	€ 1.224,86	€ 110,14	8,3 %
	0	€ 4.172	–	–
10	1	€ 4.047,60	€ 124,40	3,0%
	2	€ 3.910,15	€ 261,85	6,3 %
	0	€ 8.237,9	–	–
20	1	€ 7.929,93	€ 307,97	3,7%
	2	€ 7.542,16	€ 695,74	8,4 %
	0	€ 23.576	–	–
50	1	€ 22.538,30	€ 1.037,70	4,4%
	2	€ 21.293,07	€ 2.282,93	9,7 %
	0	€ 44.208	–	–
100	1	€ 42.229,70	€ 1.978,30	4,5%
	2	€ 39.855,74	€ 4.352,26	9,8 %
	0	€ 87.051	–	–
200	1	€ 82.997,31	€ 4.053,69	4,7%
	2	€ 78.159,58	€ 8.891,42	10,2%

Het is risicovol om op basis van één simulatie algemene conclusies te formuleren. Daarom werden tien simulaties uitgevoerd voor elk beschouwd aantal verplaatsingen met kostscenario 2. Figuur 6.6 toont hiervan het resultaat. Per aantal verplaatsingen is een histogram gegeven dat de frequentie van de besparingspotentiëlen van de verschillende simulaties aanduidt.

Ten eerste blijkt uit Figuur 6.6 dat het besparingspotentieel convergeert naar de bovengrens bij een stijgend aantal verplaatsingen. Voor simulaties met 200 verplaatsingen met dezelfde oorsprong worden consistent besparingspotentiëlen tussen 95% en 100% bereikt. Voor kostscenario 2 komt dit overeen met een besparing van meer dan 10%.

Ten tweede blijkt dat de variabiliteit het besparingspotentieel over de verschillende simulaties afneemt bij een toenemend aantal verplaatsingen. Waar voor 2 verplaatsingen het besparingspotentieel nog varieert tussen 0% en 85%, is de spreiding bij 200 verplaatsingen duidelijk veel lager.

6. EXPERIMENTEN



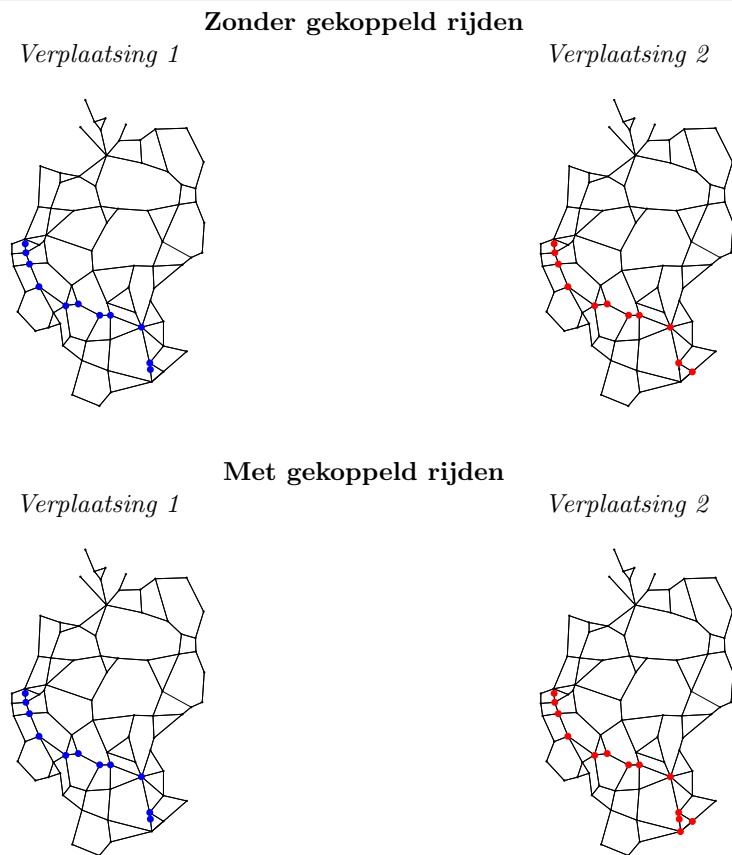
Figuur 6.6: Resultaten van de simulaties op het Autobahn netwerk voor N verplaatsingen met eenzelfde oorsprong en willekeurige bestemming. Voor elke simulatie is kostscenario 2 gehanteerd.

Het besparingspotentieel is dus veel hoger dan in vorig experiment met het artificiële netwerk. In het vorige experiment was voor elke mogelijke besparing dan ook een routewijziging nodig. Voor verplaatsingen met eenzelfde oorsprong op een reëel netwerk is dit vaak niet het geval. Zeker voor simulaties met veel verplaatsingen is er vaak een natuurlijke overlap tussen de kortste routes. Tabel 6.4 toont dit aan. Voor simulaties met 100 en 200 verplaatsingen zijn er in de simulaties van het netwerk geen routewijzigingen opgetreden. Voor simulaties met minder verplaatsingen waren er wel routewijzigingen.

Tabel 6.4: Het procentuele aantal verplaatsingen dat de route wijzigt om te besparen door gekoppeld rijden in functie van het aantal verplaatsingen N op het netwerk. De cijfers zijn de gemiddelden van 10 simulaties.

N	Routewijzigingen [%]
2	0%
10	9,3 %
20	10,5 %
50	7,5 %
100	0 %
200	0 %

Figuur 6.7 toont een voorbeeld van zo'n mogelijke routewijziging. De routewijzigingen zijn over het algemeen klein, waardoor het aandeel van de besparing dat toewijsbaar is aan routewijzigingen ook klein is. Uit de consistente verhouding van besparingen tussen kostscenario 1 en 2 in tabel 6.10 blijkt ook dat het kostscenario wijzigen geen significante impact heeft op het aantal routewijzigingen. Simulaties op een reële dataset in sectie 6.3 bevestigen dit.



Figuur 6.7: Voorbeeld van een routewijziging door gekoppeld rijden. De gereden route van de leider in gekoppeld rijden (blauw) wijzigt niet. De gereden route van de volger in gekoppeld rijden (rood) wijzigt wel.

De bereikte resultaten zijn erg gelijkaardig aan de resultaten die Larsson et al. (2015) [37] boekten. Zij kwamen immers voor netwerken met 200 verplaatsingen ook uit op een besparingspotentieel van meer dan 90%. Zij concludeerden in hun onderzoek dat:

Alle verplaatsingen laten starten vanuit eenzelfde oorsprong levert een optimale routekeuze met gekoppeld rijden met een brandstofbesparing van 9 % – 10 %. Dit is zo goed als mogelijk aangezien voertuigen in gekoppeld rijden slechts 90 % van hun origineel brandstofverbruik hebben. Vele kleinere probleeminstaties (maximum 10 verplaatsingen) werden opgelost met verschillende oorsprongen, maar leverden logischerwijze minder opportuniteiten voor gekoppeld rijden. [37]

Simulaties met verschillende oorsprong

Dit onderzoek tracht het onderzoek van Larsson et al. (2015) [37] uit te breiden door ook probleeminstanties tot 200 voertuigen op te lossen voor verschillende oorsprongen. Dit is mogelijk door het dynamisch maken van het netwerk (cfr. infra 6.2.1). Analooq aan vorig deel zijn simulaties uitgevoerd met 2, 10, 20, 50, 100 en 200 verplaatsingen met willekeurige oorsprong en bestemming in het Autobahn netwerk. Twintig simulaties met kostscenario 2 leiden tot de resultaten in Figuur 6.8. Hieruit blijkt wederom dat een groter aantal verplaatsingen consistent een groter besparingspotentieel oplevert.

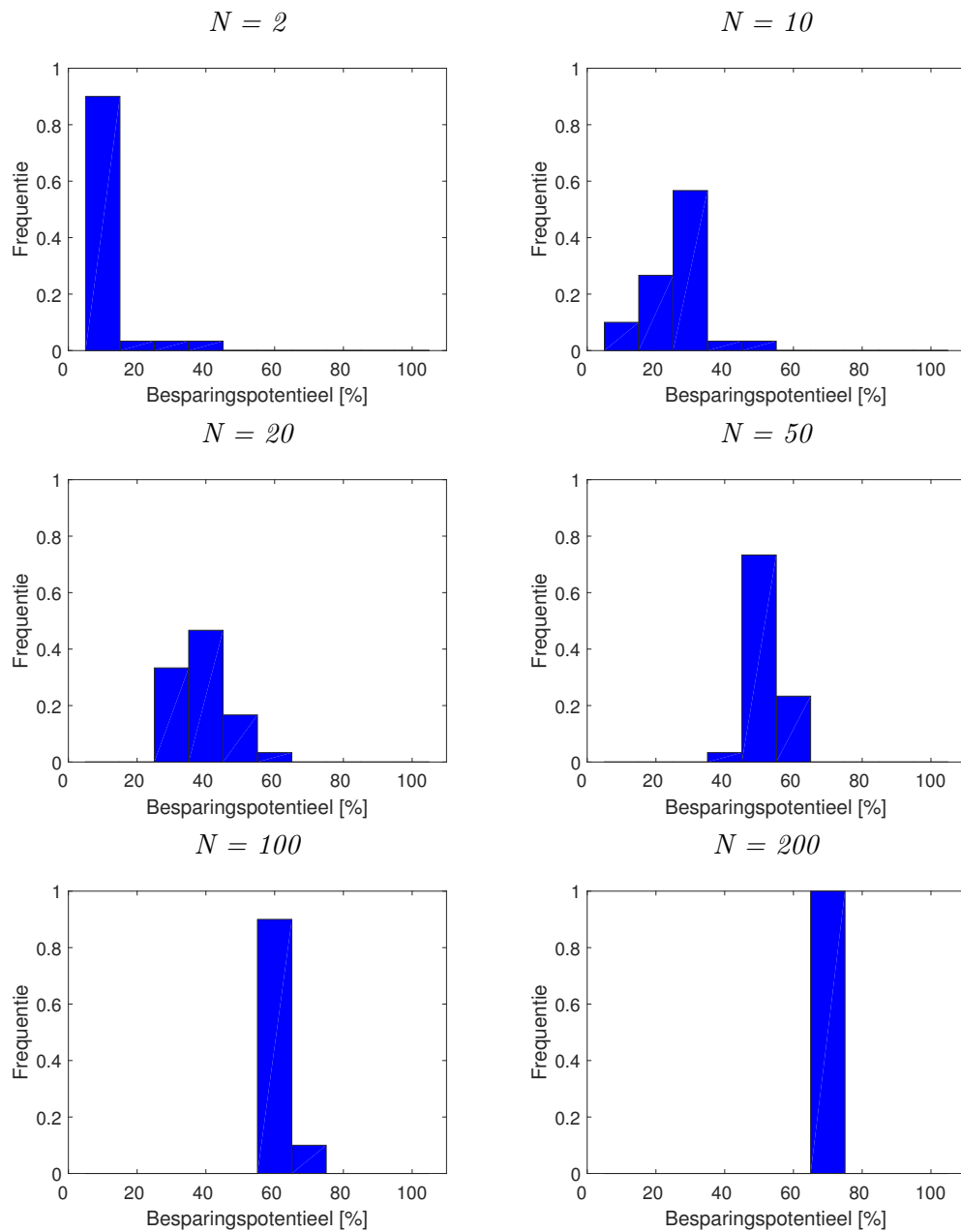
Simulaties van 200 verplaatsingen leiden tot een besparingspotentieel van zo'n 70%. Het besparingspotentieel is dus minder dan het besparingspotentieel van verplaatsingen met eenzelfde oorsprong. Uit de figuur blijkt ook dat de spreiding van het besparingspotentieel wederom daalt bij een groter aantal verplaatsingen.

Het lagere besparingspotentieel is vooral te wijten aan de nood aan meer routewijzigingen om de besparingen met gekoppeld rijden te kunnen realiseren. Tabel 6.5 toont het procentueel aantal routewijzigingen in functie van het aantal verplaatsingen. Hieruit blijkt duidelijk dat verplaatsingen met verschillende oorsprong en bestemming vaker routewijzigingen gaan doen om zo te besparen door gekoppeld rijden. Dit is beduidend meer dan in het 'same-start' probleem (zie Tabel 6.4).

Tabel 6.5: Het procentueel aantal verplaatsingen met willekeurige oorsprong en bestemming dat een routewijziging ondergaat om besparingen door gekoppeld rijden te realiseren in functie van het aantal verplaatsingen. De resultaten zijn uitgemiddeld over 10 simulaties met kostscenario 2.

N	Routewijzigingen [%]
2	0%
10	25,8 %
20	29,1 %
50	45,8 %
100	57,2 %
200	69,8 %

6. EXPERIMENTEN



Figuur 6.8: Resultaten van de simulaties op het Autobahn netwerk voor N verplaatsingen met willekeurige oorsprong en bestemming. Voor elke simulatie is kostscenario 2 gehanteerd.

Simulaties met tijdsvensters

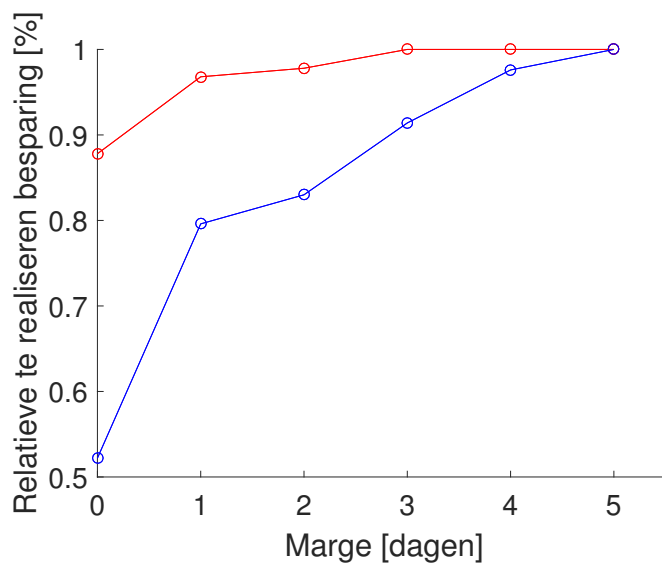
Dit deel onderzoekt, ook als aanvulling op het onderzoek van Larsson et al. (2015) [37], de impact van het invoeren van tijdsvensters op de mogelijke besparingen. De simulaties bepalen de tijdsvensters op de volgende manier:

$$\text{Ondergrens tijdsvenster} = \text{Ordertijdstip} + \text{reistijd}$$

$$\text{Bovengrens tijdsvenster} = \text{Ordertijdstip} + \text{reistijd} + \text{marge}$$

Voor elke verplaatsing kiest het algoritme een willekeurige dag waarop het transportorder geplaatst wordt. Het ordertijdstip wordt verondersteld het begin van deze dag te zijn. Het veronderstellen van een gemiddelde snelheid van $100 \frac{km}{u}$ laat toe eenvoudig de reistijden te berekenen. De simulaties veronderstellen een maximale reistijd van 9 uur per dag.

Figuur 6.9 visualiseert de gemiddelde resultaten van simulaties van 20 en 200 verplaatsingen met tijdsvensters. Voor elke gehanteerde marge voerde het algoritme 10 simulaties uit. De dataset met 200 verplaatsingen boet amper 10% in aan besparingspotentieel. Bij de dataset met 20 verplaatsingen is dit zo'n 50%.



Figuur 6.9: De verhouding van het besparingspotentieel met tijdsvensters en het besparingspotentieel zonder tijdsvensters in functie van de gehanteerde marge. De marge duidt het verschil tussen de bovengrens van het tijdsvenster en het vroegst mogelijke aankomsttijdstip aan. De rode lijn duidt de resultaten aan voor de dataset met 200 verplaatsingen. De blauwe lijn doet dit voor de dataset met 20 verplaatsingen.

De invloed van het invoeren van tijdsvensters op de impact van gekoppeld rijden op routekeuze en planning is niet te onderschatten. De tijdsvensters kunnen de natuurlijke overlap enorm beperken.

Uit simulaties met datasets van 200 verplaatsingen en een tijdsvenster met marge van 0 dagen blijkt dat de impact van gekoppeld rijden op de routekeuze het grootst is. Het aandeel in de besparingen door routewijzigingen loopt op tot 20%. Dat van planningswijzigingen is amper 3%. Het effect van het verhogen van de planningsynchronisatiekost is bijgevolg verwaarloosbaar.

Op datasets van 50 verplaatsingen heeft het verhogen van de planningsynchronisatiekost ook geen significante invloed. Het invoeren van tijdsvensters heeft wederom een grote impact op het aantal routewijzigingen. Dit komt omdat de natuurlijke overlap van route en planning daalt. Het besparingspotentieel verlaagt hierdoor met 20 % – 25 %.

Tabel 6.6: Het besparingspotentieel en het aantal route- en planningswijzigingen in functie twee scenario's van de kost om te vroeg te komen (c_e). De simulaties zijn tien keer uitgevoerd met datasets van 50 verplaatsingen vanuit één willekeurige oorsprong met willekeurige bestemmingen.

	Marge [dagen]	c_e	
		€ 25	€ 50
Besparingspotentieel [%]	0	63 %	60 %
	5	85 %	87,4 %
Routewijzigingen [%]	0	23,7 %	22,5 %
	5	12,5 %	11,7 %
Planningswijzigingen [%]	0	10 %	10 %
	5	0 %	0 %

Het feit dat de planningsynchronisatiekost zo weinig invloed heeft is omdat de doorgevoerde routewijzigingen erg klein zijn. Vaak gaat het om een heel klein stukje traject dat wijzigt (zie Figuur 6.7). Hierdoor is de kost voor planningsynchronisatie onbestaand ofwel verwaarloosbaar. De impact van een wijziging van deze kost voor planningsynchronisatie is daarom ook verwaarloosbaar, zoals Tabel 6.6 toont.

Simulaties met 3 voertuigen die gekoppeld rijden

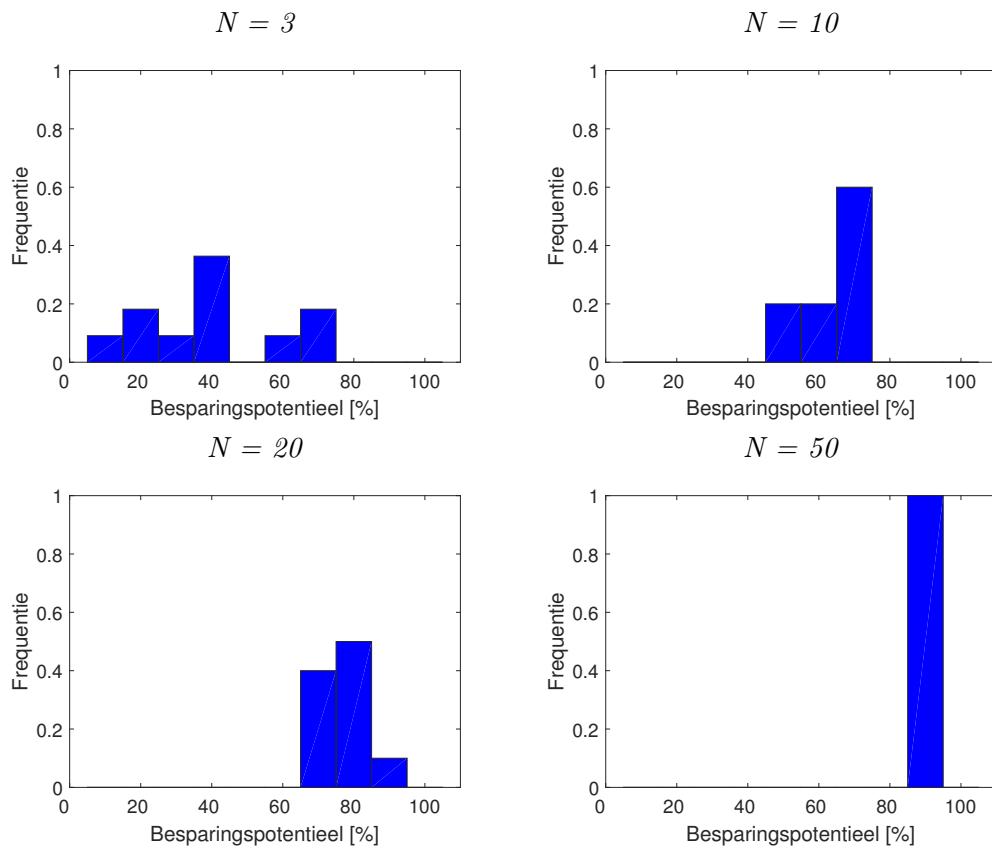
Dit deel bespreekt de resultaten van simulaties waarbij gekoppeld rijden met drie voertuigen mogelijk is. Kostscenario 3 geeft de voertuigkilometerkost hiervan weer.

Algoritme 2 (Appendix D beschrijft de uitbreiding van de ‘Best Pair’ heuristiek naar gekoppeld rijden met 3 voertuigen. Deze uitbreiding heeft een negatieve impact op de rekentijd. Dit komt omdat het aantal mogelijke combinaties van drie verplaatsingen veel groter is dan het aantal combinaties van twee getallen. Door de sterk verhoogde rekentijd zijn slechts simulaties tot 50 voertuigen uitgevoerd.

Figuur 6.10 geeft hiervan het resultaat. Hieruit blijkt dat gekoppeld rijden met drie voertuigen een gelijkaardig besparingspotentieel heeft als gekoppeld rijden met twee voertuigen. Dit is een logisch resultaat. Absoluut gezien zijn de besparingen door gekoppeld rijden met drie voertuigen echter zo’n 4% hoger, onder de assumpties gegeven in deel 2.2.5. Het realiseren van deze besparingen zal echter eerder voor de lange termijn zijn.

Ondanks het logische resultaat, is de praktische waarde van het algoritme beperkt indien het slechts 50 verplaatsingen kan simuleren. Een ‘Best Pair’ heuristiek met daaraan gekoppeld een lokale zoekheuristiek kan de rekentijd waarschijnlijk verbeteren, echter ten koste van de kwaliteit het resultaat. Verder onderzoek hiernaar is aangewezen.

6. EXPERIMENTEN



Figuur 6.10: Resultaten van de simulaties op het Autobahn netwerk voor N verplaatsingen met eenzelfde oorsprong en willekeurige bestemming. Voor elke simulatie wordt kostscenario 2 gehanteerd.

6.2.4 Conclusie

Het oplossen van ‘same-start’ problemen met verschillende aantallen verplaatsingen valideert de werking van het model. De bekomen resultaten zijn immers in lijn met resultaten uit eerder onderzoek.

Simulaties van problemen met willekeurige oorsprongen en bestemmingen zijn uitgevoerd voor datasets met 2, 10, 20, 50, 100 en 200 verplaatsingen. Hieruit bleek dat het besparingspotentieel daalde, doordat er veel meer routewijzigingen – en dus meer kosten door de extra te rijden afstand – zijn om gekoppeld rijden tot stand te brengen. Het aantal routewijzigingen stijgt met het aantal verplaatsingen. Dat komt omdat de routewijzigingen relatief goedkoper worden met een stijgend aantal verplaatsingen.

Het in rekening brengen van tijdsvensters heeft vooral een grote impact op datasets met weinig verplaatsingen. Bij een groot aantal verplaatsingen is de natuurlijke overlap in route én tijd groot genoeg. Op die manier moet er voor een dataset met 200 verplaatsingen slechts 10% ingeboet worden in besparingspotentieel. Voor een dataset met maar 20 verplaatsingen is dit bijna 50%.

Uit simulaties van problemen waarbij gekoppeld rijden met drie voertuigen mogelijk is, lijkt dat het ontwikkelde model niet in staat is het volledige potentieel van gekoppeld rijden met drie voertuigen te onderzoeken. Hiervoor is verder onderzoek nodig. Vermoedelijk kan gekoppeld rijden met meerdere voertuigen extra besparingen opleveren bij ‘same-start’ problemen. Voor problemen met verschillende oorsprongen en bestemmingen zullen de extra routewijzigingen de extra besparingen waarschijnlijk opheffen.

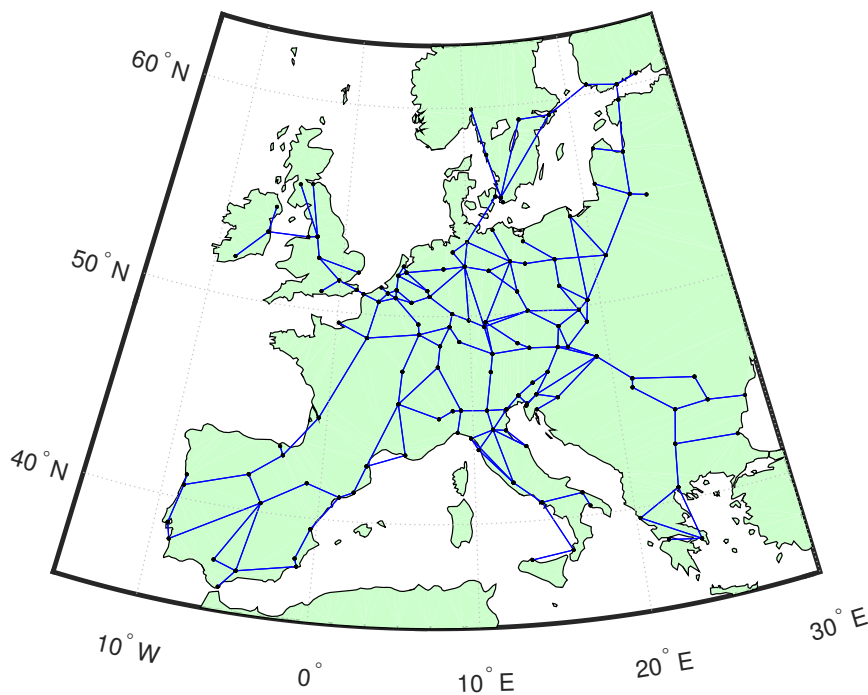
Dit experiment maakt ook duidelijk dat gekoppeld rijden een groot potentieel heeft om besparingen te realiseren. De impact op de routekeuze en de planning blijkt hier wel verwaarloosbaar te zijn voor datasets met veel verplaatsingen vanuit een gemeenschappelijke oorsprong. Indien het aantal verplaatsingen vanuit één oorsprong groot genoeg – zo’n 200 – is er veel kans op natuurlijke overlap van de kortste routes en van de planning van verplaatsingen. Zo’n overlap maakt gekoppeld rijden mogelijk zonder een meerkost van het wijzigen van de route of de planning met zich mee te brengen. In realiteit zal er dus weinig impact op de route- en planningkeuze zijn van grote bedrijven door gekoppeld rijden. Bij kleine bedrijven kan dit anders zijn. Hun besparingspotentieel is veel lager. Er is weinig natuurlijke overlap tussen hun verplaatsingen, waardoor kostelijke route- en planningswijzigingen nodig zijn om gekoppeld te kunnen rijden. De simulaties van verplaatsingen met willekeurige oorsprong en bestemming maken dit duidelijk. Dit gekoppeld rijden zou dan in samenwerking met andere transportbedrijven kunnen zijn, onder begeleiding van een derde partij.

6.3 Trans-Europees Transportnetwerk

In de vorige secties is de goede werking van het ontwikkelde model aangetoond. De experimenten op het artificieel cirkelnetwerk en het Autobahn-netwerk met willekeurige verplaatsingen hebben tot belangrijke inzichten geleid. Dit experiment, op het Trans-Europees Transportnetwerk, onderzoekt de impact van gekoppeld rijden op een reële dataset.

6.3.1 Netwerk

Het Trans-Europees Transportnetwerk is een Europees wegennetwerk dat zo'n 90.000 km aan wegen omvat. Het netwerk is de beleidsprioriteit van de Europese Commissie en heeft als functie het vlot transporteren van personen en goederen door Europa [43]. Figuur 6.11 toont dit netwerk.



Figuur 6.11: Het Trans-Europees Transport netwerk. De blauwe lijnen tonen de connecties tussen de knooppunten. De lijnen houden geen rekening met de topologie van de wegen, deze is in rekening gebracht in de afstandsmatrix.

Om de afstanden tussen de knooppunten te bepalen is de *ViaMichelin* routeplanner gebruikt. In de routeplanner is de optie 'voorkeur voor snelwegen' gebruikt en de afstanden zijn symmetrisch verondersteld. Dit leidt tot een 137 x 137 afstandsmatrix.

6.3.2 Verplaatsingen

Simulaties op een netwerk van Europese schaal zijn slechts relevant voor verplaatsingen op Europese schaal. Voor zuiver nationale verplaatsingen kan een fijnmaziger netwerk, zoals het Autobahn-netwerk, gebruikt worden om nauwkeurigere resultaten te geven.

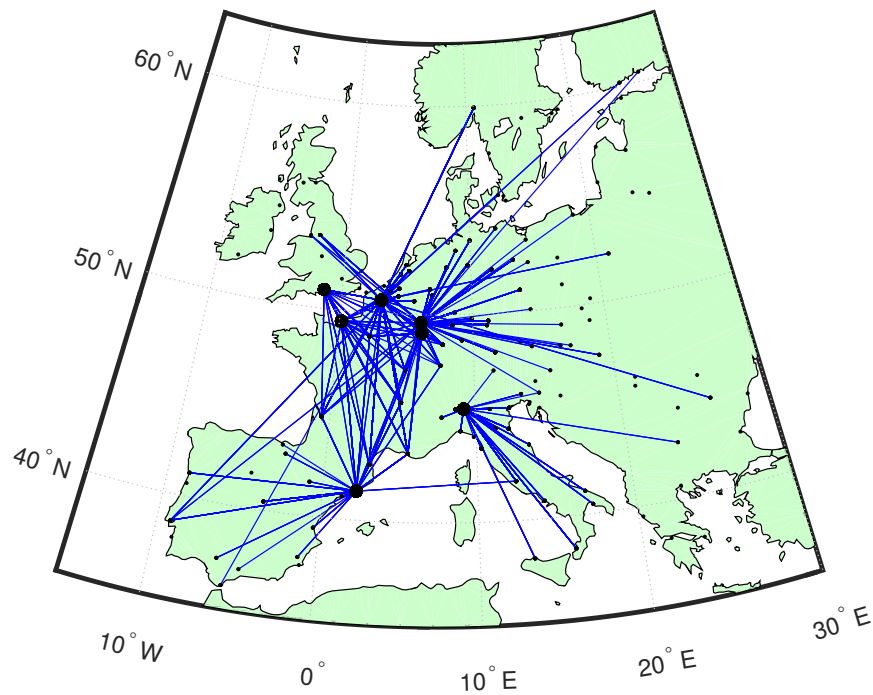
Met dank aan Dr. Bart Vannieuwenhuysse is een relevante dataset bekomen. Deze bevat 1663 verplaatsingen, afgehandeld door een transportbedrijf in één week. Tabel 6.7 toont een rij ('record') van de dataset. De volgende variabelen zijn gegeven:

- **Origin:** de landcode, stad en postcode van de oorsprong
- **Xorig:** de longitudinale coördinaat van de oorsprong
- **Yorig:** de latitudinale coördinaat van de oorsprong
- **Destination:** de landcode, stad en postcode van de bestemming
- **Xdest:** de longitudinale coördinaat van de bestemming
- **Ydest:** de latitudinale coördinaat van de bestemming
- **Order date:** de datum waarop de bestelling voor transport ontvangen is
- **Order:** het bestelnummer
- **Pallet:** het aantal bestelde palletten
- **Weight [KG]:** het totaal te transporteren gewicht

Tabel 6.7: Een rij uit de verkregen dataset met Europese verplaatsingen van een week van een transportbedrijf

Origin	Xorig	Yorig	
IT;BAGNATICA;24060	9.7821945	45.661895	
Destination	Xdest	Ydest	
BG;SOFIA;1000	23.3222839	42.6976262	
Order date	Order	Pallet	Weight [KG]
4/9/2014	1	66	17800

Met behulp van een dichtste buur zoekalgoritme ('Nearest Neighbor Search') zijn de oorsprongen en bestemmingen van de dataset afgebeeld op knooppunten van het Trans-Europese netwerk. De verplaatsingen met een resulterende oorsprong en bestemming op eenzelfde knooppunt zijn vervolgens verwijderd uit de dataset. Hierna blijven er 1532 verplaatsingen over. Figuur 6.12 verbindt de overblijvende oorsprongen met de bestemmingen van de dataset. Zo krijgt men een goed beeld van de locaties van de oorsprongen en de bestemmingen.



Figuur 6.12: Visualisatie van de oorsprongen en bestemmingen van de dataset. Elke blauwe lijn verbindt een oorsprong met een bestemming zonder rekening te houden met de topologie van het netwerk. De zwarte stippen duiden de oorsprongen aan.

Hieruit blijkt dat er veel verplaatsingen vertrekken vanuit gemeenschappelijke oorsprongen. Uit de dataset blijkt dat er slechts 7 oorsprongen in het netwerk, dus vertrekregio's, zijn:

- Metz
- Lille
- Milaan
- Luxemburg
- Le Havre
- Southhampton
- Barcelona

Aparte simulaties zijn uitgevoerd voor deze verplaatsingen met dezelfde oorsprong ('same-start' problemen).

6.3.3 Resultaten

Simulaties zonder tijdsvensters

Omdat er in de dataset geen concrete tijdsvensters gedefinieerd zijn houden simulaties hier initieel geen rekening mee. Dit deel veronderstelt dat alle verplaatsingen uit te stellen of te vervroegen zijn zonder dat dit extra kosten impliceert. Dit is een optimistische veronderstelling. Hierop volgende simulaties zullen wel tijdsvensters in rekening brengen.

Het toepassen van het ontwikkelde algoritme leidt tot een paarsgewijze koppeling van verplaatsingen die tot besparingen leiden door gekoppeld rijden. Tabel E.1 in Appendix E geeft hiervan een voorbeeld op het beschouwde netwerk.

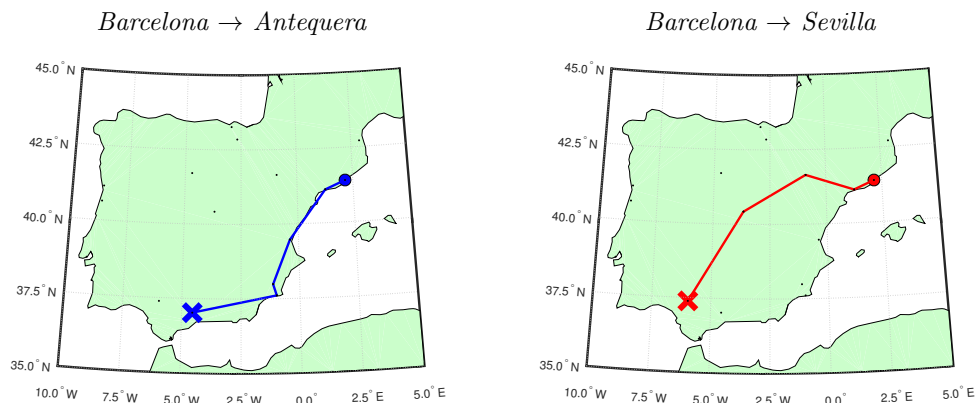
Tabel 6.8 toont de resultaten van de simulaties voor de volledige dataset. Hieruit blijkt dat er, onder de assumptie dat tijdsvensters genegeerd mogen worden, in kostscenario 1 en 2 respectievelijk 4,9 % en 10,7 % bespaard kan worden. Dit komt overeen met een besparingspotentieel van meer dan 97%. Gezien de erg krappe winstmarges ($\approx -2\% - 2\%$, cfr. infra) in de sector is dit een enorme besparing. Het negeren van tijdsvensters zorgt echter voor een overschatting (cfr. supra).

Tabel 6.8: Resultaten door gekoppeld rijden van 1532 verplaatsingen uit een reële dataset in het Trans-Europees Transportnetwerk.

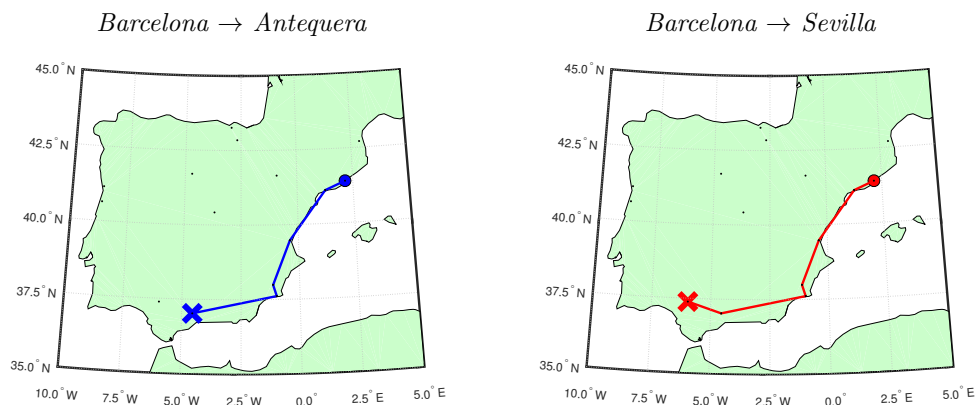
Kostscenario	Kost [€]	Besparing [€]	Besparing [%]
0	€ 1.225.700	–	–
1	€ 1.166.139,94	€ 59.560,06	4,9 %
2	€ 1.094.194,30	€ 131.505,70	10,7 %

Uit een analyse van de bekomen oplossing van het routekeuze probleem blijkt dat voor 1522 van de 1532, ofte 99% van de verplaatsingen in de dataset, gekoppeld rijden kan besparen onder de assumptie dat tijdsvensters genegeerd mogen worden. Van deze 1522 verplaatsingen zijn er in kostscenario 1 slechts twee die hun route wijzigen. In kostscenario 2 zijn dit er drie. Figuur 6.13 toont er één van. Samen leiden deze verplaatsingen in kostscenario 2 tot € 591,40 besparingen. Dit is een verwaarloosbaar aandeel in de totale besparing. De meeste besparingen zijn dus toe te schrijven aan een natuurlijke overlap van routes gecombineerd met een synchronisatie van de planning.

Zonder gekoppeld rijden



Met gekoppeld rijden



Figuur 6.13: Voorbeeld van een routewijziging door gekoppeld rijden in het Trans-Europees Transportnetwerk. De gereden route van Barcelona naar Antequera van de leider in gekoppeld rijden (blauw) wijzigt niet. De gereden route van de volger van Barcelona naar Sevilla in gekoppeld rijden (rood) wijzigt wel.

Wat ook opvalt is het aantal dubbel voorkomende verplaatsingen in de dataset. Het verwijderen van de duplicaten leidt tot een compactere dataset met slechts 150 verplaatsingen. Het uitvoeren van simulaties op deze gereduceerde dataset leidt tot het resultaat samengevat in Tabel 6.9. De besparingen dalen hierdoor, maar zijn nog steeds groot. Het besparingspotentieel blijft hoger dan 75%. Het is dus niet zo dat gekoppeld rijden enkel besparingen oplevert omdat er veel 'dubbele' verplaatsingen zijn. Dit resultaat is in lijn met het resultaat van simulaties op het Autobahn-netwerk dat verplaatsingen met verschillende oorsprongen- en bestemmingen nog steeds significante besparingen kunnen opleveren.

Tabel 6.9: Resultaten door gekoppeld rijden van verplaatsingen uit een gereduceerde reële dataset in het Trans-Europees Transportnetwerk. De dubbel voorkomende verplaatsingen zijn verwijderd.

Kostscenario	Kost [€]	Besparing [€]	Besparing [%]
0	€ 150.110	–	–
1	€ 144.382,20	€ 5.727,80	3,8 %
2	€ 137.396	€ 12.714	8,5 %

Zoals eerder aangehaald zijn er slechts zeven oorsprongsknooppunten in de bestudeerde dataset. Tabel 6.10 vat de resultaten van de simulaties van de zeven ‘same-start’ problemen samen. Uit het optellen van de besparingen en het vergelijken hiervan met Tabel 6.8 volgt dat 99,9 % van de te realiseren besparingen bereikt kan worden door de ‘same-start’ problemen op te lossen. In datasets met veel verplaatsingen met gemeenschappelijke oorsprong kan het probleem dus opgesplitst worden in verschillende ‘same-start’ problemen, wat de rekestijd ten goede komt.

Tabel 6.10: Resulterende besparingen volgens verschillende kostscenario’s van de verplaatsingen, geclusterd per oorsprong, uit een reële dataset in het Trans-Europees Transportnetwerk.

Vertrekpunt	Kostscenario	Kost [€]	Besparing [€]	Besparing [%]
Metz	0	€ 32.137	–	–
	1	€ 30.591,54	€ 1.545,46	4,8%
	2	€ 28.736,99	€ 3.400,01	10,6%
Lille	0	€ 544.920	–	–
	1	€ 518.140,73	€ 26.779,27	4,9%
	2	€ 486.005,62	€ 58.914,38	10,8%
Milaan	0	€ 131.190	–	–
	1	€ 124.755,63	€ 6.434,37	4,9%
	2	€ 117.034,38	€ 14.155,62	10,8 %
Luxemburg	0	€ 277.740	–	–
	1	€ 264.348,21	€ 13.391,79	4,8%
	2	€ 248.275	€ 29.465	10,6%
Le Havre	0	€ 33.063	–	–
	1	€ 31.529,10	€ 1.533,90	4,6 %
	2	€ 29.688,41	€ 3.374,59	10,2%
Barcelona	0	€ 141.590	–	–
	1	€ 134.854,08	€ 6.735,92	4,8 %
	2	€ 126.721,95	€ 14.868,05	10,5%
Southampton	0	€ 65.070	–	–
	1	€ 61.941	€ 3.129	4,8 %
	2	€ 58.186,29	€ 6.883,71	10,6 %

Simulaties met tijdsvensters

Het is nodig om de assumptie met betrekking tot de tijdsvensters te verstrengen om een realistisch beeld te krijgen van de impact van gekoppeld rijden. Volgende simulaties doen dit. De simulaties bepalen de tijdsvensters weer op de volgende manier:

$$\text{Ondergrens tijdsvenster} = \text{Ordertijdstip} + \text{reistijd}$$

$$\text{Bovengrens tijdsvenster} = \text{Ordertijdstip} + \text{reistijd} + \text{marge}$$

In de dataset is enkel de dag gegeven waarop het order geplaatst wordt (zie Tabel 6.7). Het ordertijdstip wordt verondersteld het begin van deze dag te zijn. Veronderstellen van een gemiddelde snelheid van $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ laat toe eenvoudig de reistijden te berekenen. De simulaties veronderstellen een maximale reistijd van 9 uur per dag.

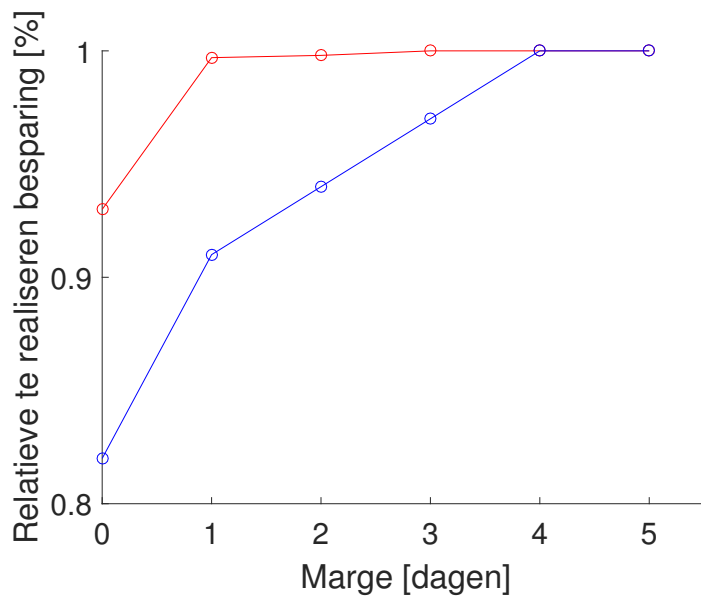
De simulaties analyseren de besparingen door gekoppeld rijden in functie van de gehanteerde marge voor de ‘same-start’ problemen vanuit Luxemburg en Metz. Figuur 6.14 toont het resultaat. Het resultaat is in lijn met de analyse van impact van de tijdsvensters op het Autobahn-netwerk. Het invoeren van tijdsvensters verlaagt de mogelijke besparingen van de verplaatsingen vanuit Metz het meest. Het besparingspotentieel daalt met bijna 20%. De besparingen door verplaatsingen vanuit Luxemburg dalen veel minder; de relatieve te realiseren besparing blijft hoger dan 90%. Het feit dat er vanuit Metz slechts 58 verplaatsingen vertrekken en vanuit Luxemburg 351 verklaart dit. Tabel E.2 en E.3 in Appendix E geven in detail de besparingen van de simulaties.

Door de meerkost van planningsynchronisatie is gekoppeld rijden in veel gevallen niet meer besparend. Hierdoor wordt er minder gekoppeld gereden, wat tot een lager besparingspotentieel leidt. Het aandeel van de planningsynchronisatie in de besparingen in dit experiment is nihil.

6.3.4 Conclusie

Dit experiment toont wederom het enorme potentieel van gekoppeld rijden aan. In de beschouwde dataset zijn er veel verplaatsingen vanuit gemeenschappelijke oorsprongen. Dit leidt tot een mogelijke procentuele besparing van 4,9% en 10,7% in kostscenario 1 en 2 respectievelijk. Dit komt overeen met een besparingspotentieel van meer dan 97%. Het negeren van tijdsvensters leidt tot een oplossing waarbij de impact op de routekeuze verwaarloosbaar is. Er is immers voldoende natuurlijke overlap in de kortste routes om een grote besparing te bewerkstelligen.

In dit experiment heeft het invoeren van tijdsvensters een beperkte invloed op het besparingspotentieel. Voor de same-start problemen daalt het besparingspotentieel maximaal met 20%. De oorzaak hiervan is het grote aantal verplaatsingen met dezelfde oorsprong, dezelfde bestemming en hetzelfde ordertijdstip. Hierdoor is gekoppeld rijden zonder meerkost vaak mogelijk.



Figuur 6.14: De potentiële procentuele besparingen door gekoppeld rijden voor de verplaatsingen vanuit Metz (blauw) en Luxemburg (rood), afhankelijk van de tijdsvensters. De marge duidt het verschil tussen de bovengrens van het tijdsvenster en het vroegst mogelijke aankomsttijdstip aan.

6.4 Conclusie

De drie uitgevoerde experimenten toonden de goede werking van het ontwikkelde model aan en laten toe een antwoord te formuleren op de derde onderzoeksvraag. Het potentieel van gekoppeld rijden is onmiskenbaar. Twee soorten situaties kunnen onderscheiden worden.

Eenzijds de situatie waarbij er veel – grootteorde 200 – verplaatsingen zijn vanuit gemeenschappelijke oorsprongen. Het potentieel van gekoppeld rijden is hier het grootst. Besparingspotentiëlen van 97% kunnen behaald worden. Voor kostscenario 1, hetgeen het snelst implementeerbaar is, komt dit overeen met een besparing van 4,5% tot 5%. Door het grote aantal verplaatsingen is er een grote natuurlijke overlap in route en planning waardoor de impact hierop van gekoppeld rijden verwaarloosbaar is.

Anderzijds kunnen situaties optreden waarbij er weinig – grootteorde 20 – verplaatsingen vanuit gemeenschappelijke oorsprongen zijn. Het besparingspotentieel is hier lager. Afhankelijk van de tijdsvensters kan het besparingspotentieel tot 50% dalen door nodige planningswijzigingen. De extra te rijden afstand om gekoppeld rijden tot stand te brengen kan het besparingspotentieel hier tot 30% doen dalen. Dit zijn erg conservatieve cijfers, maar de impact op routekeuze en planning is dus wel voelbaar. De route en planning van de verplaatsingen wijzigt in deze situatie vaker om zo gekoppeld rijden toch mogelijk te maken. Hierdoor zouden, op

6. EXPERIMENTEN

voorwaarde dat er coördinatie met verplaatsingen vanuit verschillende oorsprongen kan optreden, besparingen tussen de 0% en 2% mogelijk kunnen zijn in kostscenario 1.

Deel III
Conclusies

Hoofdstuk 7

Discussie

Dit hoofdstuk overloopt de antwoorden op de onderzoeksvragen en toetst deze aan de huidige context van de transportsector. Hierdoor is het mogelijk een inschatting te maken van hoe gekoppeld rijden geïmplementeerd kan worden. Het hoofdstuk geeft een implementatieplan van gekoppeld rijden voor de Belgische wegtransportsector. Opportuniteiten voor verder onderzoek sluiten het hoofdstuk af.

7.1 Gekoppeld rijden als logische stap in de evolutie naar geautomatiseerd vrachttransport

Uit het onderzoeken van de technologische haalbaarheid van geautomatiseerde voertuigen bleek dat een implementatie van gekoppeld rijden een logische stap richting de toekomst is. Gekoppeld rijden biedt veel voordelen zonder een ingrijpende verandering te veroorzaken in het verkeer. Dit is uiteraard afhankelijk van de implementatievorm. Het onderzoek onderscheidt verschillende vormen, gaande van gekoppeld rijden met twee bemande voertuigen tot gekoppeld rijden met drie voertuigen waarvan slechts het eerste bemand is. Om dit laatste stadium te realiseren zijn er echter aanpassingen nodig aan de infrastructuur, alsook complexe aanpassingen aan het wetskader. Het consumentenvertrouwen in geautomatiseerde voertuigen is ook nog niet op een voldoende hoog niveau om deze implementatievorm te introduceren. Een geleidelijke implementatie is dus vereist om onder andere vertrouwen op te bouwen in gekoppeld rijden. Voor het implementeren van het eerste stadium is immers enkel een concreet wetskader nodig.

7.2 Het effect van gekoppeld rijden op de voertuigkilometerkost van transportbedrijven

Het onderzoek ontwikkelt verschillende kostscenario's voor deze verschillende implementatievormen. De implementatievorm met twee bemande voertuigen zou 5%

kunnen besparen tijdens gekoppeld rijden. Om deze implementatievorm te kunnen realiseren moet er een wetsaanpassing gebeuren die chauffeurs toelaat hun rusttijd op te nemen tijdens gekoppeld rijden. Ook is het nodig het consumentenvertrouwen op te krikken. Uit de vergaarde kennis en gesprekken met industriespecialisten lijkt een schatting dat dit binnen vijf jaar mogelijk is gerechtvaardigd.

Verdere wetsaanpassingen die het mogelijk maken om onbemande voertuigen gekoppeld te laten rijden als volger kunnen in tandem zo'n 11% besparen. Voor gekoppeld rijden met drie voertuigen stijgt deze besparing naar 15%, onder de gedocumenteerde assumpties in deel 2.2.5. Deze besparingen zijn, gegeven de huidige netto verkoopmarges van maximaal 2%, erg groot. Uit de vergaarde kennis en gesprekken met industriespecialisten lijkt een schatting dat dit binnen vijf à tien jaar mogelijk is gerechtvaardigd.

7.3 Het potentieel en de impact van gekoppeld rijden op de routekeuze en -planning van transportbedrijven

Het ontwikkelde algoritme, gebaseerd op de verlaagde voertuigkilometerkost, is in staat het potentieel van gekoppeld rijden te kwantificeren. Dit potentieel, alsook de impact op routekeuze en -planning, is erg afhankelijk van het aantal verplaatsingen vanuit gemeenschappelijke punten.

Voor grote transportbedrijven met meer dan 200 verplaatsingen per week vanuit eenzelfde oorsprong kan, voor het kostscenario dat implementeerbaar is in vijf jaar, gekoppeld rijden tussen de 4,5% en 5% besparen. Deze besparingen zijn vooral gedreven door natuurlijke overlap in route en planning van verplaatsingen.

Voor kleinere transportbedrijven valt deze besparing terug tot 0 – 2%. Deze terugval komt door de weinige overlap in route en planning van de verplaatsingen. Kleinere bedrijven moeten, om deze besparing te realiseren, dus samenwerken met andere bedrijven. Een derde partij is nodig om die samenwerking te faciliteren. De besparingen door gekoppeld rijden zijn immers niet evenredig verdeeld over de deelnemende voertuigen.

Dit maakt duidelijk dat het potentieel van gekoppeld rijden groot is en dat gekoppeld rijden eerst zijn ingang zal vinden binnen grote bedrijven. De impact op de routekeuze en -planning is dan beperkt. Later zullen ook kleinere bedrijven gekoppeld rijden, zij het onder begeleiding van een derde partij (= 'trustee'). Voor hen zal de impact op de routekeuze en -planning wel significant zijn.

7.4 De implementatie van gekoppeld rijden

Om gekoppeld rijden te introduceren op het Belgische autosnelwegennet zijn twee belangrijke zaken nodig. Ten eerste is er de nood aan een concreet wetskader dat gekoppeld rijden mogelijk maakt. Ten tweede is het nodig het consumentenvertrouwen in gekoppeld rijden op te krikken. Op basis van opgedane vakkennis en de resultaten van het onderzoek is een stappenplan opgesteld om de implementatie van gekoppeld rijden, rekening houdend met deze twee randvoorwaarden, te faciliteren.

1. Buit het huidige wetskader voor testen van gekoppeld rijden uit om gekoppeld rijden verder te testen op het Belgische wegennet
2. Organiseer persevenementen en gebruik de persaandacht om de belangrijkste stakeholders – transporteurs, verladers, transportorganisaties en overheden – rond de tafel te krijgen voor overleg
3. Organiseer in samenwerking met deze stakeholders een pilootproject voor de implementatie van gekoppeld rijden in een groot transportbedrijf
4. Gebruik de resultaten en bijhorende persaandacht hiervan als hefboom om de overheden een concreet wetskader te laten ontwikkelen
5. Implementeer gekoppeld rijden in enkele grote bedrijven. De voordelen voor hen zijn zo groot dat het voor hen enkel voordelen kan opleveren
6. Gebruik de kritische massa verplaatsingen van deze grote bedrijven om gekoppeld rijden ook te implementeren in kleine bedrijven, onder begeleiding van een derde partij
7. Indien gekoppeld rijden erg succesvol is bij grote en kleine bedrijven, kan er overgegaan worden naar een gedecentraliseerde controle van gekoppeld rijden voor ‘ad hoc’ vorming van gekoppeld rijden

7.5 Verder onderzoek naar gekoppeld rijden

Dit onderzoek bepaalt het potentieel van gekoppeld rijden aan de hand van een ‘Best Pair’ heuristisch die een routekeuze en vertrektijdstipkeuze model integreert. Simulaties met datasets van 200 voertuigen zijn hiervoor uitgevoerd. Voor grotere datasets wordt de rekentijd van het model een beperkende factor. Daarom is het nodig verder onderzoek te doen naar de performantie van verschillende oplossingsheuristieken en deze te testen op reële netwerken met reële verplaatsingen.

Dit onderzoek documenteert zo een test op een dataset van een groot transportbedrijf. De conclusies hieruit zijn duidelijk. Voor grote bedrijven is het potentieel van gekoppeld rijden enorm en de impact op routekeuze en -planning beperkt. Uit simulaties met willekeurige datasets bleek dat de conclusies voor kleine bedrijven niet zo zwart-wit zullen zijn. Het potentieel van gekoppeld rijden is sterk afhankelijk van

7. DISCUSSIE

de gehanteerde tijdsvensters en de geografische nabijheid van andere bedrijven die gekoppeld willen rijden. Verder onderzoek naar het potentieel van gekoppeld rijden voor kleine bedrijven, door het uitvoeren van enkele ‘case-studies’ is dus aangewezen. Het verdelen van de besparingen van gekoppeld rijden tussen twee verschillende bedrijven is ook nog een grijze zone in huidig onderzoek. Verder onderzoek naar de speltheoretische aspecten hiervan is nodig.

Zoals vermeld is het betrekken van alle stakeholders belangrijk voor de implementatie van gekoppeld rijden. Hiervoor is het nodig dat resultaten van academisch onderzoek geconsolideerd worden in overzichtelijke en gebruiksvriendelijke ‘user interfaces’. Verder onderzoek naar de ontwikkeling hiervan in de nabije toekomst is nodig.

Hoofdstuk 8

Algemene conclusie

De wegtransportsector staat momenteel onder druk van zowel interne als externe uitdagingen. Een dreigend personeelstekort en lage verkoopsmarges belemmeren een succesvolle bedrijfsvoering. Daarenboven onderneemt de Europese Commissie actie – vaak gepaard met strengere wetgeving – om de uitstoot van broeikasgassen te verlagen, innovatie in de sector aan te sporen, de verkeersveiligheid te doen stijgen en de filekost te doen dalen. Gekoppeld rijden heeft mogelijk een positieve impact op elk van deze uitdagingen.

Gekoppeld rijden is een rijregime waarbij verschillende geautomatiseerde voertuigen mekaar op korte afstand volgen en zo een ‘trein’ op de weg vormen. Hierdoor verbruiken de voertuigen in kwestie minder brandstof. Transportbedrijven kunnen door de automatisatie van voertuigen ook hun loonlast verlagen. Voor transportbedrijven is gekoppeld rijden dus een opportuniteit om hun voertuigkilometerkost te drukken door hun uitgaven aan brandstof en lonen te verlagen. Dit onderzoek definieert drie kostenscenario’s met een besparing op de voertuigkilometerkost van 5%, 11% en 15%.

De verschillende voertuigkilometerkost voor onafhankelijk en gekoppeld rijden kan een impact hebben op de routekeuze en planning van transportbedrijven. De kortste route is immers – met inbegrip van gekoppeld rijden – niet langer steeds de goedkoopste optie. Gekoppeld rijden kan zo aanleiding geven tot routewijzigingen. Het synchroniseren van de planning van de voertuigen (zorgen dat deze op dezelfde plaats op hetzelfde moment zijn) is nodig om gekoppeld rijden effectief tot stand te brengen.

De potentiële besparingen variëren naargelang de ‘use case’. In het meest conservatieve kostenscenario – waarschijnlijk haalbaar in een tijdshorizon van vijf jaar – kunnen transportbedrijven met meer dan 200 verplaatsingen per week vanuit een centraal punt tussen de 4,5 en 5 % besparen op deze verplaatsingen. Deze besparingen zijn voor het grootste deel toe te schrijven aan een natuurlijke overlap van kortste routes in combinatie met planningsynchronisatie. Routewijzigingen komen slechts voor bij nauwe tijdsvensters. De verplaatsingen van bedrijven met lagere transportvolumes vertonen veel minder natuurlijke overlap. Deze bedrijven kunnen

besparingen door gekoppeld rijden realiseren door samenwerking met andere bedrijven onder begeleiding van een derde partij. Zo kunnen ze besparingen tussen de 0 en 2 % bereiken. Deze besparingen zijn lager omdat routewijzigingen met bijhorende planningsynchronisatie vaker nodig zijn om de samenwerking te bewerkstelligen. Flexibele tijdsvensters verhogen de realiseerbare besparingen.

Om deze besparingen door gekoppeld rijden mogelijk te maken in België zijn er enkele belangrijke stappen nodig. Een bewustmakingscampagne bij de belangrijkste stakeholders – transporteurs, verladers, transportorganisaties en overheden – moet voor de nodige dynamiek zorgen om enkele pilootprojecten te organiseren. Het voorzien van een duidelijk wetskader kan dan enerzijds het vertrouwen in gekoppeld rijden van de weggebruiker verhogen en anderzijds enkele ‘early adopting’ transportbedrijven aantrekken die een kritische massa vormen om gekoppeld rijden te verspreiden.

Bijlagen

Bijlage A

Introductie: grootte van de Belgische goederenstromen per wegtransport

Volgende tabellen geven cijfers van Eurostat met betrekking tot de vervoerde goederen met wegtransport in België.

Tabel A.1: Jaarlijks vervoerde goederen [miljoen tonkilometer]

GEO/TIME	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
EU	1.719.114	1.847.322	1.914.205	1.890.875	1.699.508	1.755.061	1.743.604	1.692.329	1.719.199	1.725.240
België	43.847	43.017	42.085	38.356	36.174	35.002	33.107	32.105	32.796	31.808

Tabel A.2: Jaarlijks vervoerde goederen [miljoen voertuigkilometer]

GEO/TIME	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
EU	167.905	176.626	181.533	178.645	163.136	163.827	164.323	157.845	158.692	159.258
België	3.355	3.419	3.173	2.678	2.584	2.478	2.392	2.326	2.378	2.373

Tabel A.3: Jaarlijks vervoerde goederen [kton]

GEO/TIME	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
EU	15.661.471	16.808.202	17.256.440	17.148.889	15.215.996	14.952.605	15.002.584	14.029.603	13.937.268	14.118.708
België	337.913	348.527	352.202	317.637	297.879	296.189	289.203	291.380	300.608	299.476

Bijlage B

Literatuurstudie: geautomatiseerde voertuigen

Dit deel definieert geautomatiseerde voertuigen en bespreekt de technologische haalbaarheid en implementatie ervan.

B.1 Definitie

De Amerikaanse organisatie voor snelwegveiligheid ‘National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)’ definieert geautomatiseerde voertuigen als ‘voertuigen waarbij bepaalde aspecten van controlefuncties van veiligheidssystemen kunnen uitgevoerd worden zonder directe input van de chauffeur’ [12]. De organisatie verfijnt deze definitie door geautomatiseerde voertuigen op te splitsen in vijf niveaus op basis van de graad van automatisatie.

- **Niveau 0 —Geen automatisatie**

De bestuurder heeft de volledige autoriteit over de primaire controle (remmen, sturen en versnellen) van het voertuig ten allen tijde. Voertuigen met hulpsystemen die geen enkele controle uitoefenen op het voertuig, bijvoorbeeld waarschuwingssystemen, behoren tot deze categorie. Ook voertuigen uitgerust met secundaire controlesystemen, bijvoorbeeld automatische ruitenwissers, worden beschouwd als niet geautomatiseerd.

- **Niveau 1 —Functiespecifieke automatisatie**

Een of meer specifieke controlefuncties zijn geautomatiseerd, maar opereren onafhankelijk van elkaar. De bestuurder behoudt de volledige controle en is de enige verantwoordelijke voor de veiligheid. Hij of zij kan er echter voor kiezen om gedeeltelijke controle over te laten aan het voertuig. Een voorbeeld hiervan is ‘adaptive cruise control’. Het voertuig kan ook bijkomende steun geven in primaire controle, bijvoorbeeld dynamische remhulp bij noodsituaties. In geen geval kan door functiespecifieke automatisatie de bestuurder op hetzelfde moment zowel handen van het stuur als voeten van de pedalen verwijderen en tegelijkertijd veilig rijden.

- **Niveau 2 —Gecombineerde functiespecifieke automatisatie**
Tot dit niveau behoren voertuigen waarbij minstens twee primaire controlefuncties geautomatiseerd zijn. De bestuurder kan actieve primaire controle onder bepaalde voorwaarden overlaten aan het voertuig. Hij of zij moet echter ten allen tijde aandachtig zijn om de controle over het voertuig op korte termijn (enkele seconden) weer over te nemen.
- **Niveau 3 —Beperkte zelfrijdende automatisatie**
Voertuigen met dit niveau van automatisatie laten de bestuurder toe om volledige controle over te laten aan het voertuig in bepaalde omstandigheden. In deze omstandigheden hoeft de bestuurder niet zijn volledige aandacht op de weg te houden. Het voertuig kan occasioneel controle van de bestuurder vereisen, maar laat een grote transitietijd toe van zelfrijdende naar bestuurdergecontroleerde operatiemodus.
- **Niveau 4 —Volledige zelfrijdende automatisatie**
In dit niveau is het voertuig ontworpen om elke mogelijke veiligheidskritieke rijfunctie uit te voeren gedurende een volledige verplaatsing. Dit niveau is zowel van toepassing op voertuigen met bestuurder als voertuigen zonder bestuurder.

De Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), de Duitse tegenhanger van de NHTSA, definieert [44] volgende gelijkaardige vijf niveaus:

- Enkel bestuurder
- Assistentie voor bestuurder
- Gedeeltelijke automatisatie
- Hoge automatisatie
- Volledige automatisatie

Referentie [44] geeft een gedetailleerd overzicht hiervan. Hieruit blijkt dat de definitie van deze niveaus vrijwel volledig overeenkomst met de niveaus gedefinieerd door de NHTSA.

SAE International, een kenniscentrum omtrent ingenieurspraktijken in mobiliteit, definieert in totaal zes niveaus [13]. Het splitst het hierboven uitgelegde niveau 3 op in twee verschillende niveaus:

- **Conditionele automatisatie**
Er wordt van de bestuurder verwacht om in te grijpen op aanvraag van het voertuig.
- **Hoge automatisatie**
Er wordt van de bestuurder niet verwacht om in te grijpen, maar dit slechts in beperkte rijomstandigheden.

Deze extra opsplitsing is eerder arbitrair. In beide van gevallen verwacht het voertuig dat de bestuurder in bepaalde rijomstandigheden de controle binnen een bepaalde tijd weer overneemt. Voor het vervolg van het onderzoek gaat de tekst uit van de indeling gedefinieerd door het NHTSA.

B.2 Technologische haalbaarheid

Geautomatiseerde voertuigen vereisen gespecialiseerde technologie. Dit deel behandelt de voornaamste technologieën. De technologie verschilt, op de schaal ervan na, niet tussen geautomatiseerde voertuigen voor personenvervoer en die voor vrachtvervoer. Deze technologie is op te splitsen in verschillende domeinen.

B.2.1 Boordsensoren

Deze sensoren dienen om de huidige toestand van het voertuig op te meten. Voor een volledig overzicht van de boordsensoren volstaat referentie [45]. In het kader van geautomatiseerde voertuigen is het fuseren van data van verschillende sensoren een belangrijk onderzoeksonderwerp. De combinatie van input van verschillende sensoren is belangrijk om nauwkeurige en betrouwbare interpretaties toe te laten. Hiervoor bestaan reeds verschillende architecturen. Kwakkernaat et al. (2014) [46] beschrijft zulk een architectuur in detail.

B.2.2 Omgevingsperceptie

Een goed beeld van de omgeving van het voertuig is erg belangrijk om de bewegingsvrijheid te bepalen. Geautomatiseerde voertuigen zijn daarom uitgerust met verschillende detectietechnologieën. Dit leidt tot erg complexe beeldvorming.

- **Infrastructuur- en markeringsdetectie**

De meest voorkomende manier om infrastructuur- en markeringsdetectie te doen is de combinatie van een Lidar (LIght Detection And Ranging of Laser Imaging Detection And Ranging) sensor met enkele camera's. In die opstelling bemonstert de Lidar sensor de grenzen en de staat van de weginfrastructuur. Deze sensor is erg nauwkeurig, snel, maar ook erg duur. Algoritmes ontbinden de data van de Lidar sensor in datapunten van het grondvlak en verhogingen. Daarna genereren ze een mogelijke lijnrepresentatie van de weg. Deze wordt getoetst aan beschikbare wegdata om definitief te bepalen wat de dimensies van het wegsegment zijn. Deze methode, beschreven door Zhang (2010) [47] heeft haar betrouwbaarheid en robuustheid onder meer bewezen in de 'DARPA Urban Challenge' voor autonome voertuigen.

Voor het bepalen van wegmarkeringen gebruikt men camera's. Deeltjes- of Kalmanfilters filteren de camerabeelden en leiden zo tot baanvakmarkeringen. Voor additionele markeringen zoals die op voorsortingsvakken worden, zoals Zhang (2007) beschrijft [48], scanlijnmethoden en patroonherkenningsmethoden

gebruikt.

- **Objectdetectie**

Objectdetectie maakt vaak gebruik van een beschikbaar Lidar beeld als basis, aangevuld met informatie van een radar en een of meerdere camera's. De radar sensor detecteert objecten, terwijl de camerabeelden worden gebruikt om deze objecten te identificeren. In het begin van het onderzoek naar objectdetectie werden meestal stereo camera's gebruikt, zoals beschreven door Bertozzi en Broggi (1998) [49]. Recente innovaties rond 'structuur door beweging' hebben 3D-beeldvorming met een enkele camera sterk verbeterd. Deze methode maakt gebruik van opeenvolgende beelden om een 3D-beeld te genereren door de snelheid van het voertuig en het tijdsverschil tussen de beelden in acht te nemen. Een enkele camera heeft significante voordelen ten opzichte van stereo camera's, nl. een lagere kost en een kleiner installatievolume. Chavez-Garcia et al. (2012) [50] opperen dat daarom deze technologie aan populariteit zal winnen.

B.2.3 Locatiebepalingssystemen

Systemen die de locatie van voertuigen opvolgen zijn reeds wijd verspreid in productiewagens. Bestuurders maken frequent gebruik van navigatiesystemen op basis van GPS en/of mobiele netwerken. Cruciaal voor een geautomatiseerde voertuig van niveau 3 of 4 is om exact te weten op welke plaats het zich bevindt. Deze informatie moet het dan combineren met beschikbare netwerkdata om zich voort te bewegen in het netwerk. Hiervoor is onderzoek naar simultane real-time verkeersinformatie, datafusie en kaartvergelijkingsalgoritmes nodig. Kim et al. (2013) beschreven dit in [51].

B.2.4 Telecommunicatiesystemen

Telefonica, een van 's werelds grootste telecombedrijven, voorspelt in hun industrie-rapport [52] dat in 2020 90% van de voertuigen uitgerust zal zijn met uitgebreide communicatiesystemen. Deze communicatiesystemen zijn ruwweg op te delen in 'V2V (Voertuig-tot-voertuig)', 'V2I (voertuig-tot-infrastructuur)' en 'V2X (voertuig-tot-object x)' communicatie.

- **V2V**

Voertuig-tot-voertuig telecommunicatie is reeds voor verschillende toepassingsgebieden onderzocht: ongevallenmelding [53], real-time verkeersinformatie, ... Vooral in verband met deze real-time verkeersinformatie is nog vooruitgang te boeken. In het kader van het Europese SARTRE (Safe Road Trains for the Environment) project is er, voor deze thesis erg relevant, onderzoek gedaan naar voertuig-tot-voertuig communicatie. Het onderzoek geeft aan dat voertuig-tot-voertuig communicatie essentieel is om laterale en longitudinale stabiliteit tijdens gekoppeld rijden te garanderen. Om dit robuust te laten gebeuren is

veilige datatransfer en correcte plaatsing van antennes uiterst belangrijk. [54] In testomstandigheden is deze voertuig-tot-voertuig telecommunicatie meerdere malen succesvol geïmplementeerd.

- **V2I**

Geavanceerde communicatie met infrastructuur kan de stabiliteit en de veiligheid van het verkeer ten goede komen. Met infrastructuur kan weginfrastructuur bedoeld worden, zoals verkeerslichten, maar ook algemene connectiviteitsinfrastructuur zoals gsm-masten en geconnecteerde datacenters.

- **V2X**

Dit onderzoeksdomein is in volle ontwikkeling. Het is sterk gerelateerd aan het tot stand komen van een ‘Internet of Things’ waarbij allerlei objecten met elkaar verbonden zijn via een netwerk. Toekomstige toepassingen kunnen gaan van objectontwijking tot autonoom pakkettransport.

Een combinatie van zulke systemen kan voertuigen, infrastructuur en objecten met elkaar verbinden. Dit kan leiden tot sterk verhoogde verkeersveiligheid door het concept genaamd ‘coöperatieve perceptie’, zoals beschreven door Kim et al. (2013) [51]. Door onderlinge samenwerking kunnen de verschillende voertuigen, infrastructuur en objecten een breder ‘gezichtsveld’ hebben. Ook kan deze geavanceerde communicatie leiden tot minder files en lager brandstofverbruik. Er is echter nog veel onderzoek nodig naar robuuste en kostefficiënte implementaties hiervan. Voor de basisfunctionaliteit van een geautomatiseerd voertuig (ook op het hoogste niveau van automatisatie) is dit niet vereist. Producenten bouwen voldoende redundantie in het sensorisch systeem van de voertuigen zodat ze onafhankelijk van externe informatie kunnen functioneren.

B.2.5 Primaire controlesystemen

Systemen als adaptieve ‘cruise control’, noodremsystemen, baanvakgeleiding en dergelijke behoren tot de optielijst van veel voertuigmodellen op de markt. Geautomatiseerde voertuigsystemen kunnen gerealiseerd worden door een fusie van zulke opties. Een voorbeeld is de fusie van een adaptief cruise control systeem en een telecommunicatiesysteem. Dit wordt in de literatuur ‘Coöperative Adaptive Cruise Control (CACC)’ [55] genoemd en is bijvoorbeeld erg belangrijk bij gekoppeld rijden.

Al deze domeinen van technologie zijn al in een ver stadium van onderzoek en soms zelfs implementatie. Er bestaan ook reeds geautomatiseerde voertuigen van het hoogste niveau. Het meest gekende voorbeeld is de ‘Google Car’[56]. In de volgende jaren moeten echter nog enkele technologieën verfijnd worden om de voertuigen helemaal gebruiksvriendelijk te maken. Voor het verdere verloop van dit onderzoek nemen we de technologische haalbaarheid van geautomatiseerde voertuigen – volledig terecht, zoals dit deel schetst – aan.

B.3 Implementatie

Hoewel de geavanceerde technologie reeds in grote mate op punt staat, is deze nog niet verspreid in het verkeer. Dat heeft enkele redenen. Dit deel licht de, voor deze thesis, relevantste redenen toe, gefocust op vrachttransport.

B.3.1 Legaal kader

Een onduidelijk legaal kader belemmert een snelle implementatie van geautomatiseerde voertuigen van niveau 3 en 4. In Vlaanderen zou, zoals besproken in de plenaire vergadering in het Vlaams Parlement [57], een zelfrijdende functie van personenwagens perfect mogelijk zijn volgens de federale wetgeving alsook de verzekeringswetgeving. Voor vrachttransport is een dialoog op Vlaams niveau echter niet voldoende. Door het internationale karakter ervan zou er een internationale regelgeving – minstens op Europees vlak – moeten komen. De evoluties hieromtrent zijn momenteel nog onduidelijk. EuroActiv [58] meldt wel dat dit op de Europese agenda staat. Voor aansprakelijkheid bij ongevallen moeten bestuurders zich volgens Håkan Samuelsson [59], CEO van Volvo Car Group, alvast geen zorgen maken. Hij verklaart dat Volvo als voertuigproducent volledige aansprakelijkheid op zich neemt bij een ongeval te wijten aan geautomatiseerd rijden.

B.3.2 Infrastructuur

Infrastructuraanpassingen zijn nodig om elke menselijke tussenkomst in het verkeer te vermijden. Voorbeelden zijn manuele tolverrichtingen, parkeermogelijkheden en dergelijke. Deze zouden aangepast moeten worden om correct te functioneren met geautomatiseerde voertuigen van het hoogste niveau.

B.3.3 Kostprijs

De hoge kostprijs van geautomatiseerde voertuigen, vooral van niveau 3 en 4, is ook een rem voor een snelle implementatie. Een goed voorbeeld hiervan is de kost van een Lidar sensor. De Lidar sensor zoals deze nu in de ‘Google Car’ geïnstalleerd is kost zo’n € 75.000. Er zijn echter bedrijven die, mits een grote afzetmarkt, er vertrouwen in hebben de prijs van een Lidar van voldoende kwaliteit te kunnen drukken tot ver onder de € 1.000 [60].

B.3.4 Consumentenvertrouwen

De Eurobarometer over autonome systemen [28] rapporteert de uitkomsten van een bevraging van de bevolking. Hieruit blijkt dat 61% van de respondenten zich ‘Totaal oncomfortabel’ zou voelen om zich te laten vervoeren door een zelfrijdende wagen. Bij de vraag hoe men zich zou voelen bij het laten vervoeren van goederen door een zelfrijdende vrachtwagen daalt dit percentage van mensen die zich ‘Totaal oncomfortabel’ voelen tot 52%. Dit is echter nog steeds de meerderheid van de

respondenten. Deze cijfers pleiten voor een geleidelijke implementatie die van start gaat in het goederentransport.

B.4 Conclusie

Vorige delen brachten de technologische haalbaarheid en de hindernissen voor een snelle implementatie in kaart. De technologische haalbaarheid vormt geen probleem. Een trage aanpassing van de regelgeving en vooral een traag aanpassend consumentenvertrouwen strooien echter roet in het eten. Dit pleit voor een geleidelijke implementatie in de vrachttransportsector. Gekoppeld rijden in de vrachttransportsector komt naar voor als een van de oplossingen bij uitstek.

- Gekoppeld rijden is erg schaalbaar over de verschillende niveaus van geautomatiseerde voertuigen heen
- Gekoppeld rijden is veelvuldig onderzocht
- Gekoppeld rijden behandelt ongeveer elk actueel pijnpunt van de transportsector

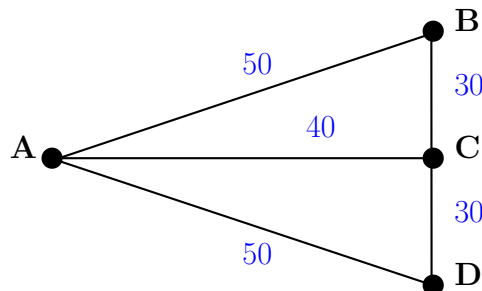
Bijlage C

Basisinzichten: extra voorbeelden

C.1 Impact op de routekeuze

C.1.1 Voorbeeld 1

Het reeds gebruikte voorbeeldnetwerk wordt behouden. De afstanden tussen de knooppunten zijn aangeduid in het blauw.



Het voorbeeld beschouwt twee gelijktijdige verplaatsingen.

	Oorsprong	Bestemming
Verplaatsing 1	A	B
Verplaatsing 2	A	D

Bij onafhankelijk rijden kiest het bedrijf voor beide verplaatsingen uiteraard voor de kortste route. Dit leidt tot de volgende kosten:

	Verplaatsing 1	Verplaatsing 2	Totaal
Routelengte onafhankelijk rijden	50 km	50 km	100km
Routekost	€ 58,35	€ 58,35	€ 116,70

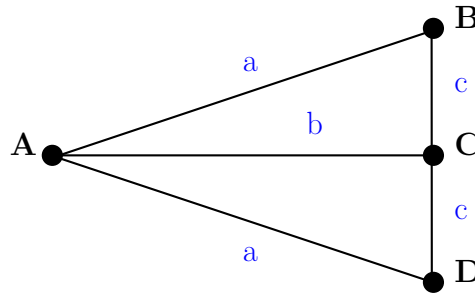
Wanneer het bedrijf de mogelijkheid van gekoppeld rijden wel in acht neemt kan het zijn dat een afwijking van de kortste route een kostenbesparing oplevert. Onderstaande samenvatting van de kosten stelt de afwijking van de kortste route van één van de twee vrachtwagens, nl. vrachtwagen 2, voor. Een blauwe kleur geeft een besparing aan; een rode kleur een verhoging van de kosten.

	Verplaatsing 1	Verplaatsing 2	Totaal
Routelengte onafhankelijk rijden	0 km	60 km	60km
Routelengte gekoppeld rijden	50 km	50 km	100km
Routekost	€56	€124,82	€ 180,82

Hieruit blijkt dat gekoppeld rijden voor het beschouwde voorbeeldnetwerk niet winstgevend is. Wel is het interessant om op te merken dat de kosten minder dan proportioneel stijgen met de gereden afstand door het gekoppeld rijden. Daarom is het interessant de dimensies van het voorbeeldnetwerk te bepalen waarvoor gekoppeld rijden wel voordelig is.

Invullen van vergelijking 4.6 met de veronderstelde voertuigkilometerkosten geeft:

$$\frac{1,096 * d_1^f + 1,12 * d_1^l}{1,167} \leq d^f + d^l - d_0^f - d_0^l$$



Voor het beschouwde netwerk leidt dit tot de volgende verbanden. Deze zijn louter demonstratief en niet algemeen toepasbaar op elk netwerk:

- Er zijn slechts twee vrachtwagens in het systeem. Daarom is de gereden afstand tijdens gekoppeld rijden gelijk.

$$d_1^f = d_1^l = a$$

- Gezien de symmetrie van het netwerk zijn de kortste afstanden van de leider en volger gelijk.

$$d^f = d^l = a$$

- Indien, volgens het basismodel, de leider zijn route niet wijzigt, geldt voor dit voorbeeldnetwerk:

$$d_0^l = 0 \text{ en } d_0^f = 2 * c$$

- Wegens de structuur van het netwerk moet er volgens de stelling van Pythagoras gelden dat:

$$b^2 = a^2 - c^2$$

Combineren van bovenstaande verbanden levert een ondergedetermineerd stelsel.

$$\begin{cases} 19,78 * c \leq a \\ b = \sqrt{a^2 - c^2} \end{cases}$$

In het uitgewerkte voorbeeld geldt duidelijk dat $19,78 * c = 19,78 * 30 > 50$. Dit leidt meteen tot de eerder getrokken conclusie dat gekoppeld rijden niet winstgevend is dit voorbeeld.

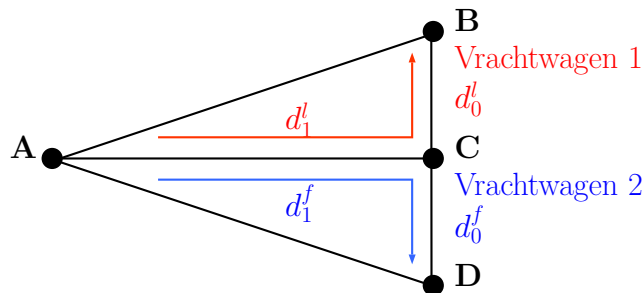
Een bedrijf is invariant tussen onafhankelijk en gekoppeld rijden wanneer de winst van deze twee regimes gelijk is. Indien we bovenstaande oplossing transformeren tot een gelijkheid en b gelijk nemen aan het voorbeeld, nl. 40. bekomen we volgende oplossing:

$$a \approx 40,05$$

$$b = 40$$

$$c \approx 2,025$$

C.1.2 Voorbeeld 2

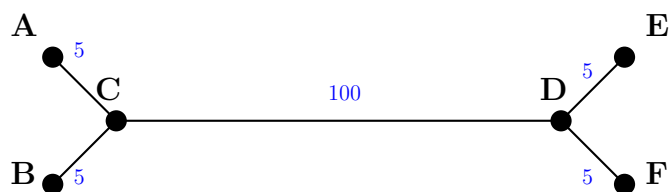


	Verplaatsing 1*	Verplaatsing 2	Totaal
Routelengte onafhankelijk rijden	2 km	2 km	4km
Routelengte gekoppeld rijden	40 km	40 km	80 km
Routekost	€ 47,13	€46,17	€93,31

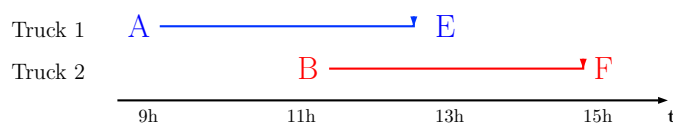
C.2 Impact op de planning

Voorbeeld 1

Figuur C.1 toont het gebruikte netwerk. Op dit netwerk zijn twee verplaatsingen gepland zoals gegeven in Figuur C.2.



Figuur C.1: Beschouwde netwerk in voorbeeld 1. De linkafstanden zijn aangeduid in het blauw.



Figuur C.2: De planning van de verplaatsingen gehanteerd in voorbeeld 1.

Het uitvoeren van deze verplaatsingen **zonder gekoppeld rijden** leidt tot de volgende kosten.

Tabel C.1: Kosten van het uitvoeren van de verplaatsingen gedefinieerd in voorbeeld 1 in onafhankelijk rijregime

	Verplaatsing 1	Verplaatsing 2	Totaal
Routelengte onafhankelijk rijden	110 km	110 km	220 km
Routekost	€ 128,37	€ 128,37	€ 256,74

Het uitvoeren van deze verplaatsingen **met gekoppeld rijden** door het verlaten van verplaatsing 1 en vervroegen van verplaatsing 2 respectievelijk levert de kosten in Tabel C.2 en C.3. Hogere kosten ten opzichte van onafhankelijk rijden zijn aangeduid in het **rood**. Verlaagde kosten zijn aangeduid in het **blauw**.

Tabel C.2: Kosten van het uitvoeren van de verplaatsingen gedefinieerd in voorbeeld 1 met gekoppeld rijden door het verlaten van verplaatsing 1

	Verplaatsing 1	Verplaatsing 2	Totaal
Routelengte onafhankelijk rijden	10 km	10 km	20 km
Routelengte gekoppeld rijden	100 km	100 km	200 km
Routekost	€ 123,67	€ 121,27	€ 244,94
Kost te laat komen	€ 250	€ 0	€ 250
Totaal	€373,67	€121,27	€494,94

Tabel C.3: Kosten van het uitvoeren van de verplaatsingen gedefinieerd in voorbeeld 1 met gekoppeld rijden door het vervroegen van verplaatsing 2

	Verplaatsing 1	Verplaatsing 2	Totaal
Routelengte onafhankelijk rijden	10 km	10 km	20 km
Routelengte gekoppeld rijden	100 km	100 km	200 km
Routekost	€ 123,67	€ 121,27	€ 244,94
Kost te laat komen	€ 0	€ 50	€ 250
Totaal	€123,67	€171,27	€294,94

Het blijkt dat het vervroegen van verplaatsing 2 voordeliger is. Ook is het interessant op te merken dat, indien de planning perfect gesynchroniseerd zou zijn, gekoppeld rijden een besparing van € 11,8 zou mogelijk maken. Door de kosten die gepaard gaan met het synchroniseren van deze planning is gekoppeld rijden echter niet voordelig.

Bijlage D

Theoretisch model: ondersteunende pseudocode van algoritmes

Algorithm 2 Deze pseudocode geeft de werking van het ‘Best Trios’ algoritme voor gekoppeld rijden met 3 voertuigen weer. Het algoritme berekent de besparing van alle mogelijke combinaties van verplaatsingen en selecteert op basis hiervan een set combinaties.

Input: oorsprongen, bestemmingen

Output: de ‘best trios en paren’ van verplaatsingen

paren \leftarrow lijst met mogelijke combinaties van 3 verplaatsingen

for *i* = 1 tot aantal combinaties **do**

kortsteRouteKost(i) berekenen

gekoppeldRijdenKost(i) berekenen door oplossen routekeuze probleem

if *gekoppeldRijdenKost(i)* < *kortsteRouteKost(i)* **then**

beparing(i) = *kortsteRouteKost(i)* – *gekoppeldRijdenKost(i)*

end if

end for

Sorteer trios en paren op basis van gemiddelde besparing per voertuig in dalende volgorde

for *i* = 1 tot aantal gesorteerde trios en paren in lijst **do**

if *beparing(i)* > 0 **then**

plaats trio of paar i in outputlijst

*beparing(verplaatsing \in trio *i*)* = 0

end if

end for

Algorithm 3 Deze pseudocode toont hoe, gegeven de kortste paden van twee voertuigen, alle mogelijke ‘sub-paden’ van deze kortste paden berekend kunnen worden.

Input: *kortstePad1*, *kortstePad2*, *kortstePaden*

Output: Alle mogelijke ‘sub-paden’ voor verplaatsing 1 en 2

lengte1 \leftarrow *lengte van kortstePad1*

lengte2 \leftarrow *lengte van kortstePad2*

subPaden1 \leftarrow lege lijst met lengte $\frac{lengte1*(lengte1-1)}{2}$

subPaden2 \leftarrow lijst met lengte $\frac{lengte2*(lengte2-1)}{2}$

for *i* = 1 tot *lengte1* **do**

for *j* = *i* + 1 tot *lengte1* **do**

subPaden1 \leftarrow *kortstePad1*(*i* : *j*)

end for

end for

for *i* = 1 tot *lengte2* **do**

for *j* = *i* + 1 tot *lengte2* **do**

subPaden2 \leftarrow *kortstePad2*(*i* : *j*)

end for

end for

Algorithm 4 Deze pseudocode toont hoe, gegeven de kortste paden en de ‘sub-paden’ van twee voertuigen, alle mogelijke overlappende paden van de voertuigen bepaald kunnen worden.

Input: subPaden1, subPaden2, kortstePad1, kortstePad2, kortstePaden

Output: Alle mogelijke paden voor verplaatsing 1 en 2

lengte1 ← lengte van kortstePad1

lengte2 ← lengte van kortstePad2

lengteSub1 ← lengte van subPaden1

lengteSub2 ← lengte van subPaden2

paden1 ← lege lijst met lengte $\frac{lengteSub1 * (lengte1 - 1)}{2}$

paden2 ← lege lijst met lengte $\frac{lengteSub2 * (lengte2 - 1)}{2}$

for *i* = 1 tot *lengte1* – 1 **do**

for *j* = *i* + 1 tot *lengte1* **do**

kortstePad ← kortste pad tussen einde subPaden2(*j*) en einde kortstePad1

paden1 ← kortstePad1(1 : *i*), subPaden2(*j*), *kortstePad*

end for

end for

for *i* = 1 tot *lengte2* – 1 **do**

for *j* = *i* + 1 tot *lengte2* **do**

kortstePad ← kortste pad tussen einde subPaden1(*j*) en einde kortstePad1

paden1 ← kortstePad2(1 : *i*), subPaden1(*j*), *kortstePad*

end for

end for

Bijlage E

Experimenten: ondersteunende tabellen

Tabel E.1: Route, Kost en Besparing voor een oorsprong-bestemmingspaar uit een reële dataset volgens verschillende kostscenario's

Kostscenario	Oorsprong	Bestemming	Route	Kost [€]	Besparing [€]
0	Metz	Lyon	Metz, Dijon, Lyon	€ 537,99	–
	Metz	Marseille	Metz, Dijon, Lyon, Marseille	€ 904,43	–
1	Metz	Lyon	Metz, Dijon, Lyon	€ 505,26	€ 32,73
	Metz	Marseille	Metz, Dijon, Lyon, Marseille	€ 883,36	€ 21,07
2	Metz	Lyon	Metz, Dijon, Lyon	€ 465,98	€ 72,01
	Metz	Marseille	Metz, Dijon, Lyon, Marseille	€ 858,08	€ 46,35

Tabel E.2: Resulterende besparingen door gekoppeld rijden in functie van de gehanteerde marges voor de tijdsvensters voor verplaatsingen met als oorsprong Luxemburg. De marge duidt het verschil tussen de bovengrens van het tijdsvenster en het vroegst mogelijke aankomsttijdstip aan.

Marge	Kostscenario	Kost [€]	Besparing [€]	Besparing [%]
0	0	€ 277.740	–	–
	1	€ 265.359	€ 12.381	4,5%
	2	€ 250.364,85	€ 27.375,15	9,9 %
9	0	€ 277.740	–	–
	1	€ 264.402	€ 13.338	4,6 %
	2	€ 250.364,85	€ 28.651,22	10,3 %
18	0	€ 277.740	–	–
	1	€ 264.402	€ 13.338	4,8 %
	2	€ 248.425	€ 29.315	10,6 %
27	0	€ 277.740	–	–
	1	€ 264.371	€ 13.369	4,8 %
	2	€ 248.351	€ 29.389	10,6 %
36	0	€ 277.740	–	–
	1	€ 264.348,21	€ 13.391,79	4,8 %
	2	€ 248.275	€ 29.465	10,6 %
45	0	€ 277.740	–	–
	1	€ 264.348,21	€ 13.391,79	4,8 %
	2	€ 248.275	€ 29.465	10,6 %

Tabel E.3: Resulterende besparingen door gekoppeld rijden in functie van de gehanteerde marges voor de tijdsvensters voor verplaatsingen met als oorsprong Metz. De marge duidt het verschil tussen de bovengrens van het tijdsvenster en het vroegst mogelijke aankomsttijdstip aan.

Marge	Kostscenario	Kost [€]	Besparing [€]	Besparing [%]
0	0	€ 32.137	–	–
	1	€ 30.874,50	€ 1.262,50	3,9%
	2	€ 29.359,60	€ 2.777,40	8,6 %
9	0	€ 32.137	–	–
	1	€ 30.733,40	€ 1.403,60	4,4%
	2	€ 29.049,20	€ 3.087,80	9,6 %
18	0	€ 32.137	–	–
	1	€ 30.685,80	€ 1.451,20	4,5%
	2	€ 28.944,40	€ 3.192,60	9,9 %
27	0	€ 32.137	–	–
	1	€ 30.637,10	€ 1.499,90	4,7 %
	2	€ 28.837,10	€ 3.299,90	10,3%
36	0	€ 32.137	–	–
	1	€ 30.591,54	€ 1.545,46	4,8 %
	2	€ 28.736,99	€ 3.400,01	10,6%
45	0	€ 32.137	–	–
	1	€ 30.591,54	€ 1.545,46	4,8 %
	2	€ 28.736,99	€ 3.400,01	10,6%

Bibliografie

- [1] Europese Commissie. *Roadmap to a Single European Transport Area: Transport matters*. Accessed: 06/03/2016. URL: http://ec.europa.eu/transport/strategies/facts-and-figures/transport-matters/index_en.htm.
- [2] Europese Commissie. *Freight transport statistics*. Accessed: 06/03/2016. URL: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Freight_transport_statistics.
- [3] Europese Commissie. *Sectoral social dialogue - Road transport*. Accessed: 07/03/2016. URL: <http://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=480&langId=en&intPageId=1850>.
- [4] FEBETRA. *Evolutie van de tewerkstelling*. <http://febeta.be/wp-content/uploads/2014/08/Evolutie-van-de-tewerkstelling-binnen-de-transportsector.pdf>. Aug 2014.
- [5] W.V. *Vergrijzing zorgt voor groot tekort aan chauffeurs*. <http://www.jobat.be/nl/artikels/vergrijzing-zorgt-voor-groot-tekort-aan-chauffeurs/>. Sep 2013.
- [6] *Knelpuntberoepen, Kansenberoepen 2015*. VDAB Studiedienst. Keizerslaan 11, 1000 Brussel, 2015.
- [7] *VTL verwacht chauffeurstekort van 50.000 in 2015*. <http://www.transport-online.nl/site/2701/vtl-verwacht-chauffeurstekort-van-50000-in-2015/>. Feb 2010.
- [8] Francesca Williams. *Lorry driving: The logistics of keeping logistics on the road*. <http://www.bbc.com/news/uk-england-tyne-30496851>. Jun 2015.
- [9] Loretta Chao. *Driver Shortage Ripples Across Trucking Industry*. <http://www.wsj.com/articles/driver-shortage-ripples-across-trucking-industry-1435057224>. Jun 2015.
- [10] *Kilometerheffing: vanaf 01/04/2016 stijgt transportprijs nationaal vervoer met gemiddeld 7,94 procent*. <http://febeta.be/2015/10/kilometerheffing-vanaf-01042016-stijgt-transportprijs-nationaal-vervoer-met-gemiddeld-794/>. Okt 2015.

- [11] Europese Commissie. *WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system*. [http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/doc/2011_white_paper/white_paper_com\(2011\)_144_en.pdf](http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/doc/2011_white_paper/white_paper_com(2011)_144_en.pdf). Mrt 2011.
- [12] *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*. National Highway Traffic Safety Administration. 2013.
- [13] SAE International. *Automated driving: levels of driving automation are defined in new SAE International standard J3016*. http://www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf. 2014.
- [14] Siegfried Mortkowitz. *Autonomous truck convoys: the question is when, not if*. <http://www.transportbusiness.net/index.php/features/14--sp-803/1378-autonomous-truck-convoys-the-question-is-when-not-if>. Okt 2015.
- [15] Roberto Baldacci & Vittorio Maniezzo & Aristide Mingozzi. "An Exact Method for the Car Pooling Problem Based on Lagrangean Column Generation". In: *Operations Research* 52 (3 2004), p. 422–439.
- [16] Emilio Ferrari & Riccardo manzini & Arrigo Pareschi & Alessandro Persona & Alberto Regattieri. "The Car Pooling Problem: Heuristic Algorithms Based On Savings Functions". In: *Journal of Advanced Transportation* 37 (3 2003), p. 243–272.
- [17] Farhad Farokhi & Karl H. Johansson. "A Study of Truck Platooning Incentives Using a Congestion Game". In: *IEEE Transactions on intelligent transportation systems* 16 (2 2015), p. 581–595.
- [18] Randolph Hall & Chinan Chin. "Vehicle sorting for platoon formation: Impacts on highway entry and throughput". In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 13 (5–6 2005), p. 405–420.
- [19] Thanh-Son Dao. "A Decentralized Approach to Dynamic Collaborative Driving Coordination". Proefschrift. Waterloo, Ontario, Canada: University of Waterloo, 2008.
- [20] Carl Bergenheim & Henrik Pettersson & Erik Coelingh & Cristofer Englund & Steven Shladover & Sadayuki Tsugawa. "Overview of Platooning systems". In: *19th ITS World Congress*. Wenen, Oostenrijk: Chalmers Publication Library (CPL), okt 2012.
- [21] http://cordis.europa.eu/project/rcn/56873_en.html.
- [22] Paviter S. Jotel. *SARTRE: Project Final Report*. http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/SARTRE_Final-Report.pdf. 2012.
- [23] Fred Browand & John McArthur & Charles Radovich. "Fuel Saving Achieved in the Field Test of Two Tandem Trucks". In: *PATH Program TO-4214: Final report* (2004).

-
- [24] Matthias Wille & Markus Röwenstrunk & Günter Debus. *KONVOI: Electronically coupled truck convoys*. <http://www.hfes-europe.org/wp-content/uploads/2014/06/19-fa.pdf>.
- [25] <http://www.companion-project.eu/>.
- [26] Steven Ashley. *Truck platoon demo reveals 15% bump in fuel economy*. <http://articles.sae.org/11937/>. Mei 2013.
- [27] V. Psaraki & I. Pagoni & A. Schafer. “Techno-economic assessment of the potential of intelligent transport systems to reduce CO2 emissions”. In: *IET Intelligent Transport Systems* 6 (4 2012), p. 355–363.
- [28] European Commission. *Autonomous Systems: report*. http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_427_en.pdf.
- [29] Li Zhao & Jian Sun. “Simulation Framework for Vehicle Platooning and Car-following Behaviors under Connected-Vehicle Environment”. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 96. Elsevier, 2013, p. 914–924.
- [30] NHTSA. *National Motor Vehicle Crash Causation Survey*. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pubs/811059.pdf>. 2008.
- [31] Robbert Janssen & Han Zwijnenberg & Iris Blankers & Janiek de Kruijff. *Truck Platooning: driving the future of transportation*. https://issuu.com/eisma/docs/tno_truckplatooning_whitepaper. 2015.
- [32] G. De Ceuster e.a. *EINDRAPPORT: Effecten van een kilometerheffing voor vrachtwagens*. http://www.tmleuven.be/project/kmheffing/kmheffing_impact.pdf. Feb 2009.
- [33] Anoniem. Accessed: 07/03/2016. URL: <http://www.viapass.be>.
- [34] Eva Ericsson & Hanna Larsson & Karin Brundell-Freij. “Optimizing route choice for lowest fuel consumption – Potential effects of a new driver support tool”. In: *Transportation Research Part C* 14 (2006), p. 369–383.
- [35] Philipp Meisen & Thomas Seidl & Klaus Henning. “A Data-mining technique for the planning and organization of truck platoons”. In: red. door International Conference on Heavy Vehicles. Deel 10. Mei 2008.
- [36] Jeffrey Larson & Christoph Kammer & Kuo-Yun Liang & Karl Henrik Johansson. “Coordinated Route Optimization for Heavy-duty Vehicle Platoons”. In: red. door IEEE Conference on Intelligent Transport Systems. 2013.
- [37] Eric Larsson & Gustav Sennton & Jeffrey Larson. “The vehicle platooning problem: Computational complexity and heuristics”. In: *Transportation Research Part C* 60 (2015), p. 258–277.
- [38] Sebastion van de Hoef & Karl H. Johansson & Dimons V. Dimarogonas. “Coordinating Truck Platooning by Clustering Pairwise Fuel-Optimal Plans”. In: red. door IEEE Conference on Intelligent Transport Systems. 2015.
- [39] Peter Clough en Cathy Nutbrown. *A student’s guide to methodology: justifying enquiry*. London: London Sage, 2002.

- [40] Mark Saunders, Philip Lewis en Adrian Thornhill. *Research methods for business students (fifth edition)*. Essex, England: Pearson Education, 2009.
- [41] Richard M. Karp. “Reducibility Among Combinatorial Problems”. In: (1972). Red. door Raymond E. Miller & James W. Thatcher, p. 85–103.
- [42] Joseph Kirk. *Dijkstra’s Minimum Cost Path Algorithm*. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20025-dijkstra-s-minimum-cost-path-algorithm>.
- [43] European Commission. http://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/site/index_en.htm.
- [44] Tom M. Gasser et al. *Legal consequences of an increase in vehicle automation*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). 2013.
- [45] “Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics”. In: red. door Robert Bosch GmbH. 5de ed. Springer, 2007. Hfdstk. Automotive sensors, p. 208–231.
- [46] Maurice Kwakkernaat et al. “Advanced Microsystems for Automotive Applications 2014”. In: red. door Gereon Meyer Jan Fisher-Wolfarth. Springer, 2014. Hfdstk. Layer-Based Multi-Sensor Fusion Architecture for Cooperative and Automated Driving Application Development, p. 29–38.
- [47] Wende Zhang. “LIDAR-Based Road and Road-Edge Detection”. In: IEEE, jun 2010.
- [48] Wende Zhang. “Road-marking analysis for autonomous vehicle guidance”. In: *Proceedings of the 3rd European Conference on Mobile Robots*. Sep 2007.
- [49] Massimo Bertozzi & Alberto Broggi. “GOLD: A Parallel Real-Time Stereo Vision System for Generic Obstacle and Lane Detection”. In: *IEEE Transactions on image processing* 7.1 (1998), p. 62–81.
- [50] R. Omar Chavez-Garcia et al. “Frontal object perception using radar and mono-vision”. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE*. IEEE, jun 2012, p. 159–164.
- [51] Seong-Woo Kim et al. “Cooperative Perception for Autonomous Vehicle Control on the Road: Motivation and Experimental Results”. In: *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, nov 2013, p. 5059–5066.
- [52] Carlos Morales Paulin et al. *Connected car industry report 2013*. Telefonica. 2013.
- [53] Xue Yang & Jie Liu & Vaidya N.F. & Feng Zhao. “A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning”. In: *The Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004*. IEEE, aug 2004, p. 114–123.
- [54] Carl Bergenheim & Erik Hedin & Daniel Skarin. “Vehicle-to-Vehicle Communication for a Platooning System”. In: *Transport Research Arena 2012*. Elsevier, 2012, p. 1222–1233.

-
- [55] Jeroen Ploeg & Alex F. A. Serrarens & Geert J. Heijenk. “Connect & Drive: design and evaluation of cooperative adaptive cruise control for congestion reduction”. In: *Journal of Modern Transportation* (2013).
- [56] *Google Self-Driving Car Project*. <https://www.google.com/selfdrivingcar/>.
- [57] Vlaams Parlement. *Actuele vraag over de introductie van een zelfrijdende wagen op de Vlaamse snelwegen en de regelgeving ter zake*. <https://www.vlaamsparlement.be/plenaire-vergaderingen/984979/verslag/986061>. Jun 2015.
- [58] Catherine Stupp. *Autonomous driving takes back seat as connected car rules prepared*. <http://www.euractiv.com/sections/infosociety/autonomous-driving-takes-back-seat-prep-work-eu-connected-car-law-gets-under>. Sep 2015.
- [59] Mark Harris. *Why you shouldn't worry about liability for self-driving car accidents*. <http://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/why-you-shouldnt-worry-about-liability-for-selfdriving-car-accidents>. Okt 2015.
- [60] Bradley Berman. *Lower-cost lidar is key to self-driving future*. <http://www.transportbusiness.net/index.php/features/14--sp-803/1378-autonomous-truck-convoys-the-question-is-when-not-if>. Okt 2015.