

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

Masterproef

Opnemen van milieudoelstellingen in rittenplanning

Promotor :
Prof. dr. An CARIS

Copromotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Anja Thysen

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management
en logistiek*

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

Masterproef

Opnemen van milieudoelstellingen in rittenplanning

Promotor :
Prof. dr. An CARIS

Copromotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Anja Thysen

Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management en logistiek

Voorwoord

Deze eindverhandeling vormt het sluitstuk van mijn opleiding Handelsingenieur in de Bedrijfseconomische wetenschappen, afstudeerrichting Operationeel Management en Logistiek met optie Technologie, Innovatie en Milieumanagement, aan de Universiteit van Hasselt.

Graag zou ik eerst een woord van dank willen richten aan de verschillende mensen die bijgedragen hebben aan de verwezelijking van deze eindverhandeling.

Allereerst gaat mijn dank uit naar mijn promotor Dr. An Caris voor haar deskundige begeleiding, kritiek en raadgevingen. Verder wil ik ook Prof. Int Panis bedanken voor zijn nuttige ideeën omtrent transport en milieu. Ten slotte zou ik mijn vriend, ouders en vrienden willen bedanken voor hun morele steun en hun vertrouwen gedurende mijn hele studieloopbaan.

Samenvatting

Een opvallende trend in het goedertransport is de nog steeds stijgende vraag naar transport. Deze toename brengt verschillende nadelen met zich mee. De uitstoot van emissies door de transportsector zorgen voor de toenemende luchtvervuiling en de opwarming van de aarde. Verder draagt de sector ook bij tot de milieudruk door het gebruik van energiebronnen. Ten slotte heeft congestie een grote impact op de bereikbaarheid en de luchtkwaliteit.

Een mogelijke oplossing om externe kosten van transport zoals de uitstoot van emissies in rekening te brengen, is door ze op te nemen in de rittenplanning. In deze eindverhandeling "Het opnemen van milieudoelstellingen in rittenplanning" wordt nagegaan op welke manier de emissiekost opgenomen kan worden in de doelfunctie van een rittenplanning.

In het eerste hoofdstuk wordt het probleem gesitueerd en gedefinieerd. Vervolgens wordt een uiteenzetting gegeven van de centrale onderzoeksvraag, de deelvragen, het onderzoeksopzet en de verdere opbouw van deze eindhandeling.

In hoofdstuk twee wordt de essentie van een rittenplanningsprobleem besproken met zijn belangrijkste componenten. Verder komen de meest bestudeerde klassieke rittenplanningsproblemen zoals het handelsreizigersprobleem, het rittenplanningsprobleem met capaciteitsrestricties en het rittenplanningsprobleem met tijdsvensters aan bod. Ten slotte eindigt dit hoofdstuk met een sectie over oplossingsmethoden voor deze problemen.

Het vervolg van de eindverhandeling gaat dieper in op rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen. Dit studiegebied biedt nieuwe opportuniteiten in het definiëren van problemen. Naast het minimaliseren van de totale kost kunnen ook bijkomende doelstellingen zoals het minimaliseren van tijd of afstand nagestreefd worden. Hoofdstuk drie behandelt drie verschillende gevallen waarin rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen meestal gebruikt worden. Ook dit hoofdstuk eindigt met een sectie over oplossingsmethoden voor deze problemen.

In het laatste hoofdstuk van de literatuurstudie wordt een overzicht gegeven van rittenplanningsproblemen die rekening houden met milieuaspecten. In een eerste soort veranderen de auteurs de kostenfunctie zodat gefocust wordt op het totale energieverbruik van voertuigen. Een tweede soort handelt over modellen met voertuigen met alternatieve brandstoffen. Een laatste soort berekent effectief de emissies van CO₂. De emissiekost wordt opgenomen in de doelfunctie en op deze manier worden de emissies geminimaliseerd door de doelfunctie te minimaliseren.

Hoofdstuk vijf vormt het praktische gedeelte van deze eindverhandeling. In het eerste deel van de praktijkstudie wordt dieper ingegaan op de invloed van transport op het milieu. De verschillende pollutanten en de kost van een ton CO₂ worden besproken. Ten slotte wordt in dit deel ook gekeken hoe de hoeveelheid emissies in de praktijk bepaald worden.

In het tweede deel van de praktijkstudie worden twee illustratieve voorbeelden toegepast op een model van het vierde hoofdstuk, namelijk het pollution-routing model van Bektaş en Laporte (2011). In dit model worden de emissiekosten berekend op basis van het brandstofverbruik van het voertuig. Naast de emissiekosten worden ook de kost van bestuurder en de kost van de brandstof in rekening gebracht. De routecombinaties worden vergeleken volgens verschillende doelfunctie: minimaliseren van afstand, verbruikte energie, energie afhankelijk van de lading en kost. In het eerste scenario bestaat het probleem uit drie klanten en een depot verspreid over België. Het tweede scenario bedient vier klanten in een regionaal gebied. In de scenario's worden de effecten van de lading, snelheid, motorefficiëntie en soort brandstof bekeken. Aangezien het probleem steeds complexer wordt door het toevoegen van klanten aan het netwerk, wordt in de volgende sectie een mogelijk algoritme gegeven voor het oplossen van het pollution-routing probleem. Ten slotte volgen nog enkel aanbevelingen voor verder onderzoek en een algemene conclusie.

Inhoudsopgave

Voorwoord	I
Samenvatting	II
Inhoudsopgave	IV
Lijst van figuren	VI
Lijst van tabellen	VII
Hoofdstuk 1: Probleemstelling en definiëring	- 1 -
1.1 Praktijkprobleem	- 1 -
1.2 Centrale onderzoeksvraag	- 3 -
1.3 Deelvragen	- 3 -
1.4 Onderzoeksopzet	- 4 -
Hoofdstuk 2: Overzicht van rittenplanningsproblemen met één doelstelling	- 5 -
2.1 Inleiding	- 5 -
2.2 Componenten van rittenplanning	- 6 -
2.2.1 Het netwerk	- 6 -
2.2.2 De vraag	- 6 -
2.2.3 De vloot	- 7 -
2.2.4 Tijdsbeperkingen	- 7 -
2.2.5 De doelstellingen	- 8 -
2.3 Het handelsreizigersprobleem	- 11 -
2.4 Het rittenplanningsprobleem met capaciteitsrestricties	- 12 -
2.5 Het rittenplanningsprobleem met tijdsvensters (VRPTW)	- 14 -
2.6 Oplossingsmethoden voor rittenplanningsproblemen	- 16 -
2.6.1 Exacte algoritmen	- 16 -
2.6.2 Heuristieken	- 17 -
2.6.3 Metaheuristieken	- 19 -
Hoofdstuk 3: Rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen	- 21 -
3.1 Uitbreiden klassiek academisch probleem	- 22 -
3.2 Veralgemeenen	- 23 -
3.3 Reële case	- 24 -

3.4	Oplossingsmethoden	- 25 -
3.4.1	Pareto methoden	- 25 -
3.4.2	Scalaire methoden	- 27 -
3.4.3	Niet-scalaire en niet-Pareto methoden.....	- 28 -
Hoofdstuk 4: Rittenplanningsproblemen met milieudoelstellingen.....		- 29 -
4.1	Kostenfunctie gebaseerd op lading	- 30 -
4.1.1	Energy-minimizing vehicle routing problem	- 30 -
4.1.2	Fuel consumption rate considered CVRP.....	- 34 -
4.2	Modellen met alternatieve brandstoffen.....	- 38 -
4.2.1	Green vehicle routing problem	- 38 -
4.2.2	Electric vehicle routing problem.....	- 42 -
4.3	Modellen die emissies opnemen	- 45 -
4.3.1	Emissions minimization vehicle routing problem.....	- 45 -
4.3.2	Gis-based EVRPTW	- 50 -
4.3.3	Tijdsafhankelijk rittenplanningsprobleem met tijdsvensters	- 52 -
4.3.4	The pollution-routing problem	- 55 -
4.4	Overzicht modellen	- 61 -
Hoofdstuk 5: Praktijkstudie		- 63 -
5.1	Transport en milieu.....	- 63 -
5.1.1	Polluenten	- 63 -
5.1.2	De kost van CO ₂	- 66 -
5.1.3	Het berekenen van emissies	- 68 -
5.2	Toepassing Bektaş en Laporte (2011)	- 69 -
5.2.1	Inleiding	- 69 -
5.2.2	Opstellen van het model.....	- 71 -
5.2.3	Illustratief voorbeeld 1: drie klanten	- 73 -
5.2.4	Illustratief voorbeeld 2: vier klanten	- 81 -
5.3	Reflectie.....	- 90 -
5.4	Aanbevelingen	- 92 -
Hoofdstuk 6: Algemene conclusies.....		- 93 -
Lijst der geraadpleegde werken		- 97 -
Bijlagen.....		- 103 -

Lijst van figuren

Figuur 3. 1: Een Pareto dominantie diagram met drie oplossingspunten	- 26 -
Figuur 4. 1: Relatie FCR en gewicht van het voertuig bron Xiao et al. (2011)	- 34 -
Figuur 4. 2: Brandstofverbruik in functie van snelheid	- 57 -
Figuur 5. 1: Evolutie van de emissies van transport in Vlaanderen (1990=100).....	- 66 -
Figuur 5. 2: CO ₂ prijs projecties (Cozijnsen, 2010)	- 67 -
Figuur 5. 3: Energieminimaliserende route	- 75 -
Figuur 5. 4: Afstandminimaliserende route	- 75 -
Figuur 5. 5: Gewogen ladingminimaliserende route	- 76 -
Figuur 5. 6: Energieminimaliserende kostenfunctie scenario 1	- 77 -
Figuur 5. 7: Energieminimaliserende kostenfunctie scenario 2	- 79 -
Figuur 5. 8: Energiefunctie route (0,3,2,1,4,0) en (0,1,2,3,4,0)	- 87 -
Figuur 5. 9: Brandstofverbruik in functie van snelheid	- 89 -
Figuur 5. 10: Kosten in functie van snelheid	- 89 -

Lijst van tabellen

Tabel 4. 1: Symbolen en definities in het wiskundig model van EMVRP	- 31 -
Tabel 4. 2: Symbolen en definities in het wiskundig model van FCVRP	- 36 -
Tabel 4. 3: Symbolen en definities in het wiskundig model van G-VRP	- 39 -
Tabel 4. 4: Symbolen en definities in het wiskundig model van E-VRPTW	- 43 -
Tabel 4. 5: Symbolen en definities in het wiskundig model van EVRP	- 47 -
Tabel 4. 6: Symbolen en definities in het wiskundig model van PRP	- 59 -
Tabel 4. 7: Overzicht modellen met milieudoelstellingen	- 62 -
Tabel 5. 1: Overzicht polluenten	- 65 -
Tabel 5. 2: Afstandenmatrix voorbeeld 1	- 73 -
Tabel 5. 3: Overzicht routes	- 74 -
Tabel 5. 4: Gedragen lading (0,1,2,3,0)	- 76 -
Tabel 5. 5: Brandstofverbruik en kosten scenario 1	- 77 -
Tabel 5. 6: Overzicht routes scenario 2	- 78 -
Tabel 5. 7: Brandstofverbruik en kosten scenario 2	- 79 -
Tabel 5. 8: Vergelijking benzine - diesel	- 80 -
Tabel 5. 9: Vergelijking benzine-diesel in %	- 80 -
Tabel 5. 10: Afstandenmatrix voorbeeld 2	- 81 -
Tabel 5. 11: Overzicht optimale routes	- 83 -
Tabel 5. 12: Gedragen lading route (0,3,2,1,4,0)	- 84 -
Tabel 5. 13: Gedragen lading route (0,2,1,3,4,0)	- 85 -
Tabel 5. 14: Vraagpatroon 1: energie bij 40 km/u	- 86 -
Tabel 5. 15: Vraagpatroon 1: energie bij 42 km/u	- 86 -
Tabel 5. 16: Vraagpatroon 1: energie bij 43 km/u	- 86 -
Tabel 5. 17: Vergelijking kost: motorefficiëntie 37% - 40% bij 40 km/u	- 88 -

Hoofdstuk 1: Probleemstelling en definiëring

1.1 Praktijkprobleem

Een opvallende trend in het goederentransport is de nog steeds stijgende vraag naar transport. Terwijl het bruto binnenlands product van de EU-lidstaten gemiddeld met 2,4% groeide van 1995 tot 2006, groeide het goederentransport jaarlijks met gemiddeld 2,8%. Een aantal factoren zoals het stijgende belang van just-in-time services hebben ervoor gezorgd dat wegtransport een dominante rol speelt in het goederentransport: 46% van het goederentransport bestaat uit wegvervoer, het transport over zee heeft een aandeel van 37%. De laatste jaren wordt echter ook de impact van het goederentransport op de omgeving bekeken. (Europese Commissie, 2009)

De broeikasemissies zullen onder druk van internationale afspraken verlaagd moeten worden om bij te dragen aan de strijd tegen de klimaatverandering. Bijgevolg heeft de Europese Unie opgeroepen om de uitstoot van broeikasgassen drastisch te beperken om zo de opwarming van het klimaat te beperken tot minder dan 2°C. In uitvoering van het Kyoto Protocol dienen de landen van de Europese Unie tegen 2050 de totale uitstoot met 80 tot 95% te verminderen ten opzichte van 1990. Voor Vlaanderen moet in dit kader de uitstoot van broeikasgassen (voornamelijk CO₂) in de periode 2008-2012 gemiddeld met 5,2% verminderen ten opzichte van 1990. (Vlaamse overheid, 2006 & Europese Commissie, 2011)

Het rapport "Emissie van broeikasgassen door transport" van de Vlaamse Milieu Maatschappij stelt dat de transportsector mee verantwoordelijk is voor de emissie van broeikasgassen. CO₂ behoort onder andere tot deze broeikasgassen en draagt bij tot de klimaatveranderingen. De CO₂-emissie van de transportsector steeg nog met 2,5% in de periode 2000-2008. In 2009 was er een forse daling met 7,5% door een verminderde activiteit. Deze daling was te wijten aan de financieel-economische crisis. Ondanks deze daling in 2009 blijkt uit een analyse van de Europese Commissie dat de uitstoot van broeikasgassen in de transportsector nog steeds sterk blijft toenemen. De uitstoot van broeikasgassen door de vervoerssector moet tegen 2050 met minstens 60% verminderen ten opzichte van 1990. (MIRA, 2010 & Europese Commissie, 2011)

In 2003 werd het Vlaams milieubeleidsplan 2003-2007 (MINA-plan 3) opgesteld met als doelstelling de uitstoot van CO₂ door verkeer ten opzichte van het referentiejaar 1990 te stabiliseren tegen 2010. In de periode 1990-2005 namen de CO₂-emissies met 27% toe. Ondanks het feit dat voertuigen energiezuiniger worden, neemt het aantal kilometers nog steeds toe waardoor de oorspronkelijk voorziene stabilisatie geen haalbare doelstelling was. In december 2007 werd het plan aangepast voor de periode 2008-2010. Volgens het MINA-plan 3+ (periode 2008-2010) mogen de CO₂-emissies van de transportsector maximaal 25% hoger liggen in 2010 ten opzichte van 1990. (MIRA, 2010)

Ondertussen stelde de Vlaamse overheid het milieubeleidsplan op voor de periode 2011-2015 (MINA- plan 4) aangezien bij ongewijzigd beleid de uitstoot van transport in 2030 10% hoger zou liggen dan vandaag. Daarnaast heeft Vlaanderen ook nog de ambitie om het distributiecentrum van Europa te worden maar dit houdt mogelijk een belangrijke milieu-impact in door de te verwachten toename van het goederentransport. Zo lag het aantal tonkilometer in 2007 al 49% hoger dan in 1995 en verwacht men een bijkomende stijging van 47% tegen 2030. (Vlaamse overheid, 2010)

De sector transport is niet alleen verantwoordelijk voor de emissies van broeikasgassen maar de sector draagt ook bij tot de milieudruk door het gebruik van energiebronnen. In 2009 bedroeg het energiegebruik van de sector transport 11,7% van het totale energiegebruik in Vlaanderen ondanks de daling van de activiteit in de transportsector door de financieel-economische crisis. Binnen de transportsector heeft het wegvervoer het grootste aandeel in het energieverbruik, ongeveer 95% in 2009. (MIRA, 2010)

Er is steeds meer vraag naar energie terwijl de fossiele brandstoffen eindig zijn. Indien we ons huidige beleid niet aanpassen, zal de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen voor het vervoer nauwelijks onder de 90% dalen. De Europese Richtlijn Hernieuwbare Energie van 2009 verplicht België om tegen 2020 10% van de totale energie in de transportsector te halen uit hernieuwbare energie. We hebben nog een lange weg te gaan want het aandeel hernieuwbare energie in 2009 bedroeg slechts 3%. (MIRA, 2010 & Europese Commissie, 2011)

Verder heeft congestie ook een grote impact op de bereikbaarheid en de luchtkwaliteit. De bereikbaarheid komt in het gedrang en dit resulteert in een dalende flexibiliteit van het wegtransport. Ook heeft congestie een groot effect op de emissies van voertuigen. Door het frequent stoppen en vertrekken wordt er meer brandstof verbruikt. In tabel 1 kan men zien dat bij sterke congestie, bij een gemiddelde snelheid kleiner dan 40 km/u (1aa, 1a, 1b), de emissie-uitstoot aanzienlijk stijgt en dit resulteert in meer luchtvervuiling. Hierdoor zullen de congestiekosten tegen 2050 met ongeveer 50% stijgen. (Europese Commissie, 2011 & Veurman et al, 2002)

Externe kosten van transport zoals uitstoot van emissies kunnen in rekening gebracht worden door ze op te nemen in de rittenplanning. Vooraleer hier verder op in te gaan, is het belangrijk om de essentie van het rittenplanningsprobleem te kennen.

1.2 Centrale onderzoeksvraag

In de bovenstaande probleemstelling wordt duidelijk dat de transportsector bijdraagt aan de milieuproblemen. Deze sector zal dan ook inspanningen moeten leveren en maatregelen moeten nemen om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren. Een mogelijke oplossing is het opnemen van milieuoverwegingen in de rittenplanning. Hierdoor worden de externe kosten van bijvoorbeeld emissieuitstoten ook mee opgenomen in de rittenplanning.

In een traditioneel rittenplanningsprobleem wordt één doelstelling geformuleerd. In de praktijk daarentegen worden vaak meerdere doelstellingen gelijktijdig opgenomen. Naast het minimaliseren van kosten, reistijd of afstand, zal de eindverhandeling milieudoelstellingen nastreven.

In de eindverhandeling zal eerst onderzocht worden hoe de emissieuitstoot van wegtransport het best berekend kan worden. Het is belangrijk om te weten met welke parameters rekening gehouden moet worden. Deze parameters kunnen dan opgenomen worden in een bijkomende doelstelling in de rittenplanning.

De volgende centrale onderzoeksvraag vormt de leidraad doorheen de eindverhandeling:

“Hoe kunnen milieudoelstellingen opgenomen worden in de rittenplanning?”

1.3 Deelvragen

De centrale onderzoeksvraag wordt verder uitgewerkt in deelvragen om meer structuur in het onderzoek te brengen. De deelvragen zullen het beantwoorden van de centrale onderzoeksvraag dan ook vereenvoudigen.

- Hoe kunnen meerdere doelstellingen opgenomen worden in rittenplanningsproblemen? (Hoofdstuk 3)
- Welke modellen bestaan er om, naast de primaire doelstelling (minimalisatie tijd of afstand), emissies op te nemen in de rittenplanning? (Hoofdstuk 4)
- Welke parameters bepalen de uitstoot van emissies bij wegtransport? (Hoofdstuk 4 & 5)
- Hoe worden de parameters opgenomen in een doelstelling en in welke mate dragen ze bij tot de doelstelling? (Hoofdstuk 4 & 5)

1.4 Onderzoeksopzet

In het eerste deel van de eindverhandeling wordt een verkennend onderzoek uitgevoerd naar de reeds bestaande rittenplanningsmodellen met één doelfunctie. Vervolgens wordt aan de hand van een literatuurstudie besproken hoe meerdere doelfuncties in een rittenplanningsmodel gebruikt worden. In het laatste deel van de literatuurstudie worden de bestaande rittenplanningsmodellen met milieudoelstellingen besproken.

In het tweede deel van de eindverhandeling wordt de invloed van transport op het milieu besproken aan de hand van een aantal topics, namelijk de pollutanten, de kost van CO₂ en de manier waarop emissies berekend worden in de praktijk. In het tweede van deze praktijkstudie wordt gekozen om een rittenplanningsmodel met minimalisatie van emissies nader te bekijken: het pollution-routing model van Bektaş en Laporte (2011). Ten slotte worden enkele illustratieve voorbeelden met scenario's op basis van dit gekozen model uitgewerkt en besproken.

In de probleemstelling werd duidelijk dat congestie ook invloed heeft op de uitstoot van emissies. We moeten echter het probleemgebied afbakenen. Congestie opnemen in de eindverhandeling zou het onderzoek te complex maken aangezien de reistijden in het rittenplanningsprobleem dan variabel worden. In deze eindverhandeling zal dan ook geen rekening gehouden worden met congestie.

Hoofdstuk 2: Overzicht van rittenplanningsproblemen met één doelstelling

2.1 Inleiding

Rittenplanningsproblemen zijn veel voorkomende combinatorische optimalisatieproblemen die ontstaan in de transportlogistiek, waar plannings opgesteld worden in omgevingen met beperkingen. Deze optimalisatieproblemen hebben de voorbije jaren veel aandacht gekregen dankzij hun economisch belang en ruime toepasbaarheid. Een rittenplanningsprobleem bestaat uit het construeren van een verzameling van routes zodat transportverzoeken afgehandeld kunnen worden volgens de behoeften van de klanten. Een vloot van voertuigen is beschikbaar om de routes te bedienen. Daarnaast heeft elk voertuig uit de vloot een gegeven capaciteit en heeft een voertuig ook nog een start- en eindlocatie. Meestal bevindt de start- en eindlocatie zich in eenzelfde depot. Verder vermeldt elk transportverzoek de grootte van de lading die getransporteerd moet worden, de ophaallocaties (oorsprong) en de afleverlocaties (bestemming). Elke lading wordt getransporteerd vanaf haar oorsprong(en) tot haar bestemming(en) door één voertuig zonder overslag. Dit wil zeggen dat de goederen niet worden overgeladen naar een andere transportmodus. (Savelsbergh & Sol, 1995; Jozefowicz et al., 2008)

In dit hoofdstuk worden eerst de verschillende componenten van een rittenplanningsprobleem besproken. Vervolgens worden de meest bestudeerde rittenplanningsproblemen gedefinieerd, namelijk het handelsreizigersprobleem, het rittenplanningsprobleem met capaciteitsrestricties en het rittenplanningsprobleem met tijdsvensters. Ten slotte wordt een overzicht gegeven van de verschillende oplossingsmethoden voor deze rittenplanningsproblemen.

2.2 Componenten van rittenplanning

Het rittenplanningsprobleem is te definiëren in termen van verschillende componenten, nl. het netwerk, de vraag of de transportverzoeken, de vloot, de doelstelling(en) en de beperkingen. In deze paragraaf worden deze componenten kort toegelicht (Jozefowicz et al., 2008).

2.2.1 Het netwerk

Een netwerk wordt voorgesteld door een diagram $G = (N, A)$ waar N een reeks is van n knooppunten, die steden, klanten en/of depots voorstellen en A een reeks van bogen is. De bogen staan voor de reële links (wegen, pijpleidingen,...) of voor de symbolische verbindingen tussen de knooppunten. De afstandenmatrix tussen de knooppunten kan symmetrisch ($d_{ij} = d_{ji}$), asymmetrisch ($d_{ij} \neq d_{ji}$) of gemixt zijn, waar d_{ij} staat voor de afstand tussen knooppunt i en j . Verder wordt in een diagram met waarden meestal een kost voor het oversteken van de boog gegeven.

2.2.2 De vraag

De vraag kan vast of stochastisch zijn, kan geassocieerd worden aan zowel knooppunten als bogen en kan ook bepaald zijn voor een of verschillende producten. Een vraag verschijnt in een distributieprobleem indien een zekere hoeveelheid van een gegeven product geleverd moet worden aan bepaalde knooppunten (klanten) of moet reizen langs een bepaalde boog (leveringsroute). De vraag is ook een deel van het 'pick-up and delivery problem' waar de goederen eerst opgepikt worden op een bepaalde locatie en vervolgens ergens anders geleverd worden.

De manier waarop transportverzoeken beschikbaar worden, vormt een belangrijke karakteristiek voor rittenplanningsproblemen. Ze kunnen op twee verschillende manieren binnenkomen, nl. de statische situatie of de dynamische situatie. In een statische toestand zijn alle verzoeken gekend wanneer de rittenplanning opgesteld moet worden. In een dynamische toestand zijn sommige verzoeken gekend bij het opstellen van de rittenplanning, de andere verzoeken komen binnen tijdens de uitvoering van de bestaande rittenplanning. Bijgevolg moet in een dynamische situatie minstens één route veranderd worden wanneer een nieuw verzoek beschikbaar wordt om zo de nieuwe aanvraag te kunnen bedienen. (Savelsbergh & Sol, 1995)

2.2.3 De vloot

De vloot genereert beperkingen die invloed hebben op de tours. Een vloot kan heterogeen of homogeen zijn en ze kan bestaan uit een of meerdere voertuigen. Verder kunnen de voertuigen bestaan uit volle containers, full truckload (FTL) genoemd of uit deelladingen, less than truckload (LTL). Het gebruik van de voertuigen kan gelimiteerd worden door capaciteit, tijd of afstand.

2.2.4 Tijdsbeperkingen

Naast beperkingen aangaande de voertuigcapaciteit en voorrang aan bepaalde klanten bestaan tijdsbeperkingen in nagenoeg iedere praktische situatie met ophaling en levering van goederen. Beperkingen met betrekking tot de tijd vormen een integraal deel van de modellen voor rittenplanningsproblemen. Solomon en Desrosiers (1988) beschrijven het rittenplanningsprobleem met tijdsvensters. Hier wordt verder op ingegaan in deel 2.6.

Savelsbergh en Sol (1995) bespreken twee verschillende soorten tijdsbeperkingen, nl. tijdsbeperkingen gerelateerd aan de transportverzoeken en aan de voertuigen.

In de beperkingen gerelateerd aan de transportverzoeken worden tijdsintervallen gedefinieerd waarbinnen een bepaalde locatie bediend moet worden. Naast deze expliciete tijdsvensters kunnen ook impliciete tijdsvensters voorkomen in rittenplanningsproblemen. Impliciete tijdsvensters kennen hun bestaan vanuit het streven naar klantentevredenheid. Een voorbeeld hiervan is het dial-a-ride systeem. Dial-a-ride systemen zijn gesubsidieerde systemen voor het transport van ouderen en gehandicapten. Klanten specificeren ofwel een gewenste levertijd of een gewenste ophaaltijd. Het reële aankomsttijdstip moet vroeger of gelijk zijn aan het gespecificeerde tijdstip omdat de klant niet graag te laat zou komen. Op die manier wordt een open tijdvenster gecreëerd. Dit open tijdvenster kan omgevormd worden tot een gesloten tijdvenster om te vermijden dat een klant te vroeg aankomt. (Savelsbergh & Sol, 1995)

Een tweede soort tijdsbeperkingen zijn gerelateerd aan de voertuigen aangezien voertuigen meestal niet de hele dag beschikbaar zijn. Bestuurders moeten eten, slapen en zich houden aan de rij- en rusttijden. Verder moeten de voertuigen ook onderhouden worden. Een reeks tijdsvensters kunnen dus opgesteld worden per voertuig waarin aangegeven wordt wanneer het voertuig ter beschikking is voor het bedrijf. (Savelsbergh en Sol, 1995)

Het meest bestudereerde rittenplanningsprobleem met tijdsbeperkingen is het 'dial-a-ride' probleem, waarbij klanten getransporteerd worden. De klanten specificeren een tijdstip waarop ze opgepikt willen worden en een tijdstip waarop ze hun bestemming bereikt willen hebben. De aanwezigheid van tijdsbeperkingen maakt het probleem aanzienlijk moeilijker en het rittenplanningsprobleem is dan ook NP-hard. Het is meestal niet gemakkelijk om een rittenplan op te stellen met tijdsvensters. Aan de andere kant kan de optimalisatiemethode ook voordeel halen uit de aanwezigheid van tijdsbeperkingen aangezien de oplossingsruimte veel kleiner wordt. (Savelsbergh & Sol, 1995)

2.2.5 De doelstellingen

De doelstellingen kunnen meervoudig en divers zijn. De meest voorkomende doelstellingen zijn het minimaliseren van de totale gereisde afstand, de benodigde tijd, de totale tourkost en de vlootgrootte. In de volgende paragraaf komen de doelfuncties uitgebreid aan bod.

In de literatuur worden de doelfuncties voor rittenplanningsproblemen op verschillende manieren ingedeeld. In deze paragraaf wordt de indeling van deze doelfuncties volgens twee methodes besproken. Savelsbergh en Sol (1995) delen de doelfuncties op in twee groepen, rittenplanningsproblemen met één voertuig ('single-vehicle') en met meerdere voertuigen ('multiple-vehicle'). Verder ordenen Jozefowicz et al. (2008) de verschillende doelfuncties volgens de component waarmee het probleem geassocieerd wordt: de tour, de activiteit van het knooppunt of de bron.

- a. Doelstellingen gerelateerd aan aantal voertuigen (Savelsbergh en Sol (1995))

De doelfuncties gerelateerd aan rittenplanningsproblemen met één voertuig zijn de volgende:

- *Minimaliseer de duur van een route:* de totale tijd die een voertuig nodig heeft om de route te bedienen inclusief reistijden, wachttijden, in- en uitlaadtijden en rusttijden wordt geminimaliseerd.
- *Minimaliseer reistijd:* de reistijd van een route wordt gedefinieerd als de totale tijd die werkelijk gependend wordt aan het verplaatsen tussen locaties.
- *Minimaliseer routelengte:* de lengte van de route is de totale gereisde afstand tussen de verschillende locaties.
- *Minimaliseer klantenongemak:* Klantenongemak wordt bepaald door het verschil tussen de werkelijke en de door de klant vooraf bepaalde vertrek- en aankomsttijden te meten.

Wanneer meerdere voertuigen in de vloot beschikbaar zijn, kunnen de volgende additionele doelfuncties teruggevonden worden in de literatuur. De vorige doelstellingen kunnen ook nog steeds nagestreefd worden.:

- *Minimaliseer het aantal voertuigen:* Aangezien bestuurders en voertuigen de meeste kosten met zich meebrengen, is het minimaliseren van de voertuigen om alle klantenverzoeken te bedienen vaak de hoofddoelstelling.
 - *Maximaliseer de winst:* Deze doelstelling kan elke bovenstaande doelfunctie gebruiken. Ze wordt meestal gebruikt in een systeem waarbij de bediener de mogelijkheid heeft om een transportverzoek te weigeren. Hierbij moet rekening gehouden worden met de kosten van het vervoer van een bepaalde lading maar ook met de inkomsten die hiermee geassocieerd zijn.
- b. Doelstellingen volgens de component waarmee het probleem geassocieerd wordt (Jozefowicz et al., 2008)

De meest voorkomende **doelstelling gerelateerd aan de tour** is het *minimaliseren van de kost* van de gegenereerde oplossing. De kosten zijn meestal vast voor een voertuig en variabel voor zijn gebruik, in termen van gereisde afstand of tijd. Kosten kunnen ook bestaan uit boetes die ontstaan wanneer een klant een onvolledig levering krijgt of wanneer de levering te laat is.

De kost van een probleem kan op vele manieren uitgedrukt worden zoals het aantal bezochte klanten, de gereisde afstand, de tijd die nodig is om het traject af te leggen. Minimaliseren van een kost is normaal gesproken gelinkt aan een economisch criterium. Andere motivaties zijn ook mogelijk zoals in de studie van Park en Koelling (1986) waar de afgelegde afstand geminimaliseerd moet worden om schade aan het product te voorkomen tijdens het transport.

Kostminimalisatie als doelstelling wordt soms genegeerd en vervangen door het *minimaliseren van lengte van de langste tour (makespan)*. Lacomme et al. (2003) stelden dat afvalbedrijven de lengte van de langste trip trachten te minimaliseren. Bijvoorbeeld in Troyes (Frankrijk) vertrekken alle vrachtwagens uit het depot om zes uur in de ochtend. De afvalophaling moet zo snel mogelijk afgehandeld worden zodat werknemers nog andere taken kunnen uitvoeren zoals het sorteren van het afval. Het bedrijf wil dus de totale duur van de trips én de duur van de langste trip (makespan) minimaliseren. Murata en Itai (2005) minimaliseren het aantal voertuigen en de maximale rittentijd tussen de voertuigen in hun rittenplanningsprobleem. Het moet opgemerkt worden dat ze niet de totale rittentijd van alle voertuigen gebruiken maar de maximale rittentijd tussen de voertuigen. Hierdoor wordt de actieve duur van het depot geminimaliseerd.

Sommige doelstellingen zoals het *balanceren van de route* zijn ontwikkeld om verschillen tussen de ritten te laten zien. Het element eerlijkheid staat hier centraal. Om een doelstelling met balanceren te definiëren, is het noodzakelijk om de werklast van een tour te bepalen. Deze kan bijvoorbeeld uitgedrukt worden in het aantal bezochte klanten, de hoeveelheid goederen die geleverd worden, de benodigde tijd of de lengte van de tour. Lee en Ueng (1998) integreren de balans om de eerlijkheid tussen de werknemers te vergroten. Werknemers zijn immers een belangrijke bron voor een organisatie. Wanneer werknemers vinden dat ze benadeeld zijn, verlaagt de kwaliteit van de service. Het minimaliseren van de totale afstand en de werklast tussen de werknemers zo veel als mogelijk balanceren, zijn twee doelstellingen in het rittenplanningsprobleem van Lee en Ueng. De laatste doelstelling houdt in dat de som van de verschillen tussen de werklast van iedere rit en de kleinste werklast geminimaliseerd wordt. Ook Jozefowicz et al. (2002) introduceren een model met als tweede doelstelling het balanceren van de lengte van de ritten maar op een andere manier. Dit nieuw criterium wordt uitgedrukt als de minimalisatie van het verschil tussen de lengte van de langste tour en de lengte van de kortste tour.

De meeste onderzoeken naar **doelstellingen gerelateerd aan het knooppunt** bevatten tijdsvensters. In deze studies worden de tijdsvensters vervangen door een doelstelling die ofwel het aantal geschonden beperkingen minimaliseert ofwel de wachttijd van de klanten en/of bestuurders minimaliseert door het te laat of te vroeg zijn. Een klant moet immers wachten als de bestuurder te laat is en een bestuurder moet wachten indien hij te vroeg bij een klant aankomt. Beide doelstellingen kunnen ook tegelijkertijd geminimaliseerd worden.

In een studie van Bowerman et al. (1995) over het rittenplanningsprobleem van een schoolbus wordt de afstand die de studenten moeten wandelen tot de bushalte geminimaliseerd. Doerner et al. (2006) formuleren een gelijkaardige doelfunctie, aangeduid als de gemiddelde toegankelijkheid. De formulering is gelijk aan de gemiddelde afstand die een inwoner moet wandelen om de dichtstbijzijnde halte van een mobiele faciliteit te bereiken. Deze doelstelling is gerelateerd aan het idee van "coverage". Het "covering tour problem", voorgesteld door Gendreau et al. (1997), specificeert een afstand c en elk knooppunt van een bepaalde set moet binnen een afstand c van een bezocht knooppunt liggen. In de studie van Doerner et al. (2006) is de cover een parameter en het doel is het selecteren van haltes zodat het percentage van de populatie die de halte kunnen bereiken gemaximaliseerd wordt. Deze doelstelling is gericht op het idee van eerlijkheid: geen enkele inwoner mag uitgesloten worden van medische diensten doordat de afstand tussen de inwoner en de dichtstbijzijnde faciliteit te groot is. (Jozefowicz et al. 2008)

Bij de **doelstellingen gerelateerd aan bronnen** zijn de belangrijkste bronnen voertuigen en goederen. Een van de meest voorkomende doelstellingen is het minimaliseren van het aantal voertuigen. Dit kan economisch geïnterpreteerd worden aangezien minder voertuigen betekent dat minder monetaire investeringen (aankoop voertuigen, brandstof en lonen bestuurders) nodig zijn. (Jozefowicz et al. 2008)

2.3 Het handelsreizigersprobleem

Een eerste type rittenplanningsprobleem is het handelsreizigersprobleem of het 'Traveling Salesman Problem', afgekort TSP. Een handelsreiziger dient een aantal steden te bezoeken en terug te keren naar zijn woonplaats. Hij wordt verondersteld dat hij een afstandstabel tot zijn beschikking heeft. Dus kent hij de onderlinge afstand voor elk tweetal te bezoeken steden. Het doel van de verkoper is een route (tour) langs de steden te bepalen zodat de totale afgelegde afstand (de lengte van de tour) minimaal is. De meest gebruikelijke manier om de lengte van de tour te bepalen is het optellen van alle afgelegde afstanden. Het handelsreizigersprobleem met een dergelijke doelstellingsfunctie wordt ook wel het SUM TSP genoemd. Andere manieren om de lengte van de tour te definiëren zijn bijvoorbeeld: het verschil tussen de kortste en de langste afgelegde afstanden (Balanced TSP) of de langste van de afgelegde afstanden (Bottleneck TSP). (Cordeau et al., 2007)

Het handelsreizigersprobleem is vermoedelijk het meeste bestudeerde probleem uit de combinatorische optimalisering. In dit optimalisatieprobleem wordt de totale afstand geminimaliseerd. Bij combinatorische optimalisatie wordt gezocht naar de best mogelijke oplossing uit een eindig aantal oplossingen. Verder wordt binnen de combinatorische optimalisering een verschil gemaakt tussen eenvoudige en moeilijke problemen. Het verschil tussen "eenvoudig" en "moeilijk" wordt bepaald door het aantal elementaire bewerkingen dat nodig is om de optimale oplossing te vinden. Een probleem is "eenvoudig" of polynomiaal oplosbaar als er voor een bepaald optimaliseringsprobleem een algoritme bestaat waarbij een optimale oplossing wordt gevonden in een aantal bewerkingen. Een probleem is "moeilijk" wanneer nog geen polynomiaal algoritme gevonden is en waarvan met behulp van technieken uit de complexiteitstheorie is aangetoond dat ze NP-hard zijn. In de complexiteitstheorie kan een algoritme in polynomiale tijd opgelost worden als de benodigde tijd, in functie van de probleemgrootte, begrensd is door een polynoom. Bijgevolg groeit de tijd die nodig is om het probleem op te lossen exponentieel met de probleemgrootte. Het handelsreizigerprobleem is een NP-hard probleem (Lawler et al., 1987; Laporte en Osman, 1995; van der Veen, 1992).

2.4 Het rittenplanningsprobleem met capaciteitrestricties

Het klassieke rittenplanningsprobleem is een van de meest gekende problemen in combinatorische optimalisatie. Het veralgemeent het handelsreizigersprobleem en is daarom ook NP-hard. Het rittenplanningsprobleem werd voor het eerst beschreven in een artikel over het 'Truck Dispatching Problem' van Dantzig en Ramser (1959). In de paper zoekt men een optimale route voor een vloot van vrachtwagens die brandstof leveren aan een aantal benzinestations vanuit een terminal. Deze optimale route moet de totale afstand minimaliseren en eveneens voldoen aan de vraag van elk benzinestation. In de literatuur is het 'vehicle routing problem' (VRP) ook wel gekend als 'vehicle scheduling' of het 'delivery problem' (Dantzig & Ramser, 1959; Lawler et al., 1987).

Het klassieke rittenplanningsprobleem bestaat uit een distributieprobleem waarbij bepaalde producten gedistribueerd moeten worden vanuit een centrale faciliteit (depot) met een gegeven vloot van voertuigen. Deze vloot heeft een beperkte laadcapaciteit maar er wordt aangenomen dat deze vloot groot genoeg is om aan de verzoeken te voldoen. Verder moet men ook voldoen aan de eisen van de klant. De opdracht van VRP is een bepaalde doelfunctie minimaliseren of maximaliseren door het toewijzen van klanten aan een bepaald voertuig en een route te bepalen voor dit voertuig. De doelfunctie kan bestaan uit het minimaliseren van de totale reiskosten of het maximaliseren van de winst etc (Cordeau et al., 2007; Lawler et al., 1987).

Het basismodel van het klassieke rittenplanningsprobleem is het '*capacited vehicle routing problem*' of afgekort CVRP. Dit model veronderstelt dat de vloot voertuigen homogeen is; dit wil zeggen dat de voertuigen dezelfde capaciteit hebben. Verder vertrekken de voertuigen vanuit hetzelfde depot en hebben de klanten geen tijdsvensters gespecificeerd. Een oplossing van het CVRP bestaat uit een verzameling van routes waarin elke klant één keer bezocht wordt en de totale vraag van elk traject maximaal de capaciteit Q bedraagt. Het doel van CVRP is het minimaliseren van de totale afstand afgelegd door de voertuigen. Aangezien het CVRP een veralgemening is van het handelsreizigerprobleem, is het ook een NP-hard probleem (Cordeau et al., 2007).

Laporte et al. (1985) formuleren het CVRP gebruikmakend van een binaire variabele x_e en een kost per verbinding c_e . Het doel is het zoeken naar een oplossing waarbij de totale kosten minimaal zijn. Ook hier wordt elke klant één keer bezocht, start en stopt de route in het depot en wordt rekening gehouden met de capaciteits- en lengtebeperkingen. Het rittenplanningsprobleem wordt als volgt gedefinieerd:

Minimaliseer

$$\sum_{e \in E} c_e x_e \quad (1)$$

Onderworpen aan de beperkingen:

$$\sum_{e \in \delta(i)} x_e = 2, \quad i \in V \setminus \{0\} \quad (2)$$

$$\sum_{e \in \delta(0)} x_e = 2m \quad (3)$$

$$\sum_{e \in \delta(S)} x_e \geq 2r(S), \quad S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (4)$$

$$x_e \in \{0,1\}, \quad e \notin \delta(0) \quad (5)$$

$$x_e \in \{0,1,2\}, \quad e \in \delta(0) \quad (6)$$

Waarbij

- e verbinding tussen knooppunt i en j
- E verzameling van verbindingen $(i,j) \in V, i < j$
- x_e binaire variabele die aanduidt hoeveel keer verbinding e doorkruist wordt
- S aantal klanten of te bedienen punten
- $r(S)$ minimum aantal voertuigen nodig om S klanten te bedienen, rekeninghoudend met de capaciteit van het voertuig.
- $\delta(i)$ $\{(i,j) : i \in S, j \notin S \text{ of } i \notin S, j \in S\}$
- V verzameling van transportmodi
- m aantal routes

Doelstelling (1) minimaliseert de totale routekost en beperking (2) zorgt dat iedere klant exact één keer bezocht wordt en beperking (3) creëert m routes. Capaciteitsbeperking (4) verzekert een toegelaten oplossing in termen van capaciteit en zonder deelcycli. Ten slotte zorgen beperking (5) en (6) dat elke boog tussen twee klanten maximum één keer doorkruist wordt en dat de boog naar het depot maximum twee keer doorkruist wordt. (Cordeau et al., 2007)

2.5 Het rittenplanningsprobleem met tijdsvensters (VRPTW)

Solomon en Desrosiers (1988) beschrijven een complexer model van VRP, namelijk het '*vehicle routing problem with time windows*', afgekort VRPTW. Het model is een veralgemening van het CVRP en is dus ook NP-hard. De klanten definiëren tijdvensters $[a_i, b_i]$ waarbinnen de bediening op hun locatie moet aanvangen. Deze tijdvensters ontstaan vaak in rittenplanningsproblemen die geconfronteerd worden met organisaties die werken met vaste tijdschema's. In de aanwezigheid van tijdvensters worden niet enkel de kosten van de reistijd en totale reisafstand in rekening gebracht, maar ook de kost van het wachten. Deze kost kan ontstaan wanneer een voertuig te vroeg aankomt bij een klant. In dit rittenplanningsprobleem wordt dan ook de totale tijd geminimaliseerd.

Het VRPTW heeft een hoge complexiteitsgraad maar is wijd toepasbaar in reële situaties. Heuristieken zijn dan ook van primair belang omdat deze oplossingstechniek in staat is om in beperkte tijd oplossingen van hoge kwaliteit te genereren. Sommige VRPTW modellen ('soft time window modellen') laten een vroege of late bediening toe maar met een vorm van boete. De meeste onderzoekers concentreren zich op de 'hard time window modellen'. De doelstelling van het VRPTW-model is het minimaliseren van het aantal voertuigen en de totale afstand zonder het schenden van de capaciteits- en tijdvensterbeperkingen. Het minimaliseren van het aantal voertuigen heeft invloed op de voertuig- en arbeidskost, terwijl het minimaliseren van de totale afstand invloed heeft op de tijds- en brandstofkost. (Solomon & Desrosiers, 1988; Bräysy & Gendreau, 2005a; Ombuki et al., 2006)

Het VRPTW kan als volgt geformuleerd worden (zie bijvoorbeeld Desrochers et al., 1988.):

Minimaliseer

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}^k \quad (7)$$

Onderworpen aan de beperkingen:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ij}^k = 1, \quad i \in N \quad (8)$$

$$\sum_{j \in \delta^+(0)} x_{oj}^k = 1, \quad k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{i \in \delta^-(j)} x_{ij}^k - \sum_{i \in \delta^+(j)} x_{ji}^k = 0, \quad k \in K, j \in N \quad (10)$$

$$\sum_{i \in \delta^-(n+1)} x_{i,n+1}^k = 1, \quad k \in K \quad (11)$$

$$x_{ij}^k (w_i^k + s_i + t_{ij} - w_j^k) \leq 0, \quad k \in K, (i,j) \in A \quad (12)$$

$$a_i \leq w_i^k \leq b_i, \quad k \in K, i \in V \quad (13)$$

$$\sum_{i \in N} q_i \sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ij}^k \leq Q, \quad k \in K \quad (14)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad k \in K, (i,j) \in A \quad (15)$$

Waarbij

- x_{ij}^k Binaire beslissingsvariabele gelijk aan 1 als en slechts als de boog (i,j) gebruikt wordt door voertuig k .
- w_i^k Beslissingsvariabele die de tijd aangeeft wanneer voertuig k start met het bedienen van klant i
- s_i Bedieningstijd voor klant i
- t_{ij} Reistijd van i naar j
- $[a_i, b_i]$ Tijdsvenster gespecificeerd door klant i
- q_i Vraag van klant i
- Q Capaciteit voertuig

De doelstelling (7) minimaliseert de totale routekost en beperking (8) zorgt ervoor dat iedere klant exact één keer bezocht wordt. Verder verzekeren beperkingen (9)-(11) dat elk voertuig slechts één keer gebruikt wordt, dat er slechts één en hetzelfde voertuig mag aankomen en vertrekken bij de klant en dat ieder voertuig terugkeert naar het depot. De consistentie van de tijdsvariabele w_i^k wordt verzekerd door beperking (12) en de tijdsvensters worden bepaald door (13). Deze beperkingen zorgen er ook voor dat geen subtour mogelijk is. Ten slotte dwingt (14) de beperking van de voertuigcapaciteit af. (Cordeau et al., 2007)

2.6 Oplossingsmethoden voor rittenplanningsproblemen

In deze paragraaf worden de belangrijkste benaderingen voorgesteld voor het oplossen van het CVRP en VRPTW. De oplossingsmethoden kunnen in twee categorieën worden opgesplitst nl. exacte methoden en heuristieken.

2.6.1 Exacte algoritmen

In de praktijk is het moeilijk om een CVRP op een optimale manier op te lossen omdat het een veralgemening is van het TSP. Het CVRP is dan ook significant moeilijker op te lossen dan het TSP. Enkel voorbeelden bestaande uit kleine problemen kunnen optimaal opgelost worden binnen een respectabele rekentijd. (Cordeau et al., 2007)

Verschillende *branch & bound algoritmen* zijn beschikbaar om een CVRP op te lossen. Het basisconcept van de branch & bound techniek is het verdelen en het veroveren. Aangezien het originele probleem te groot is om direct op te lossen, wordt het probleem opgedeeld in kleinere subproblemen. Deze kleinere subproblemen worden dan afzonderlijk uitgewerkt. Het probleem wordt verdeeld door de hele reeks van mogelijke oplossingen herhaaldelijk op te spitsen in steeds kleinere subsets. Vervolgens gebeurt het veroveren partieel door de kwaliteit van de beste oplossing in de subset te beschouwen als een grens. Deze subset wordt weggelaten wanneer die grens wijst dat de oplossing onmogelijk de optimale oplossing van het originele probleem kan bevatten. (Hillier en Lieberman, 2005 & Cordeau et al., 2007)

Sommige exacte algoritmen zijn gebaseerd op *set partitioning*. Wanneer het CVRP geformuleerd is met binaire variabelen dan noemt het probleem binair integer programmeren (BIP). Bij set partitioning worden voor elke haalbare route binaire beslissingsvariabelen gedefinieerd. Een moeilijkheid met deze formulering is het groot aantal binaire variabelen dat gecreëerd wordt. In reële cases kan dit aantal oplopen in de miljoenen. Enkel in problemen die extreem beperkt zijn, problemen met heel weinig uitvoerbare oplossingen, zal het aantal variabelen klein genoeg zijn om het probleem direct op te lossen. Een oplossing is het gebruiken van een *column generation algorithm*. Column generation is een manier om een verkleind probleem op te lossen zodat het volgende deel kan opgelost worden. Het gereduceerde probleem bevat enkel een beperkte reeks van alle kolommen (binaire variabelen) en wordt herhaaldelijk opgelost. (Hillier en Lieberman, 2005; Cordeau et al., 2007)

Het VRPTW is zoals hierboven aangegeven een NP-hard probleem. Zoals voor vele andere rittenplanningsproblemen, is het moeilijk om het VRPTW exact op te lossen. Cordeau et al. (2007) geeft de drie belangrijkste benaderingen van de exacte methoden: de Lagrange relaxatie, Dantzig-Wolfes kolomgeneratie en branch-and-cut. Exacte methoden zijn echter zeer tijdsconsumerend. Hierdoor zijn ze niet altijd geschikt voor toepassingen uit het dagelijkse leven. (Cordeau et al., 2007; Bräysy en Gendreau, 2005a)

2.6.2 Heuristieken

Het is niet altijd mogelijk om een exact algoritme voor een probleem te vinden en dan bieden heuristieken de oplossing. Een heuristiek zorgt voor een specifieke strategie maar leidt niet altijd tot de optimale oplossing. Benaderingsmethoden zoals heuristieken en metaheuristieken geven een oplossing omdat ze het probleem sneller kunnen oplossen dan exacte algoritmes. In het algemeen moet een afweging gemaakt worden tussen de oplossingstijd en de kwaliteit van de oplossing. Hoe langer het duurt om een heuristiek uit te voeren, hoe beter de kwaliteit van de uiteindelijke oplossing. (Cordeau et al., 2007; Bräysy en Gendreau, 2005a)

In deze paragraaf worden drie soorten heuristieken besproken: de constructieve heuristieken, twee-fase methoden en de verbeteringsmethoden.

Constructieve methoden behoren tot de eerste heuristieken voor CVRP en vormen nog steeds de kern van vele software implementaties voor verschillende rittenplanningapplicaties. Deze algoritmen beginnen met een lege oplossing en worden iteratief opgebouwd door telkens een of meerdere klanten toe te voegen bij elke herhaling. De *savings-heuristiek* van Clarke en Wright (1964) is een van de eerste en meeste gekende heuristieken. De methode start met voertuigroutes met het depot en een andere klant. Bij elke stap worden twee verschillende routes gecombineerd volgens de grootste besparing die gegenereerd kan worden. De kostenbesparing wordt verkregen door twee klanten vervolgens te bedienen in plaats van de twee klanten apart te bedienen. (Laporte, 1992; Cordeau et al., 2007)

Twee-fase heuristieken zijn gebaseerd op de decompositie van het rittenplanningsprobleem in twee verschillende subproblemen: het clusteren van klanten in subsets en het bepalen van de volgorde van de klanten op iedere route of ook wel de 'cluster-first-route-second methode' genoemd. Het *sweep-algoritme* (Wren, 1971; Wren & Holliday, 1972 en Gillett & Miller, 1974) wordt vaak gerefereerd als eerste voorbeeld van deze cluster-first-route-second benadering. Klantenroutes worden gevonden door een rechte lijn te trekken vanuit het depot en vervolgens deze lijn te roteren rond het depot. Wanneer de lijn een locatie van de klant snijdt, wordt deze klant toegevoegd aan de route tot de maximale capaciteit bereikt is. (Laporte, 1992; Cordeau et al., 2007)

Een laatste categorie van heuristieken zijn de verbeteringsmethoden. Lokale zoekalgoritmen worden vaak gebruikt om een initiële oplossing gegenereerd door andere heuristieken te verbeteren. Beginnend van een gegeven oplossing voert een lokale zoekmethode eenvoudige aanpassingen uit, zoals het verwisselen van verbindingen zodat de volgorde van de klanten verandert, om zo een betere oplossing te verkrijgen. Als een verbeterde oplossing wordt gevonden, is dit de huidige oplossing en dan herhaalt het proces zich. In het andere geval wordt de oplossing als het lokale minimum herkend. De λ -opt heuristiek van Lin (1965) is een voorbeeld van een verbeteringsmethode. In deze oplossingsmethode worden λ -verbindingen van de originele oplossing verwijderd en vervangen door andere λ -verbindingen. De benodigde rekentijd om alle burens van een oplossing te onderzoeken is proportioneel met n^λ . Het grootste nadeel van heuristieken is dat ze kunnen leiden tot een lokaal optimum en dus niet tot een globaal optimum. Een aantal mechanismen, metaheuristieken, zijn ontworpen om van deze lokale optima globale optima te bekomen. (Cordeau et al., 2007)

In de context van VRPTW is de meest voorkomende manier om heuristieken te vergelijken het kijken naar de resultaten verkregen door Solomon's (1988) 56 benchmark problemen. Deze problemen bestaan uit 100 klanten, een centraal depot, capaciteitsbeperkingen, tijdsvensters voor de aflevertijd en een beperking voor de totale routetijd. De C1 en C2 klassen clusteren de klanten, in de R1 en R2 klassen zijn de locaties van de klanten willekeurig. De RC1 en de RC2 klassen bestaan uit een mix van zowel willekeurige als geclusterde klanten. Elke klasse bevat tussen de 8 en 12 individuele probleemgevallen en alle problemen in één enkele klasse hebben dezelfde klantenlocaties en dezelfde voertuigmogelijkheden, enkel de tijdsvensters verschillen. In termen van tijdsvensterdensiteit (het percentage van de klanten met tijdsvensters) hebben de problemen 25%, 50%, 75% en 100% tijdsvensters. De C1, R1, RC1 klassen hebben een korte planningshorizon en hebben 9 tot 19 voertuigen nodig. Problemen met een korte horizon bestaan uit voertuigen met een kleine capaciteit en kortere routetijden, en kunnen niet meerdere klanten op hetzelfde moment bedienen. De klassen C2, R2 en RC2 hebben een langere planningshorizon en bestaan uit minder voertuigen (twee tot vier). Zowel de reistijd als de afstand worden gegeven door de Euclidische afstand tussen de punten. (Bräysy en Gendreau, 2005a)

De resultaten worden meestal gerangschikt volgens de hiërarchische doelfunctie, waar het aantal voertuigen beschouwd wordt als de primaire doelfunctie. De secundaire doelstelling bestaat ofwel uit de totale gereisde afstand of de totale duur van de route. Volgens Bräysy (2001) zijn deze twee doelstellingen vaak tegenstrijdig want het reduceren van het aantal voertuigen veroorzaakt een stijging van de totale gereisde afstand. Een betere oplossing in termen van de totale afstand kan dus verkregen worden door het aantal routes uit te breiden. (Bräysy en Gendreau, 2005a)

Een totaaloverzicht van de belangrijkste exacte algoritmen en heuristieken kan teruggevonden worden in Bräysy en Gendreau (2005a, 2005b) en Cordeau et al. (2007).

2.6.3 Metaheuristieken

Metaheuristieken verrichten een grondigere zoektocht in de oplossingsruimte en eindigen minder waarschijnlijk met een lokaal optimum. Ze kunnen in drie klassen opgedeeld worden: lokale zoekmethoden, populatie-zoekmethoden en leermechanismen.

De eerste methode binnen de lokale zoekstrategieën is simulated annealing. In deze methode worden bepaalde achteruitgangen (een minder goede oplossing) geaccepteerd met een bepaalde waarschijnlijkheid. De waarschijnlijkheid van het accepteren van de achteruitgang begint met een hoge waarde. Vervolgens wordt deze waarde telkens lager gezet als de zoektocht vervolgd wordt (gradueel verlagen van de waarde T zoals simulated annealing dit doet, waar T staat voor de waarschijnlijkheid van het accepteren). Deterministic annealing is gelijkaardig maar hier wordt gebruik gemaakt van een deterministische drempelwaarde voor het accepteren van de oplossing. Een laatste methode binnen de lokale zoekstrategieën is tabu search. De bedoeling hier is het vermijden van terug te gaan naar oudere lokale optima. De oude oplossing wordt op een tabu-lijst geplaatst en wordt een aantal iteraties bijgehouden. (Cordeau et al., 2007)

De genetische zoekmethode en de adaptieve geheugenprocedure zijn twee voorbeelden van populatie-zoekmethoden. In de genetische zoekmethode worden willekeurig twee ouders uit een populatie getrokken om een kind te creëren met elementen van beide ouders. De twee slechte ouders worden vervolgens verwijderd uit de populatie en vervangen door het gecreëerde kind. Dit proces herhaalt zich k aantal keer. Bij de adaptieve geheugenprocedure wordt een kind gecreëerd door elementen uit verschillende ouders te combineren. (Cordeau et al., 2007)

Ten slotte zijn neurale netwerken en ant colony optimization voorbeelden van leermechanismen. Neurale netwerken zijn modellen samengesteld uit sterk met elkaar verbonden eenheden, net zoals neuronen in het brein. Zij construeren geleidelijk een oplossing via feedbackmechanismen. Dit mechanisme past de gewichten van de verbindingen tussen de eenheden aan zodat de geobserveerde output beter afgestemd is op de beschreven output. Ant colony optimization is afgeleid naar de analogie met mieren. Wanneer mieren voedsel verzamelen, laten zij een feromoon achter op hun route zodat andere mieren ook weten waar het voedsel zich bevindt. Frequent gebruikte routes bevatten dus meer feromonen. Vertaald naar het rittenplanningsprobleem betekent dit het volgende: een beweging heeft een hogere waarschijnlijkheid om gekozen te worden indien deze in vorige iteraties ook al tot een goede oplossing geleid heeft. (Cordeau et al., 2007)

Hoofdstuk 3: Rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen

De klassieke rittenplanningsproblemen zoals het 'traveling salesman problem' en het 'vehicle routing problem' zijn veel bestudeerd in de literatuur. Daarnaast krijgt het studiegebied van het optimaliseren van meerdere doelstellingen meer en meer aandacht. Rittenplanningsproblemen worden vaak gebruikt om reële scenario's te modelleren. Het minimaliseren van de kost van de oplossing wordt meestal gehanteerd als enige doelstelling van het probleem. In de realiteit bestaat de meerderheid van de rittenplanningsproblemen van nature uit meerdere doelstellingen. Het optimaliseren met meerdere doelstellingen biedt nieuwe opportuniteiten voor het definiëren van problemen. Rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen worden voornamelijk op de volgende drie manieren gebruikt (Jozefowicz et al., 2008):

- om een klassiek academisch probleem uit te breiden zodat de praktische toepassing ervan uitgebreid kan worden;
- om klassieke problemen te veralgemenen;
- om reële cases te bestuderen.

In de volgende secties van dit hoofdstuk worden deze drie manieren waarop meerdere doelstellingen gebruikt worden toegelicht. In de laatste sectie van dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de verschillende oplossingsmethoden voor rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen.

3.1 Uitbreiden klassiek academisch probleem

Wanneer een klassiek academisch probleem uitgebreid wordt, verandert de definitie van het probleem niet. Nieuwe doelstellingen worden toegevoegd aan het reeds bestaande probleem. Door deze uitbreiding wordt de praktische toepassing van het model vergroot. Klassieke optimalisatieproblemen zijn het rittenplanningsprobleem met capaciteitsrestricties (CVRP), het rittenplanningsprobleem met tijdsvensters (VRPTW), het handelsreizigersprobleem, ... Verschillende uitbreidingen van deze klassieke optimalisatieproblemen worden in de literatuur beschreven.

Een bijkomende doelstelling die opgenomen kan worden bij het CVRP is het balanceren van de trajecten. In de literatuur wordt 'route balancing' op verschillende manieren uitgewerkt. Jozefowicz et al (2006) onderzoeken een uitbreiding van het rittenplanningsprobleem waarin de balans van de lengte van de tour is opgenomen of het '*vehicle routing problem with routing balancing*'. De bijkomende doelstelling bestaat uit het minimaliseren van het verschil van de langste trajectlengte en de kortste trajectlengte. Lee en Ueng (1998) stelden in hun onderzoek vast dat wanneer chauffeurs hun rijschema's met elkaar vergelijken en ongelijkheden zien, zij ontevreden zullen zijn doordat ze zich benadeeld voelen. Aangezien deze chauffeurs cruciaal zijn voor een bedrijf, is de tevredenheid van de chauffeurs belangrijk. Daarom wordt de bijkomende doelstelling het balanceren van de route opgenomen.

Verder hebben Zhenyu et al. (2003) het handelsreizigersprobleem met meerdere doelstellingen onderzocht of ook wel het '*multi-objective traveling salesman problem (MOTSP)*' genoemd. Een handelsreiziger bezoekt een aantal steden en keert daarna naar zijn woonplaats terug. De bedoeling van de verkoper is de totale afstand die hij moet afleggen te minimaliseren. Hij moet zijn route (tour) langs de steden zo bepalen dat de lengte van de tour zo klein mogelijk is. Bij reële problemen zijn er meerdere soorten kosten die in rekening gebracht moet worden. Bijvoorbeeld als de reisroutes bepaald worden, wordt niet alleen de totale afstand in tijd geminimaliseerd maar ook de kost van het reizen. Dit is een probleem met twee doelstellingen maar optimalisatieproblemen met meer dan twee doelstellingen komen ook voor.

Ten slotte zijn er nog enkele rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen die andere doelstellingen hebben dan de klassieke optimaliseringsproblemen. Murata en Itai (2005) definiëren een rittenplanningsprobleem met twee doelstellingen waarin ze zowel het aantal voertuigen minimaliseren als de maximale routetijd van deze voertuigen (makespan) trachten te minimaliseren.

3.2 Veralgemenen

Een andere manier om een optimaliseringsprobleem met meerdere doelstellingen te gebruiken, is het veralgemenen van het probleem door doelstellingen toe te voegen in plaats van een of meerdere beperkingen.

Ombuki et al. (2006) zijn een van de auteurs in de literatuur die deze strategie toepassen op het rittenplanningsprobleem met tijdsvensters. De beperking van de tijdsvensters wordt vervangen door een of meerdere doelstellingen.

Feillet et al. (2005) beschrijven het handelsreizigersprobleem met winsten (*traveling salesman problems with profits, TSPP*), een veralgemening van het handelsreizigersprobleem. Een winst wordt geassocieerd met elke klant maar niet elke klant moet bediend worden. Klanten worden geselecteerd op basis van de winstwaarde. Handelsreizigersproblemen met winsten worden gezien als optimalisatieproblemen met twee tegengestelde doelstellingen; de ene dwingt de handelsreiziger om te reizen en dus winsten te verzamelen, de andere zet de handelsreiziger aan tot het minimaliseren van de reiskosten. Wanneer één voertuig is betrokken in het optimaliseringsprobleem spreken we van een handelsreizigersprobleem met winsten. Meer algemene problemen met een vloot bestaande uit meerdere voertuigen worden rittenplanningsproblemen met winsten genoemd.

3.3 Reële case

Rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen worden ook bestudeerd in specifieke reële gevalsstudies. Tan et al. (2006) onderzochten een transportprobleem bestaande uit het verplaatsen van lege en volle containers voor een logistiek bedrijf in Singapore. Als gevolg van een gelimiteerde capaciteit aan voertuigen van zowel vrachtwagens als aanhangwagens, besteedt de organisatie vaak orders uit aan onderaannemers. Ingenieurs in het bedrijf moeten dagelijks beslissen welke orders de interne vloot behandelt en welke uitbesteed worden. Dit transportprobleem is gebaseerd op het '*vehicle capacity planning systeem*' (VCPS), oorspronkelijk bestudeerd door Lee et al. (2003). Het algemene model van VCPS veronderstelt dat het transport naar verschillende plaatsen voltooid kan worden in meerdere tochten. Elke tocht bestaat uit een specifieke bron en bestemming, gedefinieerd door een start- en eindtijd. De vloot heeft een beperkte capaciteit. De doelstelling is het minimaliseren van het aantal voertuigen en het minimaliseren van de kostfunctie gebaseerd op de tochten die de voertuigen zonder vracht afleggen én de idling time van de vrachtwagen (de tijd dat de vrachtwagen stilstaat).

Tan et al. (2006) presenteren een oplossing voor het '*trucks and trailers vehicle routing problem*' (TTVRP). Dit model is een uitbreiding van het VCPS-model. In TTVRP zijn de aanhangwagens (trailers) bronnen met een zekere beperking en de toewijzing van de trailers aan verschillende locaties kan invloed hebben op de rittenplanning. Het aantal voertuigen in de vloot bepaalt het maximale aantal orders die intern bediend kunnen worden binnen een bepaalde tijdsperiode. De orders kunnen ook uitbesteed worden. Het doel van dit model is het minimaliseren van de reisafstand en het aantal voertuigen. Verder zijn er een aantal beperkingen zoals tijdvensters en de beschikbaarheid van trailers.

Een ander voorbeeld van een gevalsstudie in de literatuur wordt beschreven door Lacomme et al. (2003). Afval moet worden opgehaald in de stad Troyes (Frankrijk) en afgeleverd worden aan een afvalverwerkingsbedrijf. Het model dat gebruikt wordt, is het '*capacited arc routing problem*' (CARP). De klassieke CARP definieert slechts één doelstelling nl. het minimaliseren van de duur van de routes. In het voorbeeld van de afvalophaling is het management echter ook geïnteresseerd in het minimaliseren van de lengte van de langste route.

3.4 Oplossingsmethoden

Verskillende technieken zijn voorgesteld om rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen op te lossen. Deze strategieën kunnen onderverdeeld worden in drie algemene categorieën: Pareto methoden, scalaire methoden en de methoden die noch tot de eerste noch tot de tweede categorie behoren. Pareto methoden passen het begrip van Pareto dominantie toe om de kwaliteit van een oplossing te evalueren of om oplossingen te vergelijken. Scalaire methoden gebruiken wiskundige transformaties zoals gewogen lineaire aggregatie. De laatste categorie bevat technieken om de verschillende doelstellingen apart te beschouwen. (Jozefowicz et al., 2008)

3.4.1 Pareto methoden

Bij de optimalisatie van meerdere doelfuncties wensen we een reeks van waarden voor de beslissingsvariabelen te vinden die een reeks van doelfuncties optimaliseert. Het algemene optimalisatieprobleem met meerdere doelstellingen kan als volgt geformuleerd worden (Li, 2005):

$$\text{Optimaliseer } f(x) = \begin{cases} f_1(x) = z_1 \\ f_2(x) = z_2 \\ \dots \\ f_k(x) = z_k \end{cases} = z \in Z$$

Onderworpen aan de beperkingen: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$

Waarbij

x	de beslissingsvector of de oplossing
$X \in \mathfrak{R}^n$	n-dimensionale beslissingsruimte bestaande uit een eindige set van toelaatbare oplossingen
k	het aantal doelstellingen

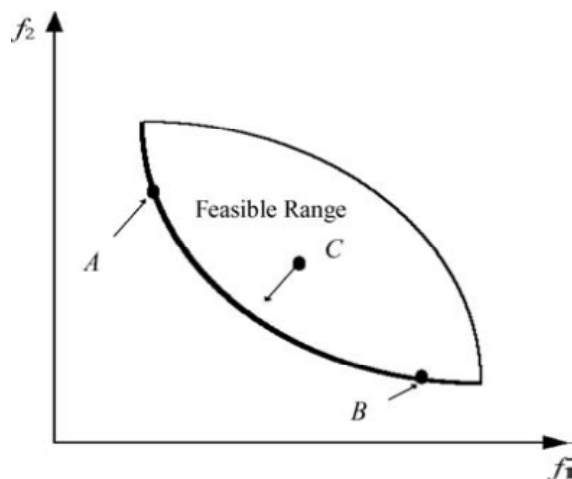
Een "single-objective" probleem wordt typisch bestudeerd in de beslissingsruimte. Het "multi-objective" probleem, afgekort MOP, wordt daarentegen meestal bestudeerd in de ruimte van de doelfunctie. Het beeld van een oplossing in de ruimte van de doelfunctie is een punt, $z = [z_1, z_2, \dots, z_k]$. Een punt, z , is bereikbaar indien er een oplossing $x \in X$ bestaat zodat $z = f(x)$. De reeks van alle bereikbare punten wordt aangeduid als Z . De ideale doelstelling vector z^* wordt gedefinieerd als $z^* = [opt(f_1(x), opt(f_2(x), \dots, opt(f_k(x))]$, die wordt verkregen door elke doelfunctie individueel te optimaliseren. Normaal gezien is een ideale doelstelling vector niet bereikbaar omdat de doelstellingen in strijd zijn met elkaar. Daarom zal één optimale oplossing niet bestaan voor het rittenplanningsprobleem. In plaats daarvan moeten we kijken naar een afweging van de doelstellingen bij het optimaliseren van een MOP. (Li, 2005)

Vectoren bestaande uit doelstellingen worden vergeleken aan de hand van het concept Pareto-optimaliteit en de dominante relatie. Een oplossing $x^a \in X$ domineert een oplossing $x^b \in X$ als x^a beter of gelijk is in alle doelfuncties en ten minste beter is in één doelfunctie. Mathematisch wordt het concept van Pareto optimaliteit als volgt geformuleerd: veronderstel een minimalisatieprobleem en twee beslissingsvectoren; $x^a, x^b \in X$, dan wordt gezegd dat x^a , x^b domineert als en slechts als

$$\begin{aligned} \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} : f_i(x^a) &\leq f_i(x^b) \quad \wedge \\ \exists j \in \{1, 2, \dots, k\} : f_j(x^a) &< f_j(x^b) \end{aligned}$$

De oplossing x^a wordt indifferent (onverschillig) genoemd tot oplossing x^b , als geen van beide de andere domineert. Wanneer geen prioriteit gedefinieerd is onder de doelstellingen, is dominantie de enige manier om te bepalen of een oplossing beter presteert dan een andere. De oplossingen in de Pareto-optimale set worden ook wel niet-dominerend genoemd, gekenmerkt door het feit dat startend van een oplossing binnen de set, een doelstelling enkel verbeterd kan worden ten koste van ten minste een andere doelstelling die dan verslechtert. De kromme gevormd door het samenbrengen van de Pareto-optimale oplossingen is gekend als het Pareto-optimale front. Het doel van het oplossen van een MOP is het vinden van een Pareto-optimale set voor de beslissingnemer om de meest wenselijke oplossing te kiezen. Een oplossing van de beslissingnemer vertegenwoordigt steeds een compromis tussen de verschillende doelstellingen. (Li, 2005)

Figuur 3.1 toont een algemeen Pareto dominantie diagram met drie oplossingspunten. Stel f_1 en f_2 zijn functies die twee doelstellingen minimaliseren in het rittenplanningsprobleem, een oplossing is Pareto-optimaal als, bij de verschuiving van punt A tot punt B in de set, elke verbetering in een van de doelfuncties een verslechtering veroorzaakt in ten minste een van de andere doelfuncties. Het punt C in deze figuur is geen Pareto-optimale oplossing. (Tan et al., 2006)



Figuur 3. 1 Een Pareto dominantie diagram met drie oplossingspunten

Veel auteurs hebben gebruik gemaakt van evolutionaire algoritmen met Pareto methoden om problemen met meerdere doelstellingen op te lossen. Een evolutionair algoritme gebruikt mechanismen geïnspireerd door de natuurlijke evolutie: reproductie, mutatie, hercombinatie en selectie. Kandidaatoplossingen van een optimalisatieprobleem spelen de rol van individuen in de populatie. Een opsomming van de verschillende auteurs is terug te vinden in Jozefowicz et al. (2008).

3.4.2 Scalaire methoden

Zoals hierboven aangegeven is de *gewogen lineaire aggregatie* de populairste scalaire methode. Bij deze methode worden gewichten gegeven aan iedere doelfunctie. Indien ze allemaal even belangrijk zijn, krijgen ze hetzelfde gewicht toegewezen. Wanneer een doelfunctie belangrijker is, krijgt deze een zwaarder gewicht. Ondanks dat deze methode populair is, heeft deze methode verschillende nadelen. Ten eerste moeten de gewichten ingesteld worden op basis van de belangrijkheid van de doelfuncties, wat een moeilijke taak kan zijn. Daarnaast is deze methode niet in staat om alle Pareto optimale oplossingen te vinden. (Jozefowicz et al., 2008)

Gewogen lineaire aggregatie wordt gebruikt in rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen samen met specifieke heuristieken, lokale zoekalgoritmes en genetische algoritmes. Een uitgebreid overzicht gerelateerd aan meerdere doelstellingen is terug te vinden in Jozefowicz et al. (2008).

Een andere scalaire methode gebruikt "*goal programming*" methoden. In deze benadering wordt een doel (d.w.z. een punt in de ruimte van de doelfunctie) gekozen en daarna wordt een zoektocht uitgevoerd om de afstand tussen de huidige oplossing en het doel te minimaliseren. De grootste moeilijkheid bij deze methode is het definiëren van het doel. (Jozefowicz et al., 2008)

De laatste scalaire benadering volgens Jozefowicz et al. (2008) is de *ϵ -beperking methode*. In deze strategie wordt enkel één doelstelling geoptimaliseerd en worden de anderen behandeld als beperkingen. De nieuwe doelstelling wordt gezien als een extra beperking en het probleem is dus vergelijkbaar met het originele 'single-objective' rittenplanningsprobleem. Het kan dus opgelost worden gebruikmakend van onder andere branch-and-cut algoritmen.

3.4.3 Niet-scalaire en niet-Pareto methoden

In sommige studies worden noch scalaire noch Pareto methoden gebruikt om rittenplanningsproblemen met meerdere doelstellingen op te lossen. In dat geval worden methoden gebruikt op basis van lexicografische strategieën, genetische algoritmen, mierenkolonie mechanismen ('ant colony') of specifieke heuristieken. (Jozefowicz et al., 2008)

Bij lexicografische methoden wordt aan iedere doelfunctie een prioriteitswaarde toegewezen. Dit wordt ook wel de hiërarchische benadering genoemd. De problemen worden opgelost volgens dalende prioriteit. Wanneer een doelstelling geoptimaliseerd is, kan zijn waarde niet meer veranderen en wordt het een nieuwe beperking voor het probleem. (Jozefowicz et al., 2008)

Genetische algoritmen zijn populatiegebaseerde evolutionaire algoritmen. Een Vector Evaluated Genetic algoritme (VEGA) is voorgesteld door Schaffer (1985) en is het eerste genetische algoritme om problemen met meerdere doelstellingen op te lossen. In VEGA wordt de populatie bij iedere iteratie verdeeld in n subpopulaties, waar n het aantal doelfuncties is. Op de kleine populatie worden vervolgens genetische bewerkingen toegepast.

Ant colony mechanismen (zie sectie 2.6.3) zijn gebaseerd op het gedrag van mieren. Wanneer mieren voedsel verzamelen, laten zij een feromoon achter op hun route zodat andere mieren ook weten waar het voedsel zich bevindt. Chitty en Hernandez (2004) gebruiken het mierenkoloniesysteem om een situatie met twee doelstellingen op te lossen. Ze maken gebruik van twee types feromonen, een voor de totale gemiddelde doorvoertijd en een voor de variantie van de doorvoertijd.

Hoofdstuk 4: Rittenplanningsproblemen met milieudoelstellingen

Er is een uitgebreide literatuur gerelateerd aan rittenplanningsproblemen. In het algemeen minimaliseren deze problemen een bepaalde kost maar luchtvervuilingskosten worden daarbij niet in rekening gebracht en worden dan ook zelden gereflecteerd in rittenplanningsoplossingen. Enkele onderzoekers hebben manieren ontwikkeld om deze milieuaspecten in rekening te brengen bij het formuleren van rittenplanningsproblemen.

In een eerste soort rittenplanningsproblemen met milieudoelstellingen wordt de kostenfunctie aangepast zodat milieuaspecten opgenomen kunnen worden. Bij deze rittenplanningsproblemen wordt gefocust op het energiegebruik of het brandstofverbruik. Een tweede soort modellen gebruikt een vloot van voertuigen met alternatieve brandstoffen. Ten slotte hebben een aantal onderzoekers methodes ontwikkeld voor het oplossen van rittenplanningsproblemen waar emissies geoptimaliseerd worden.

Onderzoek toont aan dat koolstofdioxide (CO_2) het voornaamste broeikasgas is in transport. Dit broeikasgas wordt proportioneel met het brandstofverbruik uitgestoten, met een variatie volgens het type brandstof. Het brandstofverbruik en de verhouding van CO_2 per gereisde kilometer daalt als de snelheid stijgt tot ongeveer 90km/u of 105km/u en dan begint het terug te stijgen. Vandaar dat de relatie tussen emissiegraden en reissnelheid niet lineair is. Verder heeft congestie of filevorming een grote impact op de uitstoot van emissies en de brandstofefficiëntie. Het regelmatig veranderen van de snelheid d.w.z. stoppen en vertrekken, doen de emissiegraden stijgen omdat het brandstofverbruik niet alleen een functie is van snelheid maar ook van de versnellingsgraad. (Figliozzi, 2010)

Palmer (2007) heeft een computergebaseerd rittenplanningsmodel ontwikkeld zodat rekening gehouden wordt met CO_2 -emissies tijdens het leveren van boodschappen. Dit model heeft de mogelijkheid om de emissies te minimaliseren of het berekenen van de emissies voor optimalisaties van tijd of afstand. Palmer (2007) vond reducties in emissies van 4,8% wanneer emissies geoptimaliseerd werden in plaats van tijd. Wanneer emissies geoptimaliseerd werden in plaats van afstand, werd een reductie in emissies van 1,2% gevonden. Het model concentreert zich op het bepalen van emissies op basis van snelheid en voertuigprestatie en bepaalt de snelheid op basis van congestie.

In dit hoofdstuk worden vervolgens de verschillende rittenplanningsmodellen met milieudoelstellingen besproken volgens de volgende indeling: modellen waarbij de kostenfunctie gebaseerd is op de lading, modellen met alternatieve brandstoffen en modellen die emissies in rekening brengen.

4.1 Kostenfunctie gebaseerd op lading

In een eerste soort rittenplanningsproblemen met milieudoelstellingen wordt de kostenfunctie aangepast zodat rekening gehouden wordt met de lading van het voertuig. Twee modellen worden besproken, namelijk het energy-minimizing VRP en het fuel consumption rate considered CVRP. In het eerste model van Kara et al. (2007) wordt de kostenfunctie aangepast zodat het totale energiegebruik geminimaliseerd wordt. De kost is hier afhankelijk van de lading van het voertuig en de afstand. In het tweede model voegen de auteurs Xiao et al. (2011) een graad van brandstofconsumptie toe aan het klassieke CVRP met als doel het minimaliseren van de brandstofconsumptie.

4.1.1 Energy-minimizing vehicle routing problem

De reële kost van het reizen met een voertuig tussen twee punten is afhankelijk van verschillende variabelen: de lading van het voertuig, het brandstofverbruik per kilometer, de brandstofprijs, de waardevermindering van de banden en het voertuig, het onderhoud, de lonen van de bestuurders, de tijd besteed aan het bezoeken van alle klanten, etc. De meeste eigenschappen zijn gebaseerd op tijd of afstand en kunnen benaderd worden door de afstand. Andere variabelen kunnen echter niet worden voorgesteld door de afstand tussen de punten of bevatten reiskosten die niet als constante gezien kunnen worden. Voorbeelden hiervan zijn de voertuiglading, het brandstofverbruik per kilometer en de brandstofprijs. De voertuiglading is immers op iedere boog (i,j) anders aangezien de lading daalt wanneer goederen geleverd worden en stijgt wanneer goederen opgehaald worden. Het brandstofverbruik is afhankelijk van de lading en is dus ook niet constant voor de route maar afhankelijk van een bepaalde boog. De meeste van deze variabelen kunnen dus weergegeven worden als functie van de overeenkomstige boog. Kara et al. (2007) nemen naast de afstand ook de lading van het voertuig op als bijkomende variabele. Ze stellen een nieuwe kostenfunctie voor die een product is van de gereisde afstand en het gewicht van het voertuig op die boog.

Deze nieuwe kostenfunctie van Kara et al. (2007) focust voornamelijk op het totale energieverbruik van voertuigen. Het model wordt het 'Energy Minimizing VRP, afgekort EMVRP, genoemd. Het minimaliseren van de totale arbeid staat gelijk aan het minimaliseren van de verbruikte energie (in termen van brandstofverbruik). Uiteraard is het gewicht van het voertuig gelijk aan het gewicht van het lege voertuig (Tare) plus de vracht van het voertuig. Dus indien de arbeid van elk voertuig geminimaliseerd wordt, of de gebruikte energie geminimaliseerd wordt, dienen kosten als volgt te worden gedefinieerd:

$$\begin{aligned} \text{Kost van } (i,j) &= [\text{Lading van het voertuig over } (i,j) + \text{gewicht onbeladen voertuig}] \\ &\quad * \text{afstand van } (i,j) \end{aligned} \tag{16}$$

Dus voor een CVRP waar brandstofprijzen belangrijk zijn, zal het opnemen van de lading van het voertuig een realistischere reiskost geven van de ene klant naar de andere. Wanneer de kost gedefinieerd wordt zoals hierboven (16) in een CVRP, spreken we van een Energy Minimizing Vehicle Routing Problem (EMVRP).

In het CVRP verzamelen en/of leveren voertuigen de goederen van of naar elke klant op de route. De lading van het voertuig verandert dus gedurende de tour. In het geval van de ophaling neemt de lading toe en in het andere geval, de levering, neemt de lading af. Omwille van deze reden moet voorzichtig gekeken worden naar beide situaties bij het formuleren van het probleem.

Het EMVRP wordt gedefinieerd als het probleem van het construeren van voertuigroutes zodat elk knooppunt exact door één voertuig bediend wordt, elke route start en eindigt in het depot, bij het ophalen de lading op de bogen toeneemt en afneemt bij levering, de lading van de voertuigen overschrijdt de capaciteit Q niet en de doelstelling is het vinden van een reeks van m voertuigroutes aan minimum totale kosten, in dit geval de minimum totale energie.

Tabel 4. 1: Symbolen en definities in het wiskundig model van EMVRP

Symbol	Verklaring
d_{ij}	De afstand van knooppunt i tot knooppunt j
q_i	Het niet-negatieve gewicht (vb vraag of aanbod) van knooppunt i
M	Het aantal identieke voertuigen
Q_0	Het gewicht van een onbeladen voertuig
Q	De capaciteit van een voertuig
Beslissingsvariabelen	
x_{ij}	Binaire variabele gelijk aan 1 als het voertuig van knooppunt i naar j reist, anders nul
y_{ij}	Het gewicht van het voertuig als het van i naar j gaat, indien anders nul

Wanneer de afstandenmatrix symmetrisch is ($d_{ij} = d_{ji}$), geeft Kara et al. (2007) volgende modelformulering van het EMVRP:

$$\text{Minimaliseer } \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} y_{ij} \quad (17)$$

Onderworpen aan de beperkingen:

$$\sum_{i=1}^n x_{0i} = m \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0} = m \quad (19)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ij} - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ji} = q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

$$y_{0i} = Q_0 x_{0i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

$$y_{ij} \leq (Q + Q_0 - q_j) x_{ij}, \quad (i, j) \in A \quad (24)$$

$$y_{ij} \geq (Q_0 + q_j) x_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A \quad (25)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ of } 1, \quad (i, j) \in A \quad (26)$$

De doelfunctie (17) minimaliseert de kost van het reizen op boog (i, j) . Deze kost is het product van de afstand tussen knooppunt i en j en het gewicht op deze boog. Beperkingen (18) en (19) zorgen ervoor dat m voertuigen gebruikt worden. Beperking (20) en (21) zorgen dat elk knooppunt exact één keer bezocht wordt en dat er zowel een in- en uitstroom is bij elk knooppunt. Beperking (22) zorgt voor het balanceren van de instroom en uitstroom van ieder knooppunt en verbiedt ook elke illegale subtour. Beperking (23) initieert de stroom op de eerste boog van iedere route. Beperking (24) neemt de capaciteitsbeperking voor zijn rekening en dwingt y_{ij} tot nul wanneer de boog (i, j) op geen enkele route ligt. Beperking (25) produceert de lage grenzen voor de stroom op elke boog. Beperking (26) definieert de variabelen als binair.

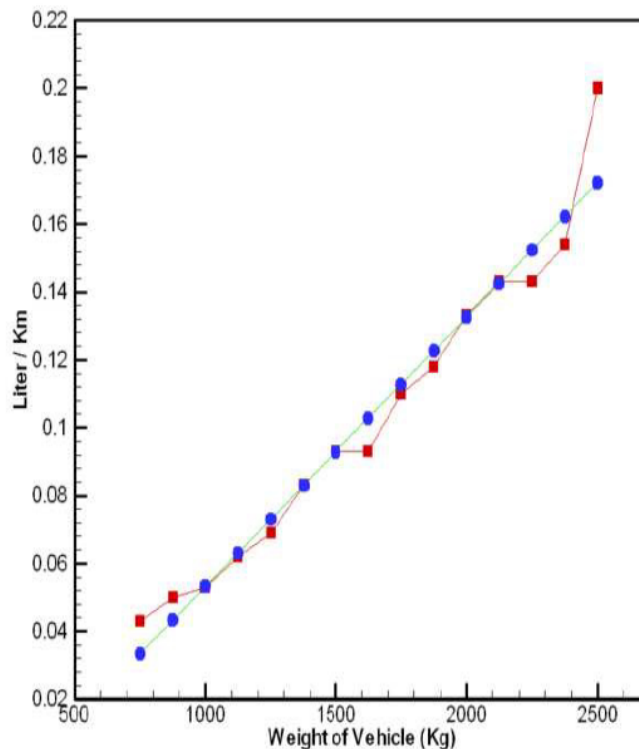
In het experiment van Kara et al. (2007) worden twee scenario's vergeleken, om het effect van de nieuwe doelfunctie op de optimale routes te testen. Scenario 1 bestaat uit het EMVRP (minimaliseren van de energie) en scenario 2 is het klassieke CVRP (minimaliseren van de afstand zonder rekening te houden met de lading van het voertuig). Het resultaat van dit specifiek experiment demonstreert dat een aanzienlijk verschil bestaat tussen energieminimaliserende en afstandminimaliserende oplossingen. De kost van de route die de totale afstand minimaliseert is 13% minder dan de oplossing die energie minimaliseert. In tegenstelling met wat we intuïtief zouden denken, stijgt het energieverbruik wanneer de totale afstand daalt in dit experiment. De route met de kortste afstand is dus niet noodzakelijk de optimale route voor het minimaliseren van de energie.

4.1.2 Fuel consumption rate considered CVRP

Gebaseerd op de overweging van afstand en de lading van het voertuig bestaat nog een studie die op een gelijkaardige manier zoals Kara et al. (2007) VRP's opgelost. Xiao et al. (2011) voegen een graad van brandstofconsumptie toe aan het klassieke CVRP met als doel het minimaliseren van de brandstofconsumptie.

De kosten van het reizen met een voertuig zijn afhankelijk van verschillende factoren. Deze kunnen in twee groepen verdeeld worden. Factoren behorende tot de eerste groep bevatten afstand, lading, snelheid, wegcondities, de graad van brandstofconsumptie (Fuel consumption rate, afgekort FCR, de brandstofconsumptie per eenheid afstand), etc. hebben een directe relatie met het reisschema. De factoren van de tweede groep hebben geen directe relatie met het reisschema zoals waardevermindering van de banden en het voertuig, onderhoud, lonen van bestuurders, etc.. In dit onderzoek worden zowel de gereisde afstand als de lading beschouwd als factoren die impact hebben op de brandstofkosten. Het probleem hier wordt het 'fuel consumption rate considered CVRP' genoemd, afgekort FCVRP.

Eerst wordt in het onderzoek van Xiao et al. (2011) een formulering gegeven van de FCR gebaseerd op statistische data. De blauwe lijn in figuur 4.1 geeft de algemene relatie tussen het FCR en het gewicht van het voertuig weer. De rode lijn is de originele FCR terwijl de blauwe lijn verkregen wordt door lineaire regressie.



Figuur 4. 1: Relatie FCR en gewicht van het voertuig bron Xiao et al. (2011)

Bij de formulering van de relatie wordt het gewicht van het voertuig opgesplitst in twee delen: het gewicht van het onbeladen voertuig Q_0 en het gedragen belading Q_1 . De formulering van het FCR als lineaire functie afhankelijk van lading Q_1 is bij benadering gelijk aan:

$$\rho(Q_1) = \alpha * (Q_0 + Q_1) + b \quad (27)$$

Definieer de capaciteit van het voertuig als Q , de volgeladen FCR als ρ^* en de niet-geladen FCR als ρ_0 . Uit formulering (27) volgt dat $\rho_0 = \alpha Q_0 + b$, $\rho^* = \alpha(Q_0 + Q) + b$ en $\alpha = \frac{\rho^* - \rho_0}{Q}$.

Zodat $\rho(Q_1)$ herschreven kan worden als:

$$\rho(Q_1) = \rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} Q_1 \quad (28)$$

Vergelijking (28) bepaalt dat een lineaire relatie kan gevonden worden tussen FCR en de belading van het voertuig en dat de belading van het voertuig even belangrijk is tot de gereisde afstand in het minimaliseren van de brandstofkost.

Voor elke boog (i,j) in de route, waar knooppunt j het volgende punt is wat het voertuig bedient nadat hij punt i verlaten heeft, kan de brandstofkost van i tot j uitgedrukt worden als:

$$C_{fuel}^{ij} = c_0 \rho_{ij} d_{ij} \quad (29)$$

waar c_0 de eenheidskost van brandstof is, d_{ij} de afstand van i tot j en ρ_{ij} de FCR van i tot j .

Indien r aangeduid wordt als de reeks van klanten op de route, dan is de brandstofkost van een voertuig:

$$C_{fuel} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r C_{fuel}^{ij} x_{ij} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r c_0 \rho_{ij} d_{ij} x_{ij} \quad (30)$$

waar x_{ij} gelijk is aan één wanneer boog $\{i,j\}$ bestaat en anders nul. Indien y_{ij} het gewicht is van de gedragen lading door een voertuig van punt i tot punt j , dan leidt dit volgens formule (28) tot:

$$\rho_{ij} = \rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} y_{ij} = \rho_0 + \alpha y_{ij}, \quad i, j + 1, \dots, r \quad (31)$$

Het FCVRP wordt gedefinieerd als het probleem van het construeren van voertuigroutes in veronderstelling dat er n klanten zijn met een vraag D_i , $i = 1, \dots, n$, een depot aangeduid als 0 en m homogene voertuigen met gelimiteerde capaciteit. Elk voertuig vertrekt en keert terug naar het depot na het bedienen van alle klanten. De vaste kost en de capaciteit van elke voertuig zijn F en Q , respectievelijk. In volgende tabel 4.2 worden de variabelen weergegeven die gebruikt worden in de modelformulering, dezelfde als in Kara et al. (2007):

Tabel 4. 2: Symbolen en definities in het wiskundig model van FCVRP

Symbool	Verklaring
d_{ij}	De afstand van knooppunt i tot knooppunt j
c_0	Eenheidskost van brandstof
ρ_{ij}	Consumptiegraad van brandstof op de route van i naar j
ρ_0	Consumptiegraad van brandstof als de lading nul is
M	Het aantal identieke voertuigen
F	De vaste kost van een voertuig
Q	De capaciteit van een voertuig
Beslissingsvariabelen	
x_{ij}	Binaire variabele gelijk aan 1 als het voertuig van knooppunt i naar j reist, anders nul
y_{ij}	Het gewicht van het voertuig als het van i naar j gaat, indien anders nul

Het FCVRP optimalisatiemodel kan als volgt gedefinieerd worden:

$$\text{Minimaliseer } H = \sum_{j=1}^n F \cdot x_{0j} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_0 d_{ij} (\rho_0 x_{ij} + \alpha y_{ij}) \quad (32)$$

Onderworpen aan de beperkingen:

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, i = 1, \dots, n \quad (33)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} - \sum_{j=0}^n x_{ji} = 0, i = 0, \dots, n \quad (34)$$

$$\sum_{j=0}^n y_{ji} - \sum_{j=0}^n y_{ij} = D_i, i = 1, \dots, n \quad (35)$$

$$y_{ij} \leq Q x_{ij}, i, j = 0, \dots, n \quad (36)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, i, j = 1, \dots, n \quad (37)$$

De eerste term in de doelfunctie (32) is de som van de vaste kosten van de voertuigen en de tweede term is de som van alle brandstofkosten van alle voertuigen. Beperking (33) zorgt ervoor dat elke klant bediend wordt en enkel bezocht wordt door één voertuig. Beperking (34) duidt aan dat elk voertuig dat aankomt op een punt ook op dat punt moet vertrekken. Beperking (35) geeft de gereduceerde lading aan van een voertuig na het bezoeken van een klant, deze verbiedt ook elke illegale subtour. Beperking (36) limiteert de maximaal gedragen lading en dwingen y_{ij} tot nul wanneer x_{ij} gelijk is aan nul. Beperking (37) definieert de variabelen als integer en binair.

Na het uitvoeren van experimenten besluiten Xiao et al. (2011) dat de kortste afstand niet altijd de optimale oplossing geeft wanneer het doel het verlagen van de brandstofconsumptie is, aangezien niet alleen de afstand maar ook de FCR (beïnvloedt door de lading van het voertuig) een bijdrage heeft tot de totale brandstofconsumptie. De resultaten van het experiment tonen aan dat het FCVRP model het brandstofverbruik met gemiddeld 5% kan verminderen ten opzichte van het CVRP model.

Zowel het EMVRP van Kara et al. (2007) als het FCVRP van Xiao et al. (2011) houden rekening met de lading en zijn gebaseerd op het CVRP. In het eerste model wordt de energie geminimaliseerd en in het tweede model het brandstofverbruik. Het FCVRP geeft in vergelijking met het EMVRP een gedetailleerdere formulering van het brandstofverbruik. De auteurs van het FCVRP ontwikkelden ook een probleemspecifiek algoritme.

4.2 Modellen met alternatieve brandstoffen

In de Verenigde Staten draagt de transportsector voor 28% bij aan de uitstoot van broeikasgassen (EPA US, 2009). Dit komt vooral doordat de energie van het transport uit petroleum-gebaseerde brandstoffen komt. Organisaties voegen voertuigen met alternatieve brandstoffen (Alternative Fuel Vehicles, afgekort AFVs) aan hun vloot toe om enerzijds de milieu-impact te verminderen en anderzijds om aan de nieuwe milieuvorschriften te voldoen. Deze organisaties overwegen een aantal factoren in de selectie van een bijzonder voertuigtype zoals de brandstofbeschikbaarheid, de geografische verdeling van de brandstofstations, het bereik dat het voertuig kan reizen, de brandstofkost,... Het gebrek aan infrastructuur om deze AFV's bij te tanken of te herladen is een obstakel voor de overgang naar deze voertuigen. De volgende twee onderzoeken van Erdođan en Miller-Hooks (2011) en Schneider et al. (2012) geven aandacht aan de bijkomende uitdagingen geassocieerd met een vloot van AFV's. (Erdođan & Miller-Hooks, 2011; Schneider et al., 2012)

4.2.1 Green vehicle routing problem

Erdođan en Miller-Hooks (2011) formuleren een 'Green Vehicle Routing Problem', afgekort G-VRP. Organisaties met vloten voertuigen met alternatieve brandstoffen kunnen op deze manier geholpen worden om hun moeilijkheden inzake gelimiteerde reisafstand in combinatie met gelimiteerde tankstations te overwinnen.

Het G-VRP wordt in het onderzoek van Erdođan en Miller-Hooks (2011) geïllustreerd aan de hand van een eenvoudig voorbeeld. Dit voorbeeld bevat één voertuig met een capaciteit van de brandstoftank van $Q = 50$ gallons (= 189,27 liter) en een brandstofverbruik van $r = 0,2$ gallon per mijl (of 5 mijl per gallon = 18,92 liter per 1,609344 km). Drie stations met alternatieve brandstof (alternative fuel system, afgekort AFS) zijn beschikbaar in de regio. Het voertuig start zijn tour in het depot D en moet klanten $C1$ tot $C6$ bedienen vooraleer hij terugkeert naar het depot. Om deze klanten te bezoeken moet een minimale afstand van 339 mijl afgelegd worden. Het reizen van de afstand van 339 mijl verbruikt 67,8 gallon. Dit is 17,8 gallon meer dan de capaciteit van de brandstoftank van het voertuig. Het voertuig dient dus op zijn minst één AFS te bezoeken om zo alle klanten te bedienen en terug te keren naar depot D . Het G-VRP houdt rekening met de capaciteit van de brandstoftank van het voertuig en kiest de optimale plaatsing van de bezoeken aan de AFS in de tour.

Enkele assumpties worden gemaakt alvorens het model te formuleren. Het depot kan gebruikt worden als tankstation en alle stations hebben een ongelimiteerde capaciteit. De reissnelheid is constant over een link. Er wordt geen limiet gezet op het aantal stops dat gemaakt kan worden om te tanken. Wanneer de tankbeurt wordt uitgevoerd, wordt verondersteld dat de tank tot de maximale capaciteit gevuld wordt. In volgende tabel 4.3 worden de variabelen weergegeven die gebruikt worden in de modelformulering:

Tabel 4. 3: Symbolen en definities in het wiskundig model van G-VRP

Symbool	Verklaring
d_{ij}	De afstand van knooppunt i tot knooppunt j
m	Het aantal identieke voertuigen
v_0	Depot
I	Reeks van klanten
I_0	Reeks van klanten en het depot, $I_0 = I \cup \{v_0\}$
F	Reeks van AFS hoekpunten
F'	Reeks van bezoeken, dummy hoekpunten gecreëerd van F
F_0	Reeks van bezoeken en het depot, $F_0 = F' \cup \{v_0\}$
V	Reeks van reële hoekpunten, $V = \{v_0\} \cup I \cup F$
V'	Reeks van hoekpunten, ook de dummy hoekpunten $V = \{v_0\} \cup I \cup F'$
Q	Brandstofcapaciteit van voertuig
r	Graad van brandstofverbruik van voertuig
T_{max}	Maximale duur van elke route
p_i	Bedieningstijd aan knooppunt i
t_{ij}	Reistijd tussen knooppunt i en j
Beslissingsvariabelen	
x_{ij}	Binaire variabele gelijk aan 1 als het voertuig van knooppunt i naar j reist, anders nul
y_j	Variabele die het overblijvende brandstofniveau specificeert wanneer knooppunt j bereikt is, wordt op Q gezet bij elk AFS bezoek en depot
τ_j	Variabele die de tijd van aankomst bij knooppunt j specificeert voor de start van de bediening

$$\text{Minimaliseer } \sum_{\substack{i,j \in V' \\ i \neq j}} d_{ij} x_{ij} \quad (38)$$

Onderworpen aan de beperkingen

$$\sum_{\substack{j \in V' \\ j \neq i}} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (39)$$

$$\sum_{\substack{j \in V' \\ j \neq i}} x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in F_0 \quad (40)$$

$$\sum_{\substack{i \in V' \\ j \neq i}} x_{ji} - \sum_{\substack{i \in V' \\ j \neq i}} x_{ij} = 0, \quad \forall j \in V' \quad (41)$$

$$\sum_{j \in V' \setminus \{0\}} x_{0j} \leq m \quad (42)$$

$$\sum_{j \in V' \setminus \{0\}} x_{j0} \leq m \quad (43)$$

$$\tau_j \geq \tau_i + (t_{ij} - p_j)x_{ij} - T_{max}(1 - x_{ij}), i \in V', \forall j \in V' \setminus \{0\} \text{ and } i \neq j \quad (44)$$

$$0 \leq \tau_0 \leq T_{max} \quad (45)$$

$$t_{0j} \leq \tau_j \leq T_{max} - (t_{j0} + p_j), \forall j \in V' \setminus \{0\} \quad (46)$$

$$y_j \leq y_i - r \cdot d_{ij} x_{ij} + Q(1 - x_{ij}), \forall j \in I \text{ and } i \in V', i \neq j \quad (47)$$

$$y_j = Q, \forall j \in F_0 \quad (48)$$

$$y_j \geq \min\{r \cdot d_{j0}, r \cdot (d_{jl} + d_{l0})\}, \forall j \in I, \forall l \in F' \quad (49)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\}, \forall i, j \quad (50)$$

De doelstelling (38) minimaliseert de totale gereisde afstand door de AFV vloot. Beperking (39) zorgt dat iedere klant exact één opvolger heeft: een klant, een AFS of een depot. Deze zorgt dus voor de connectiviteit. Beperking (40) garandeert dat ieder AFS ten minste één opvolger heeft. Beperking (41) zorgt ervoor dat wanneer een voertuig aankomt bij een klant, ook vertrekt bij die klant. Beperking (42) definieert dat maximum m voertuigen starten aan het depot en beperking (43) dat maximum m voertuigen eindigen bij het depot. De aankomsttijd van elk voertuig wordt gemodelleerd door beperking (44). Beperkingen (44), (45) en (46) zorgen dat iedere voertuig terugkeert naar het depot niet later dan T_{max} . Beperking (45) specificeert een vertrektijd vanuit het depot van nul ($\tau_0 = 0$) en een bovengrens van de aankomsttijden voor het terugkeren naar het depot. Boven-en ondergrensen voor aankomsttijden bij de klanten en de AFS worden gegeven in beperking (46). Beperking (47) houdt het brandstofniveau van het voertuig bij. Beperking (48) zet het brandstofniveau op capaciteit Q bij aankomst in het depot of in een AFS. Beperking (49) garandeert dat er genoeg overblijvende brandstof is om direct terug te keren naar het depot of via een AFS. Deze beperking zorgt dat een voertuig niet zonder brandstof komt te zitten. De beslissingsvariabelen en hun domein wordt gedefinieerd in beperking (50).

Het G-VRP is een speciaal gevalstudie van het VRP en aangezien het rittenplanningsprobleem NP-hard is, is het G-VRP ook NP-hard. Het is dus moeilijk om een exacte oplossing te verkrijgen. De auteurs van het G-VRP stellen daarom twee heuristieken voor. De eerste heuristiek, Modified Clarke and Wright Savings algoritme (MCWS) creëert oplossingen door het samenvoegen van toelaatbare routes op basis van besparingen en het verwijderen van overbodige AFS's. De tweede heuristiek, een Density-Based Clustering algoritme (DBCA) clustert eerst klanten en bepaalt dan de route. In de numerieke experimenten wordt de kwaliteit van de voorgestelde heuristieken vergeleken met exacte oplossingsmethoden. Deze twee technieken geven een reeks van voertuigroutes die de totale gereisde afstand minimaliseert om een reeks van klanten te bedienen. In de rittenplanning worden haltes bij AFS's ingebouwd om zo het risico om zonder brandstof te vallen te elimineren.

De numerieke experimenten tonen aan dat de voorgestelde technieken een goede prestatie leveren vergeleken met de exacte oplossingsmethoden. Ze kunnen bijgevolg gebruikt worden om grote probleeminstanties op te lossen. De mogelijkheid tot het formuleren van het G-VRP samen met deze oplossingstechnieken, zullen organisaties helpen in het overwinnen van hun moeilijkheden die bestaan als resultaat van gelimiteerde tankstations.

4.2.2 Electric vehicle routing problem

Door nieuwe wetten en voorschriften betreffende de emissies van broeikasgassen beginnen transportbedrijven elektrische voertuigen op batterijen (Battery Electric Vehicles, afgekort BEVs) in hun vloot te introduceren. De gelimiteerde capaciteit van de batterij maakt het noodzakelijk om herlaadstations te bezoeken tijdens de bedieningstour. Schneider et al. (2012) introduceren het elektrische rittenplanningsprobleem met tijdsvensters en oplaadstations, afgekort E-VRPTW. Dit model bevat de mogelijkheid om het voertuig op te laden in elk van de beschikbare stations gebruikmakend van een geschikt oplaadschema. Het E-VRPTW heeft als doel het minimaliseren van het aantal voertuigen en de totale gereisde afstand.

Enkele assumpties worden gemaakt alvorens het model te formuleren. Elke gereisde boog consumeert een hoeveelheid $r \cdot d_{ij}$ van de overblijvende batterijlading. Bij het depot is een reeks van homogene voertuigen gepositioneerd met een maximale capaciteit C . Elke knooppunt $i \in V_{0,n+1}$ heeft een positieve vraag q_i en heeft een tijdsvenster $[e_i, l_i]$ en alle klanten $j \in I$ hebben een geassocieerde bedieningstijd s_j . Aan een oplaadstation wordt het verschil tussen het huidige ladingsniveau en de batterijcapaciteit Q opgeladen aan een herlaadgraad g , oftewel de herlaadtijd afhankelijk van het brandstofniveau van het voertuig bij aankomst aan het respectievelijke station.

De doelfunctie van het E-VRPTW is hiërarchisch (zie sectie 3.4.3). De eerste doelfunctie is het minimaliseren van het aantal voertuigen. In dit geval is een oplossing met minder voertuigen altijd superieur. De tweede doelfunctie is het minimaliseren van de totale gereisde afstand. In volgende tabel 4.4 worden de variabelen weergegeven die gebruikt worden in de modelformulering:

Tabel 4. 4: Symbolen en definities in het wiskundig model van E-VRPTW

Symbool	Verklaring
v_0	Depot
d_{ij}	De afstand van knooppunt i tot knooppunt j
M	Het aantal identieke voertuigen
I	Reeks van klanten
I_0	Reeks van klanten en het depot, $I_0 = I \cup \{v_0\}$
F	Reeks van AFS knooppunten
F'	Reeks van bezoeken, dummy knooppunten gecreëerd van F
F_0	Reeks van bezoeken en het depot, $F_0 = F' \cup \{v_0\}$
V	Reeks van reële knooppunten, $V = \{v_0\} \cup I \cup F$
V'	Reeks van hoekpunten, ook de dummy knooppunten $V = \{v_0\} \cup I \cup F'$
Q	Brandstofcapaciteit van voertuig
C	Maximale capaciteit van voertuig
R	Graad van brandstofverbruik van voertuig
s_j	Bedieningstijd bij klant j
$[e_i, l_i]$	Tijdsvenster klant i
u_j	De overblijvende cargo
q_i	Vraag klant i
T_{max}	Maximale duur van elke route
t_{ij}	Reistijd tussen knooppunt i en j
Beslissingsvariabelen	
x_{ij}	Binaire beslissingsvariabele gelijk aan 1 als het voertuig van knooppunt i naar j reist, anders nul
y_j	Beslissingsvariabele die overblijvende brandstofniveau specificeert wanneer knooppunt j bereikt is.
τ_j	Beslissingsvariabele die de tijd van aankomst bij knooppunt j specificeert voor de start van de bediening

Het mathematische model van E-VRPTW is geformuleerd als een mixed-integer programma:

$$\text{Minimaliseer } \sum_{\substack{i \in V_0, j \in V_{n+1} \\ i \neq j}} d_{ij}x_{ij} \quad (51)$$

Onderworpen aan de beperkingen

$$\sum_{\substack{j \in V_{n+1} \\ i \neq j}} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (52)$$

$$\sum_{\substack{j \in V' \\ j \neq i}} x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in F' \quad (53)$$

$$\sum_{\substack{i \in V' \\ j \neq i}} x_{ji} - \sum_{\substack{i \in V' \\ j \neq i}} x_{ij} = 0, \quad \forall j \in V' \quad (54)$$

$$\tau_i + (t_{ij} + s_i)x_{ij} - l_0(1 - x_{ij}) \leq \tau_j, \quad \forall i \in I_0, \forall j \in V_{n+1} \text{ and } i \neq j \quad (55)$$

$$\tau_i + (t_{ij})x_{ij} + g(Q - y_i) - (l_0 + gQ)(1 - x_{ij}) \leq \tau_j, \quad \forall i \in F', \forall j \in V_{n+1} \text{ and } i \neq j \quad (56)$$

$$e_j \leq \tau_j \leq l_j \quad \forall j \in V_{0,n+1} \quad (57)$$

$$0 \leq u_j \leq u_i - q_i x_{ij} + C(1 - x_{ij}), \forall i \in V_0, \forall j \in V_{n+1} \text{ and } i \neq j \quad (58)$$

$$0 \leq u_0 \leq C \quad (59)$$

$$0 \leq y_i \leq y_i - r \cdot d_{ij}x_{ij} + Q(1 - x_{ij}), \forall j \in V_{n+1} \text{ and } \forall i \in I, i \neq j \quad (60)$$

$$0 \leq y_i \leq Q - r \cdot d_{ij}x_{ij}, \quad \forall j \in V_{n+1} \text{ and } \forall i \in F'_0, i \neq j \quad (61)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\}, \forall i \in V_0, j \in V_{n+1}, i \neq j \quad (62)$$

De doelfunctie wordt gedefinieerd in (51). Beperking (52) zorgt voor de connectiviteit van de klanten en (53) behandelt de connectiviteit van de bezoeken aan het herlaadstation. Beperking (54) garandeert dat de instroom gelijk is aan de uitstroom dus dat als een voertuig aankomt bij een klant, ook moet vertrekken bij die klant. Beperking (55) staat in voor de uitvoerbaarheid van de tijd voor bogen die de klanten en het depot verlaten. Beperking (56) doet hetzelfde voor bogen die de oplaadbezoeken verlaten. Beperking (57) zorgt dat ieder knooppunt bezocht wordt binnen het tijdsvenster. Beperking (55) - (57) voorkomen dat subtours gevormd worden. Beperking (58) en (59) garanderen dat aan de vraag van de klant voldaan wordt. Ten slotte zorgen beperking (60) en (61) dat de batterijlading nooit onder nul valt. Beperking (62) definieert de beslissingsvariabele x_{ij} als integer en binair.

Het G-VRP model van Erdoğan en Miller-Hooks (2011) (zie sectie 4.2.1) combineert een rittenplanningsprobleem met de mogelijkheid om een voertuig te laten tanken in een station langs de route. Deze voertuigen worden vooral aangedreven door biodiesel, vloeibare aardgas of aardgas onder druk. Voor deze brandstoffen bestaat enkel een gelimiteerde tankinfrastructuur maar worden de tijden van het tanken als vast beschouwd. Het E-VRPTW daarentegen kan de herlaadtijden voor de voertuigen op elektrische batterijen niet als vast beschouwen. De herlaadtijd hangt immers af van de huidige batterijlading van het voertuig wanneer hij aankomt in het herlaadstation.

4.3 Modellen die emissies opnemen

In de vorige secties werd aandacht besteed aan het milieu tijdens de rittenplanning om zo de uitstoot van de broeikasgassen te reduceren. De emissieuitstoot werd echter nooit berekend in deze modellen. In de volgende modellen worden de emissies effectief berekend en opgenomen in de rittenplanning.

4.3.1 Emissions minimization vehicle routing problem

Figliozi (2010) focust in zijn onderzoek niet op het minimaliseren van het aantal voertuigen en de gereisde afstand maar op het minimaliseren van emissies en brandstofverbruik als primaire of secundaire doelstelling. Dit model noemt "emissions minimalization vehicle routing problem", afgekort EVRP waar emissies expliciet opgenomen worden in de kostenminimalisatie van een traditioneel rittenplanningsprobleem met tijdsvensters. De emissies worden direct gerelateerd aan de reissnelheid in dit model. Het EVRP van Figliozi heeft zowel tijdvensters en capaciteitsbeperkingen als tijdsafhankelijke reistijden. Om het probleem minder complex te maken, is het model statisch. De bediener wordt verondersteld de impact te kennen van de periodieke congestie op de reissnelheid dit wil zeggen ochtend- en avondspits.

Het probleem van Figliozi wordt op twee verschillende manieren geformuleerd. De eerste formulering veronderstelt een functie met meerdere doelstellingen die de kosten van de voertuigen, de gereisde afstand, afgelegde tijd en emissies bevat. Deze formulering wordt via gewogen lineaire aggregatie opgesteld (zie 3.4.2). Iedere kostenfunctie krijgt een gewicht toegewezen, in dit geval is iedere doelfunctie even belangrijk en krijgen ze hetzelfde gewicht namelijk coëfficiënt 1. De kostenfuncties worden opgeteld zodat één functie overblijft. De tweede formulering volgt een traditionele hiërarchische benadering met meerdere doelstellingen (zie 3.4.3). De formulering gebeurt door prioriteiten te geven aan de verschillende doelfuncties. De primaire doelfunctie wordt eerst geoptimaliseerd vooraleer over te gaan naar de secundaire.

De doelfunctie minimaliseert de totale kost die bestaat uit de kost van het voertuig, de kost van de afstand, de kost van de routeduur en de kost van de uitstoot van emissies. De benaderingen van de emissiekosten worden in deze paragraaf toegelicht.

Emissiekosten zijn proportioneel aan de hoeveelheid broeikasgassen die uitgestoten worden en zijn een functie van de reissnelheid en gereisde afstand. Dit veronderstelt een marktwaarde voor een ton CO₂. Deze benadering heeft echter beperkingen aangezien het moeilijk te schatten is welke sociale- en milieukosten zijn, cfr. sectie 5.1.2 de kost van CO₂.

Om de terugkerende congestie-impacten op te nemen, wordt de werktijd van het depot $[e_0, l_0]$ verdeeld in M tijdperiodes $T = T^1, T^2, \dots, T^M$. Elke periode T^m heeft een geassocieerde constante reissnelheid $0 \leq s^m$ in het tijdsinterval $T^m = [\underline{t}^m, \overline{t}^m]$.

Voor elke vertrektijd b_i en elke paar van klanten i en j , reist een voertuig aan een niet-lege verzameling van snelheidsintervallen $S_{ij}(b_i) = \{s_{ij}^m(b_i), s_{ij}^{m+1}(b_i), \dots, s_{ij}^{m+p}(b_i)\}$ waar $s_{ij}^m(b_i)$ de snelheid geeft op het vertrektijdstip, $s_{ij}^{m+p}(b_i)$ de snelheid geeft op het aankomsttijdstip en $p+1$ het aantal tijdsintervallen geeft. De vertrektijd aan snelheid $s_{ij}^m(b_i)$ vindt plaats in periode T^m , de aankomsttijd aan snelheid $s_{ij}^{m+p}(b_i)$ vindt plaats in periode T^{m+p} , en $1 \leq m \leq m+p \leq M$.

Omwillen van een eenvoudige notatie zal de vertrektijd worden weggelaten, ook al zijn snelheidsintervallen en afstandintervallen een functie van de vertrektijd b_i . De overeenkomstige reeks van gereisde afstanden en tijden in elke tijdsperiode zijn respectievelijk aangeduid als $D_{ij}(b_i) = \{d_{ij}^m, d_{ij}^{m+1}, \dots, d_{ij}^{m+p}\}$ en $T_{ij}(b_i) = \{t_{ij}^m, t_{ij}^{m+1}, \dots, t_{ij}^{m+p}\}$.

Voor zware voertuigen, heeft het Transport Research Laboratory een functie ontwikkeld die emissies en reissnelheid aan elkaar koppelt:

$$\alpha_0 + \alpha_1 s_{ij}^l + \alpha_2 (s_{ij}^l)^3 + \alpha_3 \frac{1}{(s_{ij}^l)^2} d_{ij}^l \quad (63)$$

De coëfficiënten $\{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\} = \{1,576; -17,6; 0,00117; 36,067\}$ zijn constante parameters voor elke voertuigtype. De optimale reissnelheid die de emissies minimaliseert, wordt verondersteld de snelheid s^* te zijn, wat voor uitdrukking (63) $s^* = 71 \text{ km/u}$ is. Uitdrukking (63) geeft de CO_2 - emissies in kg/km wanneer de snelheid uitgedrukt is in km/u . Als congestie stijgt, stijgt de hoeveelheid en kost van emissies dramatisch. Het volume van emissies gegenereerd door het reizen van klant i naar klant j en vertrekkend op tijdstip b_i wordt genoteerd als:

$$v_{ij}(b_i) = \sum_{l=0}^{l=p} (\alpha_0 + \alpha_1 s_{ij}^l + \alpha_2 (s_{ij}^l)^3 + \alpha_3 \frac{1}{(s_{ij}^l)^2} d_{ij}^l) \quad (64)$$

De totale emissiekosten voor een vertrektijd b_i is het product $c_e v_{ij}(b_i)$. Uitdrukking (64) geeft een eenvoudige maar goede benadering voor de reële CO_2 emissies versus de profielen van de reissnelheid. Nu een uitdrukking voor het volume van de uitgestoten emissies gedefinieerd is, kan het probleem EVRP geformuleerd worden.

Tabel 4. 5: Symbolen en definities in het wiskundig model van EVRP

Symbool	Verklaring
a_i	Aankomsttijd van een voertuig bij klant i , $i \in C$
b_i	Vertrektijd van een voertuig bij klant i , $i \in C$
$b_i = y_i^k + g_i$	Vertrektijd is starttijd bediening klant plus bedieningstijd
q_i	Vraag geassocieerd aan klant i
g_i	Bedieningstijd van klant i
$[e_i, l_i]$	Bedieningstijdvenster
$g_0 = 0 \ \& \ q_0 = 0$	Bedieningstijd en de geassocieerde vraag is nul in het depot
n	Aantal klanten
d_{ij}	Afstand tussen klant i en klant j
$t_{ij}(b_i)$	Reistijd tussen klant i en j in functie van de vertrektijd van klant i
K	Set van beschikbare voertuigen
c_t	Kost per eenheid van de routeduur
c_d	kost per eenheid gereisde afstand
c_e	Kost per eenheid van gegenereerde emissies
c_k	Kost per voertuig
v_{ij}	Het volume emissies gegenereerd tussen klant i en j
Beslissingsvariabelen	
x_{ij}^k	Binaire variabele die aanduidt of voertuig k reist tussen klant i en j
y_j^k	Variabele die de starttijd aanduidt als klant i bediend wordt door voertuig k
s_{ij}^l	Reissnelheid tussen klant i en j in tijdsperiode l

De beslissingsvariabele y_i^k laat toe dat er gewacht wordt bij klant i . De bedieningstijd moet niet noodzakelijke dezelfde zijn als de aankomsttijd: $a_i + g_i \leq b_i = \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} (y_i^k + g_i) x_{ij}^k$.

De reissnelheid s_{ij}^l is ook een beslissingsvariabele omdat de hoeveelheid emissies een functie is van de reissnelheid, zie definitie (64).

De eerste formulering wordt via **gewogen lineaire aggregatie** opgesteld (zie 3.4.3):

Minimaliseer

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in C} c_k x_{0j}^k + c_d \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in V} d_{ij} x_{ij}^k + c_t \sum_{k \in K} \sum_{j \in C} (y_{n+1}^k - y_0^k) x_{0j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in V} x_{ij}^k c_e v_{ij} (y_i^k + g_i) \quad (65)$$

Onderworpen aan de beperkingen:

$$\sum_{i \in C} q_i \sum_{j \in V} x_{ij}^k \leq q_{max}, \quad \forall k \in K \quad (66)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in C} x_{ij}^k = 1, \quad \forall i \in C \quad (67)$$

$$\sum_{i \in V} x_{il}^k - \sum_{i \in V} x_{ij}^k = 0, \quad \forall l \in C, \forall k \in K \quad (68)$$

$$x_{i0}^k = 0, \quad x_{n+1,i}^k = 0, \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (69)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^k, \quad \forall k \in K \quad (70)$$

$$\sum_{j \in V} x_{j,n+1}^k = 1, \quad \forall k \in K \quad (71)$$

$$e_i \sum_{j \in V} x_{ij}^k \leq y_i^k, \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (72)$$

$$l_i \sum_{j \in V} x_{ij}^k \geq y_i^k, \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (73)$$

$$x_{i,j}^k (y_i^k + g_i + t_{i,j}(y_i^k + g_i)) \leq y_j^k, \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (74)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (75)$$

$$y_i^k \in \mathbb{R}, \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (76)$$

De doelfunctie (65) bestaat uit vier componenten. De laatste component minimaliseert de emissiekosten. In het model van Figliozzi (2010) wordt vervolgens gebruik gemaakt van 11 beperkingen. Beperking (66) zorgt dat de voertuigcapaciteit niet overschreden kan worden en beperking (67) dat alle klanten bediend worden. Beperking (68) garandeert dat als een voertuig aankomt bij een klant, het ook moet vertrekken die klant. Beperking (69) zorgt dat alle routes starten en eindigen bij het depot. Beperking (70) en (71) definiëren dat elk voertuig exact één keer vertrekt van het depot en terugkeert naar het depot. Beperking (72) en (73) garanderen dat de bedieningstijden voldoen aan de starttijden van het tijdsvenster en aan de eindtijden. Beperking (74) zorgt dat de bedieningstarttijd de reistijd tussen de klanten moet toestaan. Ten slotte worden de beslissingsvariabelen en hun domein gedefinieerd in beperking (75) en (76).

De tweede formulering volgt een **traditionele hiërarchische benadering** met meerdere doelstellingen (zie 3.4.3). Hier worden de kosten in drie doelfuncties opgesplitst. Deze benadering laat een gedeeltelijke vermindering van de potentiële emissies toe. De tweede doelfunctie minimaliseert de kosten van emissies. De derde doelfunctie minimaliseert de gereisde afstand en de kosten van de reistijd.

$$\text{Minimaliseer } \sum_{k \in K} \sum_{j \in C} x_{oj}^k$$

$$\text{Minimaliseer } \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in V} x_{ij}^k c_e v_{ij} (y_i^k + g_i)$$

$$\text{Minimaliseer } c_d \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in V} d_{ij} x_{ij}^k + c_t \sum_{k \in K} \sum_{j \in C} (y_{n+1}^k - y_0^k) x_{0j}^k$$

Dezelfde beperkingen (66)-(76) zijn van toepassing op deze formulering.

Het experiment is gebaseerd op de klassieke gevallen van het VRP met tijdsvensters voorgesteld door Solomon (1988) (zie 2.8: oplossingsmethoden VRPTW). De problemen worden opgesplitst in drie categorieën: geen congestie, een beetje congestie, congestie. De resultaten geven aan dat de emissie-uitstoot significant kan dalen indien men rekening houdt met de emissies tijdens de rittenplanning. In gebieden met congestie is het mogelijk om met een minimale of zonder stijging van de kosten de emissies te laten dalen. Echter de impact van congestie op het niveau van de emissies is niet uniform. De karakteristieken van de route blijken een significant effect te hebben op de emissieniveaus.

4.3.2 Gis-based EVRPTW

Wygonik en Goodschild (2010) ontwikkelden een model in ArcGIS om de afweging tussen kosten, servicekwaliteit en emissies te evalueren. De mate waaraan voldaan wordt aan de harde tijdsvensters bepaalt de kwaliteit van de service.

ArcGIS software laat het oplossen van rittenplanningsproblemen toe. Deze software bevat een volledig routenetwerk met data van adressen en de kostenfuncties van de verschillende linken. Het onderzoek van Wygonik en Goodschild (2010) breidt het ArcGIS VRP systeem uit om emissies in rekening te brengen wanneer het probleem bestaat uit haltes van minder dan een uur. Gebaseerd op de EPA standaarden (Environmental Protection Agency van V.S.) zal een motor met een katalytische convertor na een uur overgaan van een warme toestand naar een koude toestand en zijn berekeningen vereist voor de warme en koude emissies bij het opstarten. Aangezien deze berekeningen verder gaan dan de limieten van het systeem, wordt in het onderzoek enkel rekening gehouden met haltes van maximum een uur. ArcGIS wordt gebruikt om emissies te minimaliseren en de afweging tussen emissies, kost en servicekwaliteit te bepalen voor een specifieke gevalstudie. Deze gevalstudie bestaande uit een reële vloot wordt gemodelleerd als een emissions minimization vehicle routing problem met tijdsvensters (EVRPTW).

De data in het onderzoek van Wygonik en Goodchild (2010) wordt hieronder gespecificeerd in termen van vloot, kosten, emissiefactoren, netwerk en klanten. De organisatie die instaat voor de bediening heeft een homogene vloot van 17 voertuigen in termen van capaciteit en motortechnologie. Klanten zijn gelokaliseerd in een verstedelijkt gebied en worden bediend door een magazijn, ook gelegen in dit gebied. Loon- en operationele kosten worden samengesteld door gebruik te maken van data uit de industrie omdat de actuele kosten bedrijfseigen zijn. Emissiefactoren worden verkregen door het 2010 MOVES model (Motor Vehicle Emission Simulator, United States, Environmental Protection Agency). Deze analyse veronderstelt condities zonder congestie. Aangezien de voertuigen werken met warme motoren door de korte stoptijden, worden enkel uitlaatemissies in rekening gebracht. Verder wordt het netwerk uit het 'ESRI Streetmap North America' gehaald en aangepast voor het onderzoek. Een steekproef van klanten van één dag wordt verzameld en weerspiegelt drie tijdvensters: vroege ochtend tussen 2u30 en 6u, ochtend tussen 7u en 13u en middag/avond tussen 15u en 21u.

Analyses van verschillende externe beleidsvormen en interne operationele veranderingen geven inzicht van de impact van deze veranderingen op de kost, servicekwaliteit en emissies. De externe beleidsvormen zijn voorschriften opgelegd door de wetgever. Bijvoorbeeld het opleggen van tijdsbeperkingen voor het leveren van goederen. Een ander scenario bestaat uit een evaluatie van een beleid rond groene voertuigen. Interne operationele veranderingen bestaan uit de invloed van tijdsvensters op de kost en de emissies, de invloed van het servicegebied (klantendensiteit) en de verandering van de voertuigvloot. Smallere tijdsvensters zijn gemakkelijker voor de klant en daarom geven ze een hogere servicekwaliteit weer. Groene voertuigen zullen geassocieerd worden met verminderde emissies maar een hogere kost. Grotere voertuigen verschaffen meer efficiënte service maar vereisen meer investeringen in kapitaal.

Het resultaat laat een stabiele relatie zien tussen de monetaire kost en de hoeveelheid CO₂ in kilogram, met elke kilogram van CO₂ wordt een kostenstijging van \$3,50 geassocieerd. Dit illustreert de invloed van brandstofgebruik op zowel de kost als de emissies. Daarnaast is de klantendensiteit en de lengte van de tijdsvensters sterk gecorreleerd met de monetaire kost en de kilogram van CO₂ per order. De toevoeging van 80 klanten of het uitbreiden van het tijdvenster met 100 minuten zou \$3,5 en 1 kilogram CO₂ besparen per order. Ten slotte laat de evaluatie van de vier verschillende vloten significant maatschappelijke en monetaire voordelen zien die bereikt kunnen worden door het gebruik van hybride voertuigen.

4.3.3 Tijdsafhankelijk rittenplanningsprobleem met tijdsvensters

In een volgend onderzoek van Figliozzi (2011) ligt de aandacht op de analyse van CO₂ emissies voor verschillende niveaus voor tijdskritieke klantenvraag gebruikmakend van congestiedata. Figliozzi maakt hiervoor gebruik van een tijdsafhankelijk rittenplanningsalgoritme, 'Time Dependent Vehicle Routing Problem', afgekort TDVRP.

Een rittenplanningsprobleem dat rekening houdt met links in het netwerk bestaande uit verschillende kosten of snelheden door de dag, is het 'Time Dependent Vehicle Routing Problem' (TDVRP). Dit model van Malandraki en Daskin (1992) wordt typisch gebruikt om de variërende verkeerscondities voor te stellen. Het TDVRP is als volgt gedefinieerd. Een vloot voertuigen met vaste capaciteit moet klanten met een vaste vraag bedienen vanuit een centraal depot. Klanten worden toegewezen aan de voertuigen en de routes van de voertuigen worden zo opgesteld dat de totale reistijd geminimaliseerd wordt. De reistijd tussen twee klanten of tussen een klant en het depot is afhankelijk van de afstand tussen de punten en van het tijdstip van de dag. In een stedelijk gebied met congestie is de reistijd tussen twee punten niet enkel afhankelijk van de gereisde afstand aangezien de snelheid niet constant is. Tijdsafhankelijke modellen zijn significant meer complex dan statische rittenplanningsmodellen.

De formulering van dit rittenplanningsprobleem is anders dan hier de vorige aangezien in dit onderzoek de reissnelheid niet geoptimaliseerd wordt om de emissies te reduceren. Hier worden beslissingsvariabelen geïntroduceerd om de restricties voor te stellen als gevolg van beleidsmaatregelen in verband met vrachtvervoer, congestie of tijdsvensters.

De gebruikte symbolen en definities zijn dezelfde als voor het EVRP, hierboven in tabel 4.5. In het traditionele rittenplanningsprobleem met tijdsvensters (VRPTW) wordt verondersteld dat het transportbedrijf als eerste doelstelling zijn aantal voertuigen wil minimaliseren en als tweede doelstelling zijn gereisde afstand wil minimaliseren zonder de tijdsvensters, de duur van de routes en de capaciteitsbeperkingen te schenden.

De primaire doelstelling wordt gedefinieerd door het minimaliseren van de vlootgrootte (1). De tweede doelstelling minimaliseert de gereisde afstand en kosten van de duur van de route (2).

Primaire doelstelling:

$$\text{Minimaliseer } \sum_{k \in K} \sum_{j \in C} x_{oj}^k \quad (1)$$

Secundaire doelstelling:

$$\text{Minimaliseer } c_d \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in V} d_{ij} x_{ij}^k \quad (2)$$

Onderworpen aan de beperkingen:

$$\sum_{i \in C} q_i \sum_{j \in V} x_{ij}^k \leq q_{max}, \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in C} x_{ij}^k = 1, \quad \forall i \in C \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{il}^k - \sum_{i \in V} x_{ij}^k = 0, \quad \forall l \in C, \forall k \in K \quad (4)$$

$$x_{i0}^k = 0, \quad x_{n+1,i}^k = 0, \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^k, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V} x_{j,n+1}^k = 1, \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$e_i \sum_{j \in V} x_{ij}^k \leq y_i^k, \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (8)$$

$$l_i \sum_{j \in V} x_{ij}^k \geq y_i^k, \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (9)$$

$$x_{i,j}^k (y_i^k + g_i + t_{i,j}(y_i^k + g_i)) \leq y_j^k, \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (10)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (11)$$

$$y_i^k \in \mathbb{R}, \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (12)$$

De beperkingen zijn op dezelfde wijze gedefinieerd als in het EVRP, zie sectie 4.3.1.

Figliozi (2011) onderzoekt dit tijdsafhankelijk rittenplanningsmodel met een gevalstudie in Portland. Het onderzoek stelt dat de reissnelheden tussen 6u 's morgens en 21u 's avonds een functie zijn van het tijdstip van de dag. In het basisscenario wordt verondersteld dat er geen congestie is en een constante snelheid van 65 mijl/u op autosnelwegen. Een primaire doel van dit onderzoek is de impact van congestie op de emissie te kwantificeren voor typische klantenbeperkingen. Er wordt verondersteld dat de levertijden tussen de normale werkuren liggen van 8u tot 16u. De verdeling van de klantenverzoeken gebeurt via een experimentele setting die gebaseerd is op de klassieke gevallen van het rittenplanningsprobleem met tijdsvensters voorgesteld door Solomon (1988) (cfr. sectie 2.6.2).

Het onderzoek focust op de analyse van CO₂- emissies voor verschillende niveaus van congestie en tijdsafhankelijke klantenverzoeken. Het resultaat toont aan dat de impact van congestie op voertuigemissies significant is maar moeilijk te voorspellen. In dit onderzoek van Figliozi (2011) wordt bijvoorbeeld aangetoond dat het mogelijk is om gevallen op te stellen waar de totale afstand of de duur van de route stijgt maar de emissies dalen. Vandaar dat het nodig is om de invloed van de snelheid zorgvuldig te bestuderen. Wanneer de reissnelheid verlaagd wordt tot een snelheid die "optimaal" is vanuit een emissieperspectief, dan kunnen emissies verlaagd worden zonder een significante stijging in vlootgrootte of gereisde afstand. Bijkomend heeft het gebruikte type doelfunctie (gebaseerd op afstand, tijd of emissie) invloed op de resultaten.

4.3.4 The pollution-routing problem

Bektaş en Laporte (2011) formuleren een uitbreiding van het klassieke rittenplanningsprobleem (VRP) met een bredere en meer omvattende doelfunctie. Hun doel is om een nieuwe variant van het rittenplanningsprobleem te introduceren, namelijk het 'pollution-routing problem', afgekort PRP, om de vervuiling in rekening te brengen. Deze doelfunctie houdt niet alleen rekening met de gereisde afstand maar ook met de hoeveelheid uitstoot van broeikasgassen, brandstof, reistijden en hun kosten. Het onderzoek toont een afweging tussen de verschillende parameters zoals vrachtlading, snelheid en totale kost en geeft inzichten over de baten van milieuvriendelijke rittenplanning.

Het probleem bestaat uit een homogene set van voertuigen $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, m\}$, elk met een capaciteit Q . De reeks $\mathcal{N}_0 = N \cup \{0\}$ is een klantenreeks en elke klant $i \in N$ heeft een vraag q_i en een verzoek om bediend te worden binnen een vooraf gespecificeerd tijdsinterval $[a_i, b_i]$. De tijd nodig door een voertuig om een klant te bedienen, is t_i en de afstand van i tot j wordt genoteerd als d_{ij} .

Ieder voertuig stoot een bepaalde hoeveelheid broeikasgassen uit wanneer hij reist over boog (i,j) . Deze hoeveelheid is afhankelijk van een aantal factoren zoals lading, snelheid,... Sommige van deze factoren zijn vast zoals bijvoorbeeld gravitatie en helling. De lading en de snelheidsvariabelen kunnen gecontroleerd worden. De lading van de vrachtwagen is of leeg of geladen. Voertuigen worden meestal geclassificeerd op basis van hun brutogewicht (Gross Vehicle Weight Rating, afgekort GVWR), gedefinieerd als het maximale toegelaten gewicht van een voertuig, lege massa, brandstof en gedragen lading inbegrepen. De lege massa van het voertuig maar met brandstof en vloeistoffen zoals motorolie wordt leeggewicht (curb weight) genoemd. Voertuigen worden gewoonlijk in acht categorieën onderverdeeld met voertuigen in de laagste klasse die een GVWR hebben van rond de drie ton, en deze in de zwaarste klasse hebben een GVWR rond de vijftien ton. Het onderzoek van Bektaş en Laporte (2011) onthulde dat de ratio van het leeggewicht tot het GVWR voor voertuigen in klasse 1, 2, 3 en 4 respectievelijk 42%, 57%, 48% en 51% bedroeg. Daarom concludeerde de auteurs dat voertuigen ongeveer evenveel lading als hun leeggewicht dragen.

De snelheid aan welke een voertuig reist over een boog (i,j) wordt beperkt door een lage grens en een hoge grens, genoteerd door l_{ij} en u_{ij} , gewoonlijk opgelegd door de verkeersregeling. Een eenheid uitgestoten broeikasgas (in gram) heeft een geschatte kost genoteerd door e . Deze kosten zijn moeilijk maar niet onmogelijk te bepalen.

Gebaseerd op bovenstaande definities worden vier problemen gedefinieerd door Bektaş en Laporte (2011). Elk probleem bestaat uit het zoeken van een reeks van ritten voor de set \mathfrak{R} voertuigen die starten en eindigen aan de depot zodat hun totale gedragen lading de capaciteit Q niet overschrijdt. De problemen verschillen van elkaar door hun doelfuncties waarbij sommigen zijn gerelateerd aan milieuaspecten. De doelfuncties zijn (i) een afstandminimaliserende doelfunctie in de veronderstelling van een constante snelheid (P_D), (ii) een gewogen ladingminimaliserende doelfunctie in de veronderstelling een van constante snelheid (P_L), (iii) een energieminimaliserende doelfunctie in de veronderstelling dat snelheid een endogene beslissingsvariabele is (P_E), (iv) een kostminimaliserende doelfunctie bestaande uit de kost van emissies, bestuurders en brandstof (P_C). In deze masterproef kijken we enkel naar de formulering van het laatste probleem aangezien dit het meest relevant is.

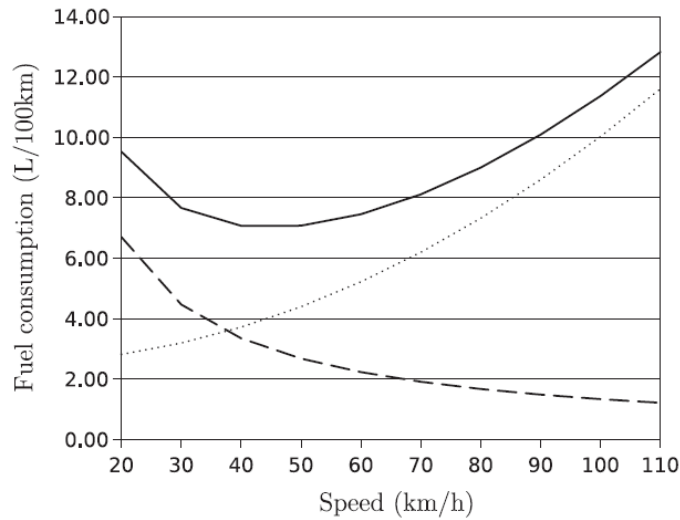
De doelfunctie minimaliseert de totale kost die bestaat uit de kost van emissies, operationele kosten en de kost van de bestuurders. De benaderingen van deze kosten worden in deze paragraaf toegelicht.

Voor het berekenen van de **kost van emissies** is het allereerst nodig om de emissiegraad voor een broeikas te bepalen. De emissiegraad E in gram per seconde (g/s) voor een broeikasgas (zoals CO_2 , HC of NO_x) is direct gerelateerd aan de graad van brandstofverbruik F (g/s) door de relatie $E = \delta_1 F + \delta_2$ waar δ_1 en δ_2 specifieke parameters zijn voor de emissies van broeikasgassen. De berekening van F is complex en is afhankelijk van verschillende factoren. Bektaş en Laporte (2011) werken met een vereenvoudiging voor hun berekening van F :

$$F \approx \left(kNV + \frac{P_t + P_a}{\varepsilon \eta} \right) U \quad (79)$$

Waar k de wrijvingscoëfficiënt is van de motor, N het toerental van de motor, V de cilinderinhoud, P_t de totale vraag naar trekkracht in Watt ($W = \text{kg m}^2/\text{s}^3$), ε efficiëntie van de aandrijflijn van het voertuig, P_a vraag naar motorvermogen geassocieerd met de lopende verliezen van de motor en bijkomende voertuigaccessoires zoals een airco, $\eta \approx 0,45$ een meeteenheid voor de efficiëntie van dieselmotoren en U een waarde afhankelijk van sommige constanten inclusief N .

De functie van emissies per eenheid gereisde afstand is typisch U-gevoerd en maakt het eenvoudig om de optimale snelheid te berekenen op het punt waar emissies geminimaliseerd worden. Dit gedrag van de functie wordt geïllustreerd in figuur 4.2 voor een licht voertuig. De functie bestaat uit twee componenten: kNV getoond door de stippellijn en de tweede component, vooral beïnvloed door P_t , getoond door de bolletjeslijn. Tot op een zeker niveau van snelheid, daalt de bijdrage van de eerste component (kNV) als de snelheid stijgt. De tweede component (P_t) stijgt wanneer de snelheid stijgt. Een optimale snelheid wordt bereikt op 40km/u, in de veronderstelling dat de andere parameters vast liggen op bepaalde waarden. De vorm van de emissiefunctie zoals in uitdrukking (79) is sterk afhankelijk van een aantal factoren zoals lading, weerstand en hellingsgraad.



Figuur 4. 2: Brandstofverbruik in functie van snelheid, zoals bepaald door functie (79) (Bektaş en Laporte (2011))

De bijdrage van de eerste component kNV zal enkel significant zijn voor lage snelheidsniveaus (minder dan 40km/u). Omwille van deze reden zal tijdens de ontwikkeling van het model rekening gehouden worden met snelheden van minstens 40km/u. Bijgevolg zal P_t beschouwd worden als de primaire component van de totale emissiefunctie.

Parameter P_t kan als volgt verder berekend worden:

$$P_t = (Mav + Mgv \sin \theta + 0,5C_d A \rho v^3 + MgC_r \cos \theta v) \quad (80)$$

waar M de massa (kg) is van het voertuig (leeg plus gedragen lading), v de snelheid (m/s), a de versnelling (m/s²), g is de gravitatieconstante (9,81m/s²), θ is de weghoek, A is het frontale oppervlaktevlak van het voertuig (m²), ρ is de luchtdensiteit (kg/m³), C_r en C_d zijn de coëfficiënten van de rolweerstand en de remweerstand.

Omwillen van praktische redenen worden alle parameters constant gehouden op een gegeven boog. Lading en snelheid kunnen veranderen van een boog naar een andere. Met andere woorden zal het voertuig reizen met een gemiddelde snelheid $v = v_{ij}$ op boog (i,j) met een afstand d_{ij} en weghoek $\theta = \theta_{ij}$. Het voertuig draagt een totale lading van $M = w + f_{ij}$ waar w het gewicht van het voertuig is en f_{ij} de gedragen lading op deze boog (i,j) . De totale hoeveel geconsumeerde energie op deze boog P_{ij} kan dan benaderd worden door:

$$P_{ij} \approx P_t \left(\frac{d_{ij}}{v_{ij}} \right) \approx x_{ij}(w + f_{ij})d_{ij} + \beta v_{ij}^2 d_{ij} \quad (81)$$

waar $x_{ij} = a + g \sin \theta_{ij} + gC_r \cos \theta_{ij}$ is een specifieke constante van de boog, $\beta = 0,5C_d A \rho$ is een voertuig specifieke constante.

De **operationele kost** op elke boog (i,j) doorkruist door een voertuig kan berekend worden als $c_f F_{ij}$, waar c_f de eenheidskost van brandstof is en F_{ij} is de brandstofconsumptie over de boog (i,j) , welke wordt geschat door gebruik te maken van P_{ij} .

De **kost van de bestuurders** wordt bepaald door de loonkost en de totale tijd. De bestuurder van het voertuig wordt betaald aan een loon van p per tijdseenheid (meestal per uur). De totale tijd s dat een bestuurder spendeert aan een tour is afhankelijk van het aantal en de locaties van de klanten in de tour. De totale hoeveelheid betaald aan de bestuurder kan uitgedrukt worden als ps .

Tabel 4. 6: Symbolen en definities in het wiskundig model van PRP

Symbol	Verklaring
Y_j	De tijd wanneer de bediening op knooppunt j start
d_{ij}	Afstand tussen klant i en klant j
W	Gewicht van leeg voertuig
B	Specifieke constante van het voertuig $\beta = 0,5C_dA\rho$
\bar{v}^r	Gemiddelde snelheid: $\bar{v}^r = (l^r + u^r)/2$
z_{ij}^r	Binaire variabele, 1 indien een voertuig reist aan snelheidsniveau $r \in \mathbb{R}$ op boog (i,j) ; anders nul
P	Eenheidskost loon bestuurders
s_j	Totale tijd die een bestuurder spendeert aan een tour
M	Aantal homogene voertuigen
Q	Capaciteit voertuig
q_i	Vraag geassocieerd aan klant i
a_i	Aankomsttijd van een voertuig bij klant i
b_i	Vertrektijd van een voertuig bij klant i
M_{ij}	$\text{Max}\{0, b_i + s_i + d_{ij}/l_{ij} - a_j\}$
L	Voldoende groot getal
t_j	Reistijd tussen klant i en j
e	Eenheidskost van emissie
c_f	Eenheidskost van brandstof
Beslissingsvariabelen	
x_{ij}	Binaire variabele die aangeeft of voertuig reist tussen klant i en j
f_{ij}	De hoeveelheid koopwaar (gedragen lading) dat stroomt
v_{ij}	De snelheid aan welke het voertuig reist op boog (i,j)

$$\begin{aligned} \text{Minimaliseer } & \sum_{(i,j) \in \mathfrak{S}} (c_f + e)x_{ij}d_{ij}wx_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathfrak{S}} (c_f + e)x_{ij}f_{ij}d_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathfrak{S}} (c_f + e)d_{ij}\beta \left(\sum_{r \in \mathfrak{R}} (\bar{v}^r)^2 z_{ij}^r \right) \\ & + \sum_{j \in \mathbb{N}} ps_j \quad (82) \end{aligned}$$

Onderworpen aan de beperkingen

$$\sum_{j \in \mathbb{N}} x_{0j} = m \quad (83)$$

$$\sum_{j \in \mathbb{N}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \mathbb{N}_0 \quad (84)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{N}} x_{ij} = m \quad \forall j \in \mathbb{N}_0 \quad (85)$$

$$\sum_{j \in \mathbb{N}} f_{ji} - \sum_{j \in \mathbb{N}} f_{ij} = q_i \quad \forall i \in \mathbb{N}_0 \quad (86)$$

$$q_j x_{ij} \leq f_{ij} \leq (Q - q_i)x_{ij} \quad \forall (i,j) \in \mathfrak{S} \quad (87)$$

$$y_i - y_j + t_i + \sum_{r \in \mathfrak{R}} \left(\frac{d_{ij}}{\bar{v}^r} \right) z_{ij}^r \leq M_{ij}(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in \mathbb{N}, j \in \mathbb{N}_0, i \neq j \quad (88)$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i \quad \forall i \in \mathbb{N}_0 \quad (89)$$

$$y_j + t_j - s_j + \sum_{r \in \mathfrak{R}} \left(\frac{d_{j0}}{\bar{v}^r} \right) z_{j0}^r \leq L(1 - x_{j0}), \quad \forall j \in \mathbb{N}_0 \quad (90)$$

$$\sum_{r \in \mathfrak{R}} z_{ij}^r = x_{ij} \quad \forall (i,j) \in \mathfrak{S} \quad (91)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in \mathfrak{S} \quad (92)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in \mathfrak{S} \quad (93)$$

$$z_{ij}^r \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in \mathfrak{S}, r \in \mathfrak{R} \quad (94)$$

De doelfunctie bestaat uit vier componenten. De eerste twee componenten meten de kost gemaakt door de gedragen lading van het voertuig. De derde component meet de kost door de variaties in de snelheid. Deze drie componenten vertalen direct de totale kost van brandstofconsumptie en de broeikasgasemissies berekend door de eenheidskost ($c_f + e$) vermenigvuldigd door de totale hoeveelheid van geconsumeerde brandstof over elke link (i,j) . De laatste component meet de totale hoeveelheid betaald aan de bestuurders.

Beperking (83) zorgt dat m homogene voertuigen vertrekken aan het depot. Beperking (84) en (85) garanderen dat iedere klant exact één keer bezocht wordt. Beperking (86) zorgt dat de uitstroom min de instroom gelijk is aan de vraag in dat knooppunt. De balans van de stroom wordt dus beschreven door beperking (86). Beperking (87) wordt gebruikt om de totale lading gedragen door het voertuig te beperken tot de capaciteit. Tijdvensters worden gegeven door beperking (88) en (89). De totale reistijd voor elke voertuig is afhankelijk van het laatste bezochte knooppunt in de overeenkomende tour (vb. een knooppunt j voor welke $x_{j0} = 1$). Aangezien knooppunt j bezocht wordt op het tijdstip y_j door een bestuurder bedraagt de totale nodige tijd voor de overeenkomende tour $y_j + t_j + d_{j0}/v_{j0}$. De totale tijd gependend op een route waar knooppunt j het laatste bezocht wordt alsvorens terug te keren naar het depot, wordt als volgt berekend: $s_j = (y_j + t_j + d_{j0}/v_{j0})x_{j0}$. Beperking (90) is een linearisatie van deze functie, gebruikt om de totale rijtijd van elk voertuig te berekenen.

In het illustratieve voorbeeld beschouwen Bektaş en Laporte (2011) een netwerk met vier knooppunten (een depot en drie klanten). Ze veronderstellen dat er één voertuig is met de volgende parameters: $C_d = 0,7$; $A = 5,0 \text{ m}^2$; het leeggewicht van het voertuig bedraagt $w = 3 \text{ ton}$, $a = 0$ en $\theta_{ij} = 0^\circ$ voor alle $i, j \in \{0,1,2,3\}$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ en $\rho = 1,2041 \text{ kg/m}^3$ (bij 20°C). Snelheidsbeperkingen worden gezet op $l = 40 \text{ km/u}$ en $u = 70 \text{ km/u}$. C_r ligt meestal tussen $0,010$ en $0,015$ voor de gemiddelde verharde wegen en in dit voorbeeld gebruiken ze $C_r = 0,01$.

De experimenten geven volgende conclusies: het minimaliseren van de emissies vertelt niet het gehele verhaal vanuit een kostenperspectief. Er zijn andere factoren die in rekening gebracht moeten worden zoals arbeidskosten en deze lijken de gehele kost te domineren. Gebaseerd op de huidige schattingen, lijkt de kost van de CO_2 -emissies niet zo belangrijk als de brandstof- of arbeidskost.

Tot slot van dit hoofdstuk volgt in de volgende sectie een overzichtstabel met de besproken modellen met milieudoelstellingen.

4.4 Overzicht modellen

In tabel 4.7 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste modellen die besproken zijn in dit hoofdstuk. De tabel geeft de auteurs weer en de naam van het model. Verder geeft de tabel een aanduiding in welke van de drie categorieën (lading, alternatieve brandstoffen of emissies) het model geplaatst kan worden. Vervolgens wordt de doelfunctie besproken: één doelstelling (single) of meerdere doelstellingen (multiple). In het geval van meerdere doelstellingen wordt aangegeven op welke manier de doelfuncties zijn opgesteld volgens de gewogen lineaire aggregatie methode (cfr. sectie 3.4.2) of volgens de hiërarchische methode (cfr. sectie 4.4.3). Bij de hiërarchische methode wordt aangeduid wat de primaire doelfunctie (1) is, de secundaire (2) en eventueel de tertiaire (3). Ten slotte wordt weergegeven wat de doelfunctie minimaliseert.

Tabel 4. 7: Overzicht modellen met milieudoelstellingen

Auteurs	Model	Gebaseerd op	Doelfunctie
Kara et al. (2007)	Energy Minimizing VRP	Lading	Single: min. afstand x lading
Xiao et al. (2011)	Fuel consumption rate considered CVRP	Lading	Multiple: gewogen lineaire aggregatie Min. vaste kost en min. kost brandstofconsumptie
Erdoğan en Miller-Hooks (2011)	Green VRP	Alternatieve brandstoffen	Single: min. totale afstand
Schneider et al. (2012)	Electric VRP	Alternatieve brandstoffen	Multiple: hiërarchisch (1) min. aantal voertuigen (2) min. totale afstand
Figliozzi (2010)	Emissions minimization VRP	Emissies	Multiple: gewogen lineaire aggregatie Min. kost van voertuig, kost gereisde afstand, kost routeduur en kost emissies
Figliozzi (2010)	Emissions minimization VRP	Emissies	Multiple: hiërarchisch (1) min. kost van voertuig (2) min. kost emissieskost (3) min. kost gereisde afstand en kost routeduur
Figliozzi (2011)	Tijdsafhankelijk rittenplanningsprobleem met tijdsvensters	Emissies	Multiple: hiërarchisch (1) min. vlootgrootte (2) min. gereisde afstand en kosten van routeduur
Bektaş en Laporte (2011)	Pollution-routing problem	Emissies	Multiple: gewogen lineaire aggregatie min. emissiekost, brandstofkost en kost van de bestuurder

Hoofdstuk 5: Praktijkstudie

In de praktijkstudie wordt in sectie 5.1 gekeken naar de invloed van het transport op het milieu door de polluenten van het wegtransport en de kost van de CO₂-emissie te bepalen. Verder wordt informatie gegeven over het bepalen van emissies in de praktijk. In sectie 5.2 van de praktijkstudie worden twee illustratieve voorbeelden toegepast op het model van Bektaş en Laporte (2011), het pollution-routing problem zoals beschreven in sectie 4.3.4

5.1 Transport en milieu

Het wegtransport veroorzaakt emissies die een belangrijke bron van luchtverontreiniging vormen. Deze luchtvervuiling bevordert het broeikaseffect, draagt bij tot de aftakeling van de ozonlaag en brengt schade aan de volksgezondheid en het leefmilieu. In de volgende secties wordt informatie gegeven over de verschillende polluenten, de kost van de belangrijkste polluent gerelateerd aan het wegtransport en het berekenen van emissies in de praktijk.

5.1.1 Polluenten

Hieronder volgt een overzicht van de belangrijkste polluenten die gebruikt worden om de vervuiling van het wegtransport te bepalen: (Duysinx, Germain, & Heyen, 2009)

- CO₂ (koolstofdioxide)
Koolstofdioxide draagt bij tot de opwarming van de aarde en is het belangrijkste bijproduct van verbranding van fossiele brandstoffen. De uitstoot van CO₂ neemt in dezelfde mate toe als het energiegebruik van een voertuig. Benzinevoertuigen stoten dus meer CO₂ uit dan dieselveertuigen. De enige manier om de uitstoot van CO₂ te reduceren, is door minder te rijden of zuinere voertuigen te gebruiken. In tegenstelling tot de uitstoot van andere verontreinigende stoffen (cfr. verder), zijn er nog geen bindende normen voor de hoeveelheid CO₂ uitstoot als gevolg van de werking van een voertuig.
- CO (koolstofmonoxide)
Koolstofmonoxide is een kleurloos, reukloos en giftig gas. Hoge CO concentraties zijn dodelijk. Lage concentraties veroorzaken ademhalingsproblemen. Dit gas ontstaat ondermeer door onvolledige verbranding van fossiele brandstoffen. Door het inbouwen van katalysatoren en betere motoren in voertuigen daalt de uitstoot van CO.

- **SO₂ (zwaveldioxide)**
Zwaveldioxide is een kleurloos gas met een irriterende smaak en geur. Bij inademing is dit gas irriterend en kan het bij hoge concentraties ademhalingsproblemen veroorzaken. De uitstoot van zwaveldioxide is rechtstreeks afhankelijk van het zwavelgehalte in de brandstof. Sinds de invoering van normen door de overheid, die het zwavelgehalte in brandstof beperken, is de uitstoot met meer dan 80% teruggedrongen.
- **NO_x (stikstofoxiden)**
Stikstofoxiden bestaan uit NO en NO₂. NO is een kleurloos, reukloos en smaakloos gas dat op zich weinig giftig is. NO₂ is een bruin-rood gekleurd gas dat voor nadelige gezondheidseffecten zorgt door de inwerking op het ademhalingssysteem. Door de invoering van de geregelde driewegskatalysator in benzinevoertuigen en de EURO-normen bij dieselveertuigen dalen de stikstofemissies als gevolg van het wegtransport. Tegenwoordig komt de uitstoot vooral van dieselmotoren.
- **VOC (vluchtige organische koolwaterstoffen)**
Vluchtige organische componenten is een groep van allerlei schadelijke stoffen zoals benzeen en dioxides. De meeste zijn giftig, schadelijk voor de gezondheid en/of dragen bij tot de opwarming van de aarde. Benzinegebruik is de voornaamste bron van vluchtige organische stoffen. Door de driewegskatalysator in benzinevoertuigen en de oxikatalysator in dieselveertuigen wordt de emissie van VOC sterk verminderd.
- **PM 10 (deeltjes)**
De term "deeltjes" is een verzamelnaam voor alle vaste deeltjes en druppeltjes die door de lucht zweven, zoals stof, verontreinigingen, rook of druppeltjes. Dieselveertuigen zijn een belangrijke bron van stof-en roetdeeltjes. De roetfilter wordt gebruikt om de uitstoot van fijn stof te verminderen. Wanneer de Particulate Matter (PM) kleiner is dan 10 µm (PM 10) dringen de stofdeeltjes de longen binnen en zijn bijgevolg erg schadelijk voor de gezondheid van de mens. PM 2,5 is schadelijker dan PM 10.

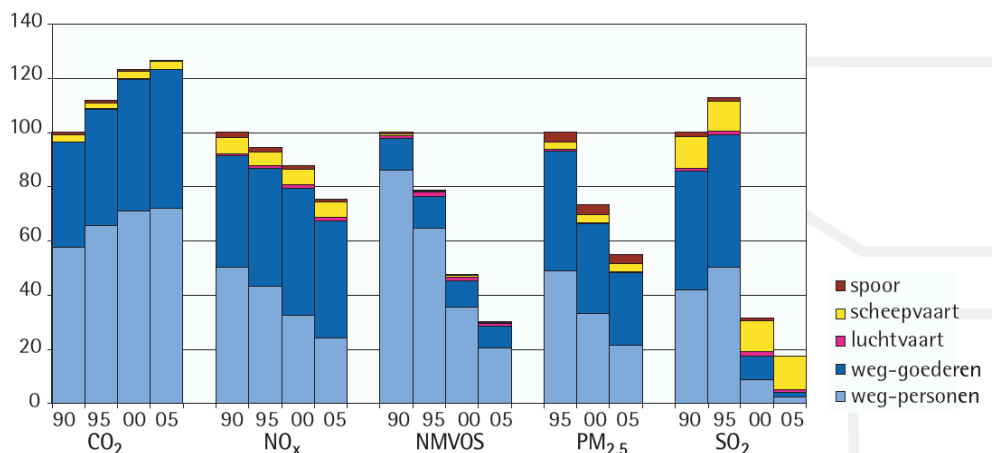
Onderstaande tabel geeft een overzicht van de belangrijkste soorten polluenten als gevolg van het gebruik van de verschillende brandstoffen (- : sterke uitstoot, + : relatief lage uitstoot).

Tabel 5. 1: Overzicht polluenten

		Benzine	Diesel
Luchtkwaliteit			
Deeltjes	PM	+	-
Stikstofoxiden	NO _x	+	-
Vluchtige organische Koolstoffen	VOC's	-	+
Koolstofmonoxide	CO	-	+
Versterkt het broeikasgas			
Koolstofdioxide	CO ₂	-	-

De wetgever stelt strenge milieueisen aan voertuigen om zo de uitstoot van de polluenten te doen dalen. De belangrijkste op vlak van emissiereducering zijn de zogenaamde Euro-normen. Op deze manier wordt de uitstoot van NO_x, VOC's (koolwaterstoffen), CO en PM beperkt door de Europese limietwaarden. De Euro-1 norm werd in 1992 ingevoerd en vanaf 2011 moet elk verkocht voertuig voldoen aan de Euro-5 norm. Onder invloed van deze normen werden voertuigen de voorbije jaren steeds schoner. Dit wordt bevestigd door een verschenen MIRA (2010) rapport van de Vlaamse milieumaatschappij. Op figuur 5.1 staan voor de jaartallen 1995, 2000 en 2005 de hoeveelheid uitstoot van de polluenten CO₂, NO_x, NMVOS, PM_{2,5} en SO₂ in procenten weergegeven tegenover het referentiejaar 1990. De uitstoot van koolwaterstoffen (NMVOS) en van fijn stof (PM_{2,5}) is sterk gedaald. Ook de emissies van NO_x en SO₂ daalden. Hoewel alle vervuilende emissies een duidelijke reducering vertonen, is dit voor CO₂ anders. Ondanks het feit dat voertuigen energiezuiniger worden, neemt het aantal kilometers nog steeds toe waardoor de emissies van CO₂ niet stabiliseren. (Ecoscore, 2011 & MIRA, 2010)

Figuur 5. 1: Evolutie van de emissies van transport in Vlaanderen (1990=100) (MIRA-T, 2010)



5.1.2 De kost van CO₂

Transportbedrijven die beslissingen nemen, houden hoofdzakelijk rekening met de kostprijs, kwaliteit en flexibiliteit bij de keuze tussen verschillende transportroutes. Ze houden hierbij geen rekening met de externe effecten die het wegtransport creëert zoals luchtvervuiling, opwarming van de aarde en geluidsoverlast. De keuzes die ze maken hebben ook invloed op andere bedrijven, mensen en de maatschappij. De kosten verbonden aan deze externe effecten worden de externe kosten genoemd. Luchtvervuiling zorgt bijvoorbeeld voor een negatief effect op de volksgezondheid, gebouwen en gewassen. Deze kosten worden door de maatschappij gedragen, daarom worden ze externe kosten genoemd. De grootte van deze kosten bepalen, is een complexe opdracht. De schade veroorzaakt door de verschillende externe effecten is meestal niet van monetaire aard. Bijvoorbeeld de uitstoot van CO₂ draagt bij tot de opwarming van de aarde maar het is niet eenvoudig om een kost in euro te geven aan deze opwarming van de aarde. Het is dus belangrijk een correcte sociaal-economische waardering te geven, daarom dient de schade omgerekend te worden naar geldeenheden. (INFRAS & IWW, 2000)

Uit sectie 5.1.1 blijkt dat CO₂ de belangrijkste pollutant is van het wegtransport. In de literatuur zijn verschillende kostwaarderingen terug te vinden voor CO₂ en zijn de auteurs niet eenduidig. In het Friedrich en Bickel (2001) wordt een kost van €19/ton CO₂ aangerekend om externe kosten aan te rekenen.

De Europese Commissie wil een taks introduceren op CO₂ emissies vanaf 2013. Het voorstel voert een belastingsgraad van €20/ton CO₂ in voor zowel motorbrandstof als verwarmingsbrandstof. Het niveau van deze belasting is proportioneel met het niveau van CO₂ emissies. (Freshfields Bruckhaus Deringer LLP, april 2011)

In de routekaart voor hernieuwbare energie van de Europese Commissie (2007) wordt een evaluatie gemaakt van het aandeel van hernieuwbare energiebronnen in de totale energiemix. Bij deze evaluatie wordt een prijs van €25 per ton CO₂ gehanteerd.

Ten slotte blijkt uit projecties (figuur 5.2) dat de prijs voor CO₂ in 2012 tussen de €14 en €28 zal liggen. In de voorbeelden van de praktijkstudie zal een prijs van €20/ton CO₂ gebruikt worden aangezien deze prijs nauw aansluit met de realiteit.

Figuur 5. 2: CO₂ prijs projecties (Cozijnsen, 2010)



5.1.3 Het berekenen van emissies

Het enige broeikasgas dat rechtstreeks wordt uitgestoten is CO₂ en is dus direct gerelateerd aan het brandstofverbruik. Emissies van de overblijvende gassen zijn afhankelijk van de hoeveelheid gebruikte brandstof maar worden ook beïnvloed door de manier waarop met de auto gereden wordt (snelheid, versnelling, lading), type voertuig, gebruikte brandstof, technologie om emissies te verminderen (katalysatoren). Dus de eenvoudigste manier om de uitstoot van de overige gassen te bepalen is door gebruik te maken van emissiefactoren op basis van het brandstofverbruik.

Er werden reeds een aantal Europese projecten uitgevoerd om de uitstoot door wegtransport in te schatten. Een aantal modellen werden ontwikkeld voor het berekenen van emissies. Een studie gefinancierd door de Europese Commissie, het MEET-project (Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport) identificeert databronnen en gebruikt het COPERT II –model (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Traffic) voor het bepalen van emissies van het wegtransport. Het MEET-model is gebaseerd op de gemiddelde snelheid. Parameters zoals gemiddelde snelheid, verkeerssituatie, het verloop van de weg, lading voor zware goederen voertuigen worden gebruikt. De studie bracht vervolgens een verbeterde versie van het model, namelijk COPERT III. (Friedrich & Bickel, 2001)

COPERT is een softwareprogramma dat gebaseerd is op een methode om emissies te bepalen van een vloot voertuigen op het niveau van een bepaald land. De methode tracht de nood voor gedetailleerde emissieberekeningen te combineren met een gebruik van weinig inputdata. Bijvoorbeeld voor het berekenen van de emissies van EURO III zware voertuigen zijn volgende inputdata nodig: aantal voertuigen N , aantal kilometers voor een specifieke tijdsperiode M , gemiddelde reissnelheid voor rijden in stedelijk gebied V_U , in landelijk gebied V_R en op autosnelwegen V_H , aandeel van kilometers in stedelijk en in landelijk gebied en op autosnelwegen S_{URBAN} , S_{RURAL} , $S_{HIGHWAY}$. Verder zijn ook de klasse van hellingsgraad en ladingsfactor LP nodig voor het berekenen van de emissies. (Ntziachristos & Samaras, 2000)

5.2 Toepassing Bektaş en Laporte (2011)

5.2.1 Inleiding

In het model van Bektaş en Laporte (2011) wordt de uitstoot van emissies berekend aan de hand van de verbruikte energie. Het is dus belangrijk om een antwoord te krijgen op de vraag hoe deze energie berekend kan worden. MacKay (2009) legt het principe van verbruikte energie uit met de volgende formule: *Verbruikte energie van voertuig = (gereisde afstand/ afstand per eenheid brandstof) x energie per eenheid brandstof.*

De verbruikte energie hangt af van de eigenschappen van het voertuig en gaat naar vier belangrijke bestemmingen:

- Versnellen en dan vertragen door gebruik van de remmen;

Veronderstel dat een bestuurder versnelt tot een reissnelheid v . Deze versnelling geeft het voertuig kinetische energie. De snelheid wordt voor een afstand d aangehouden, tussen bijvoorbeeld twee stoptekens. Op een bepaald moment remt de bestuurder en de kinetische energie verandert in warmte in de remmen.

- Luchtweerstand;

De weerstandscoefficient (C_d : dragcoefficient) is een grootte die gebruikt wordt bij het berekenen van de weerstand die het voertuig ondervindt door de lucht. Het weerstandoppervlak is het product van de weerstandscoefficient C_d en het frontaal oppervlak van het voertuig A . Hoe hoger het weerstandoppervlak, hoe meer energie verbruikt wordt. De weerstandscoefficient van een vrachtwagen is groter dan 0,6. Een light/medium rigid vrachtwagen heeft een weerstandcoefficient van 0,7 (Akçelik et al., 2003). In Bektaş en Laporte (2011) baseren de auteurs zich op Akçelik et al. (2003) voor het toewijzen van de weerstandcoefficient. De indeling van verschillende vrachtwagens volgens bruto voertuiggewicht gebeurt door Akçelik et al. (2003) op basis van light/medium/heavy rigid categorieën. Aangezien in Europa de indeling van vrachtwagens anders gebeurt, volgt een definitie van een light en medium rigid vrachtwagen. Een light rigid vrachtwagen heeft een gross vehicle weight (afgekort GVW, bruto voertuiggewicht) groter dan 4,5 ton en kleiner dan 8 ton. Een medium rigid vrachtwagen heeft twee assen, een GVW groter dan 8 ton en elke getrokken aanhangwagen mag niet meer dan 9 ton wegen.

- Rolweerstand;

De rolweerstand is gelijk aan het gewicht van het voertuig vermenigvuldigd met de coëfficiënt van de rolweerstand (C_r). De coëfficiënt voor een auto met rubberen banden bedraagt volgens MacKay (2009) 0,01 en voor een vrachtwagen 0,007. De C_r voor auto's op betonnen wegen ligt tussen 0,01 en 0,015 en voor vrachtwagens tussen 0,006 en 0,01 (Engineeringtoolbox, 2012).

- Warmte: 75% van de energie gaat verloren door de inefficiëntie van de omzetting naar energie. Dit wordt ook wel de motorefficiëntie genoemd. De efficiëntie van benzinemotoren bedraagt 20 à 25%. Deze van dieselmotoren ligt veel hoger nl. 32 à 39% (Mima & Criqui, 2003, p.55). (MacKay, 2009)

5.2.2 Opstellen van het model

In de praktijkstudie wordt dieper gekeken naar twee illustratieve voorbeelden toegepast op het pollution-routing problem van Bektaş en Laporte (2011) beschreven in sectie 4.3.4.

Bij het opstellen van het model worden de parameters en functies gebruikt zoals in het model van Bektaş en Laporte (2011). De experimenten worden uitgevoerd met data die zo realistisch als mogelijk zijn. Alle experimenten worden uitgevoerd met één voertuig met een gewicht van drie ton indien geen lading. Er wordt verondersteld dat de gedragen lading ongeveer evenveel weegt. Het voertuig wordt gedefinieerd met de volgende parameters, dezelfde als in het model van Bektaş en Laporte (2011):

- $C_d = 0,7$ (zie ook sectie 5.2.1)
- $A = 5,0 \text{ m}^2$
- $C_r = 0,01$ (zie ook sectie 5.2.1)
- $w = 3 \text{ t}$
- $a = 0$
- $\theta_{ij} = 0^\circ$ voor alle $i, j \in \{0,1,2,3\}, i \neq j$
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- $\rho = 1,2041 \text{ kg/m}^3$ (op 20°C)
- $l = 40 \text{ km/u}$
- $u = 70 \text{ km/u}$

Bij het bepalen van de kosten worden bepaalde assumpties gemaakt. De energie, in J (Joule) wordt omgezet in kWh ($1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J}$) en wordt vertaald naar de brandstofbehoefte. Een liter benzine heeft een energiedichtheid van $31,8 \text{ MJ/liter}$. Dit wil zeggen dat een liter benzine $8,8 \text{ kWh}$ energie geeft. Diesel heeft een energiedichtheid van $35,8 \text{ MJ/liter}$ en geeft dus $9,9 \text{ kWh}$ energie. (Duysinx, Germain, & Heyen, 2009)

Verder geven benzinemotoren een gemiddelde efficiëntie van 20%. De efficiëntie van dieselmotoren ligt veel hoger, tussen de 32% en 39% (zie sectie 5.2.1). In de voorbeelden wordt gebruikt gemaakt van de formules uit sectie 4.3.4. Voor iedere boog (i,j) van de route wordt eerst de hoeveelheid energie berekend om te weten hoeveel liter brandstof verbruikt wordt. De berekening gaat als volgt:

$$\alpha_{ij} = a + g \sin \theta + g C_r \cos \theta = 0 + 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0 + 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,01 * 1 = 0,0981 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\beta = 0,5 * C_d * A * \rho = 0,5 * 0,7 * 5 \text{ m}^2 * 1,2041 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,107175 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$\begin{aligned} \text{Totale energie } P_{ij} &= \alpha_{ij}(w + f_{ij})d_{ij} \quad (4) \\ &+ \beta v_{ij}^2 d_{ij} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\text{Brandstofverbruik } (l) = \frac{P_{ij} \text{ (kWh)}}{\text{Energiedichtheid } \left(\frac{\text{kWh}}{\text{l}}\right) * \text{motorefficiëntie}}$$

De **kost van de brandstof** wordt gezet op €1,74/l voor benzine en €1,55/l voor diesel (VAB, 2012). De totale brandstofkosten worden berekend door het brandstofverbruik te vermenigvuldigen met de kost van de brandstof.

De **kost van de CO₂-emissies** wordt berekend door aan te nemen dat één liter benzine 2,392 kg CO₂ bevat. De totale uitstoot aan emissies in kg bedraagt dan: *Totale brandstofverbruik * 2,392 kg*. Eén liter diesel bevat 2,640 kg CO₂. (Ecoscore, 2011)

In het model van Bektaş en Laporte (2011) wordt verondersteld dat één ton CO₂ £27 (= €32,9) kost maar in de voorbeelden van de praktijkstudie wordt een kost van €20/ton gebruikt (zie sectie 5.1.2).

De **loonkosten** worden als volgt berekend: *(Totaal aantal km/ snelheid (km/u) + bedieningstijd) * loonkost/u*. De bedieningstijd per klant bedraagt ongeveer 15 minuten in het voorbeeld. De uurlonen van voertuigbestuurders liggen tussen de £6,6 en £10,87 in het Verenigd Koninkrijk, afhankelijk van de ervaring van de bestuurder. Het uurloon van de bestuurder wordt daarom op een gemiddelde van £8/uur ≈ €10/uur. Voor België en omliggende landen waren geen gegevens beschikbaar via de website "Payscale". Daarom worden de gegevens van het Verenigd Koninkrijk als referentie gebruikt. (Payscale, 2012)

5.2.3 Illustratief voorbeeld 1: drie klanten

Het eerste voorbeeld bestaat uit een netwerk van vier knooppunten waarvan Oostende het depot is, Antwerpen klant 1, Luik klant 2 en Charleroi klant 3. Het volgende vraagpatroon wordt gebruikt: $q_1 = 0,25$ ton; $q_2 = 3,5$ ton en $q_3 = 0,25$ ton. De afstanden, uitgedrukt in km, van de verschillende bogen zijn terug te vinden in tabel 5.2 en zijn bepaald door Google Maps. De afstandenmatrix is symmetrisch ($d_{ij} = d_{ji}$). De vloot bestaat uit één voertuig met een capaciteit van vier ton en een bruto voertuiggewicht van zeven ton. De route start en eindigt in het depot en iedere klant moet exact één keer bezocht worden.

Tabel 5. 2: Afstandenmatrix voorbeeld 1

Boog	Afstand (km)
[0;1]	121
[1;2]	133
[2;3]	95,8
[3;0]	168

In het eerste en tweede scenario worden achtereenvolgens de verschillende routes vergeleken op basis van de afstandminimaliserende (P_d), energiminimaliserende (P_e), gewogen ladingminimaliserende (P_w) en de kostenminimaliserende (P_c) doelstelling voor respectievelijk een voertuig met een benzinemotor en een dieselmotor. Voor elk scenario wordt de emissiekost, de operationele kost en de kost van de bestuurder berekend.

In het **eerste scenario** heeft het voertuig een benzinemotor met een efficiëntie van 20%. Voor de oplossingen van P_d , P_e en P_w wordt de snelheid op het laagst mogelijke gezet, nl. 40 km/u, net zoals Bektaş en Laporte (2011) doen in hun onderzoek. Tabel 5.3 geeft de zes mogelijke routecombinaties met bijbehorende afstand, energie afhankelijk van de lading (1), energie afhankelijk van de snelheid (2), totaal energieverbruik en totale kosten. De zwarte kaders geven telkens het minimum van iedere kolom.

Tabel 5. 3: Overzicht routes

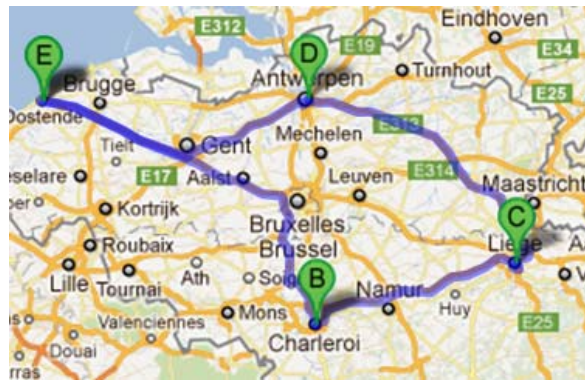
Route	Afstand (km)	Energie lading	Energie Afstand	Totale energie (kWh)	Totale kost (€)
(0,1,2,3,0)	517,8	69,7627	37,4175	107,1803	248,1739
(0,3,2,1,0)	517,8	71,3378	37,4175	108,7553	249,8083
(0,1,3,2,0)	533,8	76,6938	38,5737	115,2675	260,5662
(0,2,3,1,0)	533,8	68,7667	38,5737	107,3405	252,3401
(0,2,1,3,0)	618,0	76,1569	44,6582	120,8152	287,3732
(0,3,1,2,0)	618,0	92,2481	44,6582	136,9063	304,0714

Wanneer de afstand geminimaliseerd wordt, zijn twee routes mogelijk namelijk (0,1,2,3,0) en (0,3,2,1,0), die beide 517,8 km bedragen. De route met de minste verbruikte energie (P_e) is route (0,1,2,3,0) met een lengte van 517,8 km. Deze verbruikt ongeveer 107,18 kWh energie om de steden Oostende, Antwerpen, Luik en Charleroi te bedienen en heeft een gedragen lading van 2560,1 ton/km. In tabel 5.4 is een overzicht terug te vinden met de berekening van de gedragen lading voor route (0,1,2,3,0) bij wijze van voorbeeld. Voor iedere boog wordt de afstand en het aantal ton lading weergegeven. Om de gedragen lading te berekenen wordt de afstand vermenigvuldigd met de lading voor elke boog. De som van deze producten geeft de gedragen lading in ton/km.

De afstandsminimaliserende route (0,3,2,1,0) verbruikt 1,47% meer energie, nl. 108,76 kWh en heeft een gedragen lading van 2617,9 ton/km. Figuur 5.3 toont de energieminimaliserende route en de afstandsminimaliserende route is terug te vinden in figuur 5.4. In de figuren is E ook steeds gelijk aan A , het depot. B is de eerste klant die bediend wordt, C en D respectievelijk de tweede en derde klant. In het geval van de afstandsminimaliserende route wordt B (klant 3) eerst bediend, C (klant 2) als tweede bediend en D (klant 1) als laatste bediend.



Figuur 5. 3: Energieminimaliserende route



Figuur 5. 4: Afstandminimaliserende route

De route met de minst verbruikte energie afhankelijk van de lading is de route (0,2,3,1,0). De klant met de zwaarste lading wordt eerst bezocht en de gedragen lading is 2538,25 ton/km. De lengte van de route waar de gewogen lading geminimaliseerd wordt, bedraagt 538 km en deze verbruikt ongeveer 108,045 kWh energie. Figuur 5.5 toont deze gewogen lading minimaliserende route.

Tabel 5. 4: Gedragen lading (0,1,2,3,0)

Boog	Afstand (km)	Lading (ton)	Afstand x lading (ton/km)
[0;1]	121	7,00	847,00
[1;2]	133	6,75	897,75
[2;3]	95,8	3,25	311,35
[3;0]	168	3,00	504,00
	517,8		2560,1



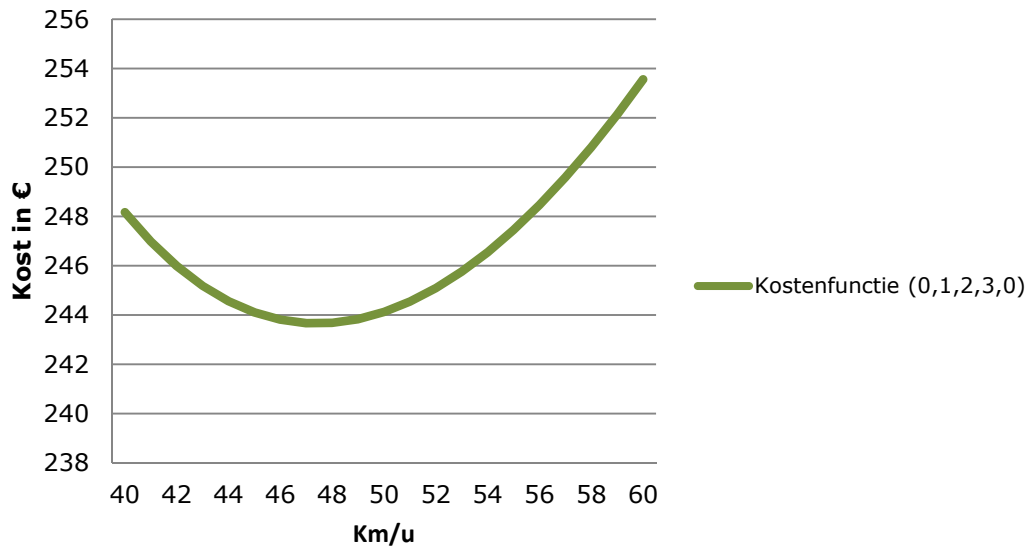
Figuur 5. 5: Gewogen ladingminimaliserende route

Route (0,1,3,2,0), (0,2,1,3,0) en (0,3,1,2,0) zijn gedomineerde oplossingen en zullen nooit interessant zijn. Er zal altijd een betere route te vinden zijn voor een bepaalde doelfunctie.

De oplossingen voor de problemen P_d , P_e en P_w zijn routes waar de snelheid op het laagste niveau gezet wordt, 40km/u. Bij de kostenminimaliserende doelstelling wordt de snelheid van de energieminimaliserende oplossing door de auteurs Bektaş en Laporte (2011) op 52km/u gezet, met als doel de kost van de bestuurder te doen dalen. Wanneer in dit voorbeeld de snelheid van de energieminimaliserende route (0,1,2,3,0) op 52 km/u gezet wordt, is de kost echter niet geminimaliseerd. Figuur 5.6 geeft de kostenfunctie van route (0,1,2,3,0) weer in functie van de snelheid. Bij 47 km/u wordt de kost geminimaliseerd tot €243,6734. In dit voorbeeld wordt de kostenminimaliserende doelfunctie dus bepaald door de snelheid van de energieminimaliserende oplossing op 47 km/u te zetten.

In tabel 5.5 wordt een overzicht van het brandstofverbruik en de kosten gegeven. De doelstelling P_C geeft de laagste totale kost maar de hoogste milieu- en operationele kost. De kost van de bestuurder blijkt een dominerende rol te spelen.

Figuur 5. 6: Energieminimaliserende kostenfunctie scenario 1



Tabel 5. 5: Brandstofverbruik en kosten scenario 1

Probleem	Verbruik Brandstof (l)	Kost Brandstof	Kost CO ₂	Kost Bestuurder	TOTALE KOST
P_D	61,793	109,9912	2,8672	136,95	249,8083
P_E	60,898	108,3982	2,8257	136,95	248,1739
P_L	60,989	108,5602	2,8299	140,95	252,3401
P_C	68,989	122,8021	3,2011	117,67	243,6734

In het **tweede scenario** heeft het voertuig een dieselmotor met een efficiëntie van 37%, net zoals in Bektaş en Laporte (2011). De berekening van de energie voor de verschillende routecombinaties wordt op dezelfde manier uitgevoerd als in sectie 5.2.1, enkel de energiedichtheid van diesel en de kost per liter brandstof worden aangepast. Tabel 5.6 geeft voor de verschillende routes de afstand, energie afhankelijk van de lading (1), energie afhankelijk van de snelheid (2), totale verbruikte energie en de totale kosten. De eerste vier kolommen zijn identiek aan scenario 1 aangezien enkel het brandstofverbruik en dus ook de kosten veranderen. De totale kosten voor diesel liggen lager doordat de dieselprijs goedkoper is dan die van benzine, maar ook omdat het verbruik van brandstof lager ligt doordat diesel een hogere energiedichtheid heeft en de dieselmotor een hogere efficiëntie heeft dan een benzinemotor.

De oplossingen voor de problemen P_d , P_e en P_w zijn dus ook dezelfde routes als in scenario 1, nl. (0,3,2,1,0), (0,1,2,3,0) en (0,2,3,1,0). Ook hier wordt de snelheid op het laagste niveau gezet wordt, 40km/u. De energieminimaliserende kostenfunctie heeft echter wel een ander verloop als deze in scenario 1. Figuur 5.7 geeft de kostenfunctie van route (0,1,2,3,0) weer. De totale kost wordt geminimaliseerd bij een snelheid van 63 km/u. De snelheid ligt hier dus veel hoger dan in scenario 1. Een bemerking die hier gemaakt kan worden is dat een gemiddelde snelheid van 63 km/u behalen niet echt realistisch lijkt in de praktijk.

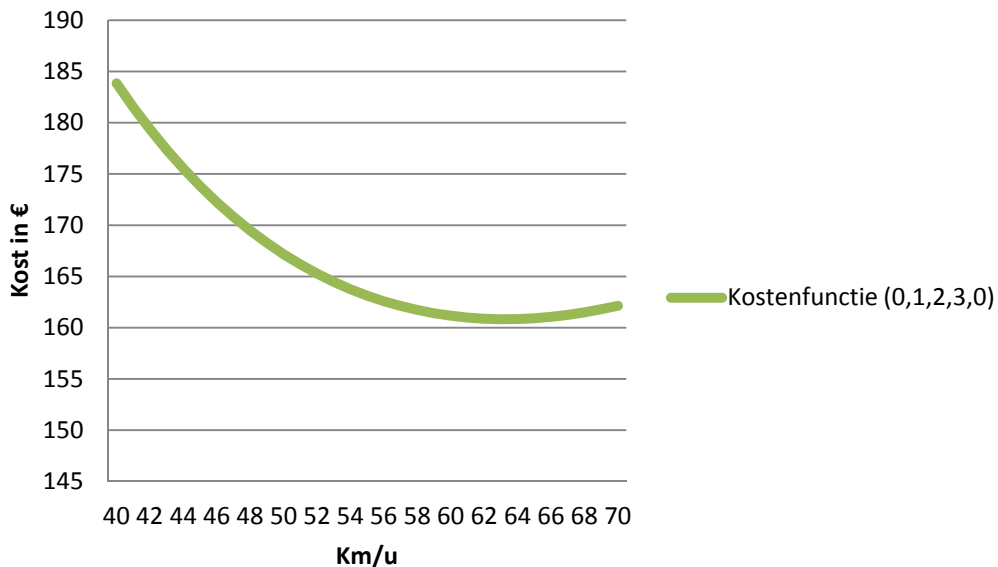
Ook hier zijn de routes (0,1,3,2,0), (0,2,1,3,0) en (0,3,1,2,0) gedomineerde oplossingen en zullen ze nooit interessant zijn. Er zal altijd een betere route te vinden zijn voor een bepaalde doelfunctie.

Tabel 5.7 geeft een overzicht van het brandstofverbruik en de kosten in scenario 2. Bij de kostenminimaliserende doelfunctie wordt de snelheid van 63 km/u gebruikt, al moet de praktische toepasbaarheid wel in vraag gesteld worden. De doelstelling P_c geeft de laagste kost maar ook hier de hoogste emissiekost en brandstofkost. De kost van de bestuurder daalt sterk ten opzichte van de andere kosten omdat de route sneller wordt afgelegd.

Tabel 5. 6: Overzicht routes scenario 2

Route	Afstand (km)	Energie lading	Energie snelheid	Totale energie (kWh)	Totale kost (€)
(0,1,2,3,0)	517,8	69,7627	37,4175	107,1803	183,8483
(0,3,2,1,0)	517,8	71,3378	37,4175	108,7553	184,5375
(0,1,3,2,0)	533,8	76,6938	38,5737	115,2675	191,3870
(0,2,3,1,0)	533,8	68,7667	38,5737	107,3405	187,9184
(0,2,1,3,0)	618	76,1569	44,6582	120,8152	214,8645
(0,3,1,2,0)	618	92,2481	44,6582	136,9063	221,9054

Figuur 5. 7: Energieminimaliserende kostenfunctie scenario 2



Tabel 5. 7: Brandstofverbruik en kosten scenario 2

Probleem	Verbruik Brandstof (l)	Kost Brandstof	Kost CO ₂	Kost Bestuurder	TOTALE KOST
P_D	29,6902	46,0199	1,6764	136,95	184,5375
P_E	29,2602	45,3534	1,5450	136,95	183,8483
P_L	29,3040	45,4212	1,5472	140,95	187,9184
P_C	44,3848	68,7964	2,3435	89,69	160,8305

Ten slotte worden beide scenario's vergeleken met elkaar. De energieminimaliserende route voor benzine wordt als referentie beschouwd. Uit tabel 5.8 en 5.9 blijkt dat door te kiezen voor de energieminimaliserende route en een dieselmotor het brandstofverbruik met meer dan de helft verlaagt waardoor ook de kost van de brandstof met meer dan de helft daalt en de kost van CO₂ met bijna de helft daalt. De kost van de bestuurder speelt echter een dominante rol en zorgt ervoor dat de kost van de beste oplossing voor de energieminimaliserende doelstelling niet in dezelfde mate daalt.

Tabel 5. 8: Vergelijking benzine - diesel

Probleem	Verbruik Brandstof (l)	Kost Brandstof	Kost CO ₂	Kost Bestuurder	TOTALE KOST
P_E (benzine)	60,8980	108,3982	2,8257	136,95	248,1739
P_E (diesel)	29,2602	45,3534	1,5449	136,95	183,8483
P_L (diesel)	29,3040	45,4212	1,5473	140,95	187,9184
P_C (diesel)	44,3848	68,7965	2,3435	89,69	160,8305

Tabel 5. 9: Vergelijking benzine-diesel in %

Probleem	Verbruik Brandstof (l)	Kost Brandstof	Kost CO ₂	Kost Bestuurder	TOTALE KOST
P_E (benzine)	100	100	100	100	100
P_E (diesel)	48,0480	41,8396	54,6754	100	74,0805
P_L (diesel)	48,1198	41,9021	54,7570	102,9208	75,7205
P_C (diesel)	72,8839	63,4664	82,9370	65,4914	64,8056

5.2.4 Illustratief voorbeeld 2: vier klanten

Het tweede voorbeeld bestaat uit een regionaal netwerk van vijf knooppunten waarvan Genk het depot is (index 0), Tongeren (klant 1), Sint-Truiden (klant 2), Hasselt (klant 3) en Opglabbeek (klant 4). Op die manier kan gekeken worden of het kiezen van een route op basis van de energieminimaliserende doelstelling ook effect heeft op kleinere afstanden. Voor een regionaal transportbedrijf kan dit immers van belang zijn. De afstanden, uitgedrukt in km, van de verschillende bogen zijn terug te vinden in tabel 5.10 en zijn bepaald door Google Maps. De afstandenmatrix is symmetrisch. De vloot bestaat uit één voertuig met een capaciteit van vier ton en een bruto voertuiggewicht van zeven ton. De route start en eindigt in het depot en iedere klant moet exact één keer bezocht worden.

In het eerste scenario wordt gekeken welke invloed de lading en het vraagpatroon heeft. Er worden vijf verschillende vraagpatronen bekeken. Verder heeft het voertuig een dieselmotor met een efficiëntie van 37%. In het tweede scenario wordt een technologische vooruitgang van de motor verondersteld waardoor de efficiëntie opgedreven wordt naar 40%. Voor het berekenen van de verbruikte energie, de verbruikte brandstof en de kosten worden dezelfde parameters gebruikt als in sectie 5.2.2

Tabel 5. 10: Afstandenmatrix voorbeeld 2

Boog	Afstand (km)	Boog	Afstand (km)
[0,1]	26,3	[1,3]	21,4
[0,2]	35,2	[1,4]	37
[0,3]	13,5	[2,3]	19
[0,4]	11,9	[2,4]	55,9
[1,2]	21	[3,4]	29,5

In het **eerste scenario** worden achtereenvolgens volgende vraagpatronen besproken bij een snelheid van 40 km/u:

- Vraagpatroon 1: $q_1 = 2,5$ ton; $q_2 = 0,5$ ton, $q_3 = 0,5$ ton en $q_4 = 0,5$ ton
- Vraagpatroon 2: $q_1 = 0,5$ ton; $q_2 = 2,5$ ton, $q_3 = 0,5$ ton en $q_4 = 0,5$ ton
- Vraagpatroon 3: $q_1 = 0,5$ ton; $q_2 = 0,5$ ton, $q_3 = 2,5$ ton en $q_4 = 0,5$ ton
- Vraagpatroon 4: $q_1 = 0,5$ ton; $q_2 = 0,5$ ton, $q_3 = 0,5$ ton en $q_4 = 2,5$ ton
- Vraagpatroon 5: $q_1 = 1$ ton; $q_2 = 1$ ton, $q_3 = 1$ ton en $q_4 = 1$ ton

De verschillende routecombinaties voor elk vraagpatroon worden weergegeven in tabellen in bijlage 1 tot en met 5. Iedere tabel vermeldt de afstand in km, de component voor de energie afhankelijk van de lading (1), de component voor de energie afhankelijk van de snelheid (2), de totale energie en de totale kost. Voor het minimaliseren van de afstand wordt naar de tweede kolom gekeken. Verder wordt voor het minimaliseren van de energie de vijfde kolom gebruikt, de totale energie, en voor het minimaliseren van de gewogen lading wordt gekeken naar de derde kolom, de energie afhankelijk van de lading. Het minimaliseren van de totale kost wordt weergegeven in de laatste kolom. Het minimum van elke kolom wordt telkens aangeduid door een zwarte kader. Tabel 5.11 geeft een overzicht van de optimale route voor ieder vraagpatroon voor elke doelstelling (afstand, energie, gewogen lading en kost bij 40 km/u).

Tabel 5. 11: Overzicht optimale routes

Route	(0,1,2,3,4,0)	(0,3,2,1,4,0)	(0,4,1,2,3,0)
Afstand	107,7	102,4	102,4
Totale energie			
V1	21,2319	21,2754	21,4280
V2	22,3764	20,1309	22,5725
V3	23,4119	19,0954	23,6080
V4	25,0197	23,2919	19,4115
V5	23,0100	20,9484	21,7550
Lading afh. E			
V1	13,4492	13,8757	14,0283
V2	14,5937	12,7312	15,1728
V3	15,6292	11,6957	16,2083
V4	17,2370	15,8922	12,0118
V5	15,2273	13,5487	14,3553
Gedragen lading			
V1	493,55	509,20	514,80
V2	535,55	467,20	556,80
V3	573,55	429,20	594,80
V4	632,55	583,20	440,80
V5	558,80	497,20	526,80
Kost			
V1	46,215	44,909	44,976
V2	46,716	44,409	45,477
V3	47,169	43,955	45,930
V4	47,873	45,792	44,094
V5	46,993	44,766	45,119

Bij het analyseren van deze tabellen in bijlage en tabel 5.11 geven vraagpatroon 2, 3 en 5 voor de afstandminimaliserende doelstelling twee dezelfde mogelijkheden nl. route (0,3,2,1,4,0) en (0,4,1,2,3,0) met een afstand van 102,4 km. Voor het minimaliseren van de energie biedt route (0,3,2,1,4,0) de beste oplossing met een energieverbruik van respectievelijk 20,13 kWh, 19,095 kWh en 20,948 kWh. Deze route is tevens de oplossing voor het minimaliseren van de gewogen lading. Nochtans wordt in vraagpatroon 2 de zwaarste lading (klant 2) niet eerst afgeleverd. Daarom is het belangrijk om ook te kijken naar de energie afhankelijk van de lading en de gedragen lading (ton/km).

Stel dat bij vraagpatroon 2 de verplichting wordt opgelegd om eerst de zwaarste lading te leveren dan wordt klant 2 als eerste bediend. Bijgevolg is route (0,2,1,3,4,0) de optimale oplossing indien de energie geminimaliseerd wordt (zie tabel 5.11). In tabel 5.12 en 5.13 worden beide routes (0,3,2,1,4,0) en (0,2,1,3,4,0) vergeleken op basis van gedragen lading. Voor iedere boog wordt de afstand en het aantal ton lading weergegeven. Om de gedragen lading te berekenen wordt de afstand vermenigvuldigd met de lading voor elke boog. De som van deze producten geeft de gedragen lading in ton/km. Route (0,3,2,1,4,0) heeft een gedragen lading van 467,2 ton/km en voor route (0,2,1,3,4,0) bedraagt de gedragen lading 565,45 ton/km. De energie afhankelijk van de lading is terug te vinden in de laatste kolom, voor route (0,3,2,1,4,0) bedraagt deze 12,7312 kWh en voor route (0,2,1,3,4,0) 15,4085 kWh. Op basis van de gedragen lading en de energie afhankelijk van de lading kan dus besloten worden dat route (0,3,2,1,4,0) de optimale oplossing is voor het minimaliseren van de gewogen lading.

Tabel 5. 12: Gedragen lading route (0,3,2,1,4,0)

Boog	Afstand (km)	Lading (ton)	Afstand x lading (ton/km)	Energie afhankelijk van lading (kWh)
[0;3]	13,5	7	94,5	2,5751
[3;2]	19	6,5	123,5	3,3654
[2;1]	21	4	84	2,2890
[1;4]	37	3,5	129,5	3,5289
[4;0]	11,9	3	35,7	0,9728
	102,4		467,2	12,7312

Tabel 5. 13: Gedragen lading route (0,2,1,3,4,0)

Boog	Afstand (km)	Lading (ton)	Afstand x lading (ton/km)	Energie afhankelijk van lading (kWh)
[0;2]	35,2	7	246,4	6,7144
[2;1]	21	4,5	94,5	2,5751
[1;3]	21,4	4	85,6	2,3326
[3;4]	29,5	3,5	103,25	2,8136
[4;0]	11,9	3	35,7	0,9728
	119		565,45	15,4085

Vraagpatroon 1 geeft drie verschillende oplossingen afhankelijk van de doelstelling. De afstandsminimaliserende oplossing geeft twee mogelijk routes, nl. (0,3,2,1,4,0) en (0,4,1,2,3,0) met beide een afstand van 102,4 km, een energieverbruik van respectievelijk van 21,28 kWh en 21,43 kWh en een gedragen lading van respectievelijk 509,2 ton/km en 514,8 ton/km. De kosten bedragen voor de eerste route €44,9094 en voor de tweede route € 44,976.

Bij het minimaliseren van de totale energie en de gewogen lading geeft één route de optimale oplossing nl. (0,1,2,3,4,0) met een afstand van 107,7 km, een energieverbruik van 21,23 kWh, een gedragen lading van 493,55 ton/km en een kost van €46,215. Het minimaliseren van de energie geeft dus niet noodzakelijk de laagste kost. Dit was bij vraagpatroon 2, 3 en 5 wel telkens het geval.

Tabel 5. 14: Vraagpatroon 1: energie bij 40 km/u

Probleem	Afstand (in km)	Verbruik Diesel (l)	Energie lading	Energie snelheid	Totale energie	Gedragen lading (ton/km)
(0,1,2,3,4,0)	107,7	5,796	13,449	7,783	21,232	493,55
(0,3,2,1,4,0)	102,4	5,808	13,876	7,399	21,275	509,20
(0,4,1,2,3,0)	102,4	5,850	14,028	7,399	21,426	514,80

Tabel 5. 15: Vraagpatroon 1: energie bij 42 km/u

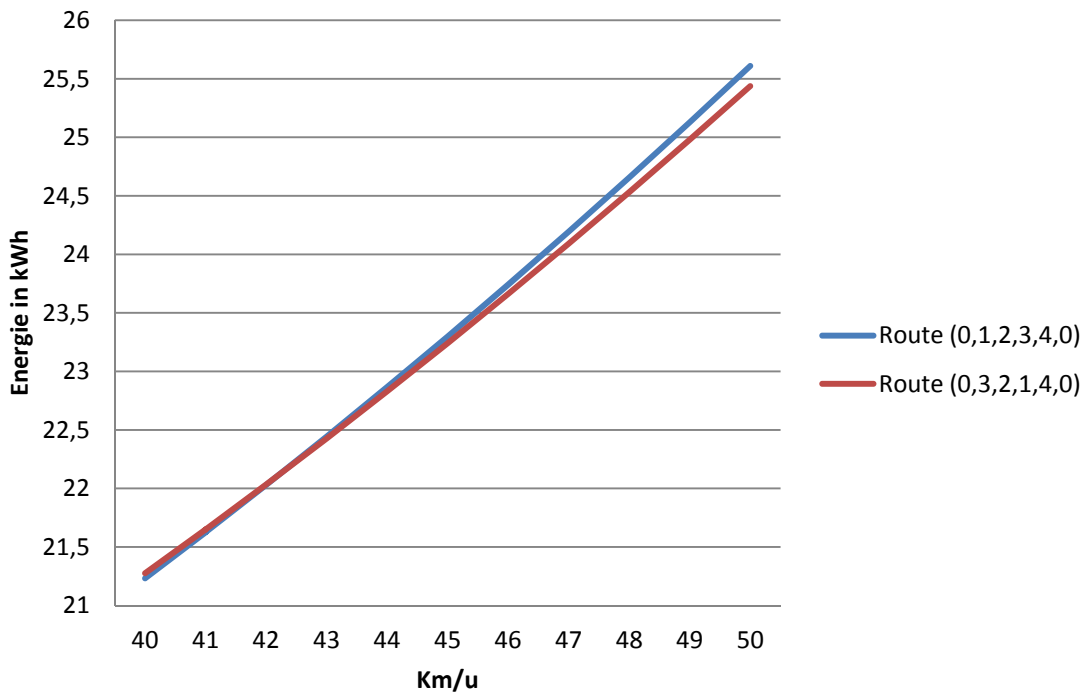
Probleem	Afstand (in km)	Verbruik Diesel (l)	Energie lading	Energie snelheid	Totale energie	Gedragen lading (ton/km)
(0,1,2,3,4,0)	107,7	6,014	13,443	8,581	22,0296	493,55
(0,3,2,1,4,0)	102,4	6,0152	13,876	8,158	22,0338	509,20
(0,4,1,2,3,0)	102,4	6,0569	14,028	8,158	22,1864	514,80

Tabel 5. 16: Vraagpatroon 1: energie bij 43 km/u

Probleem	Afstand (in km)	Verbruik Diesel (l)	Energie lading	Energie snelheid	Totale energie	Gedragen lading (ton/km)
(0,1,2,3,4,0)	107,7	6,127	13,449	8,994	22,443	493,55
(0,3,2,1,4,0)	102,4	6,123	13,876	8,551	22,427	509,20
(0,4,1,2,3,0)	102,4	6,164	14,028	8,551	22,580	514,80

In tabel 5.14, 5.15 en 5.16 worden de routes (0,1,2,3,4,0), (0,3,2,1,4,0) en (0,4,1,2,3,0) van vraagpatroon 1 weergegeven bij 40 km/u, 42 km/u en 43 km/u. In elke tabel is de afstand, het brandstofverbruik, de verbruikte energie afhankelijk van de lading (1), de verbruikte energie afhankelijk van de snelheid (2), de totale verbruikte energie en de gedragen lading terug te vinden. Wanneer de snelheid verhoogd wordt naar 43 km/u (tabel 5.20), wordt de afstandsminimaliserende route (0,3,2,1,4,0) ook de oplossing voor het minimaliseren van de energie. Figuur 5.8 laat voor zowel route (0,1,2,3,4,0) als (0,3,2,1,4,0) de hoeveelheid energie (in kWh) zien in functie van de snelheid. Hier is duidelijk te zien dat route (0,3,2,1,4,0) minder energie gebruikt vanaf 43 km/u. Snelheid speelt dus ook een belangrijke rol in het kiezen van de optimale energieminimaliserende oplossing.

Figuur 5. 8: Energiefunctie route (0,3,2,1,4,0) en (0,1,2,3,4,0)



Ten slotte is bij vraagpatroon 4 de optimale oplossing voor zowel het minimaliseren van de afstand, energie en gewogen lading de route (0,4,1,2,3,0). De zwaarste lading (klant 4) wordt het eerst geleverd en bijgevolg is de verbruikte energie 19,411 kWh, de afstand 102,4 km, de kost € 44,094 en de gedragen lading 440,8 ton/km.

Het vraagpatroon en de gedragen lading spelen dus een belangrijke rol in het bepalen van de optimale route voor het minimaliseren van energie. Zelfs op kleinere afstand blijkt dat de hoeveelheid lading een impact heeft op de keuze van de route. Ook de snelheid speelt hierbij mee want zoals gezien bij vraagpatroon 1 kan de keuze van een route op basis van het minimaliseren van energie veranderen bij een andere snelheid.

In het **tweede scenario** wordt de invloed van een technologische vooruitgang van de motor bekeken. Stel dat de efficiëntie van een dieselmotor stijgt van 37% naar 40%, wat is het effect op de verbruikte energie, verbruikte brandstof en de kosten? In het tweede scenario wordt enkel gekeken naar het eerste vraagpatroon, klant 1 heeft een vraag van 2,5 ton en de rest van de klanten telkens een vraag van 0,5 ton.

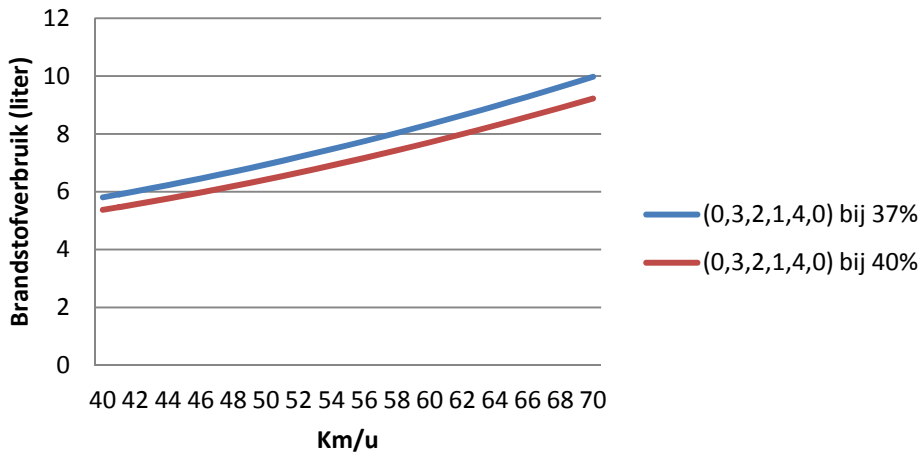
Tabel 5. 17: Vergelijking kost: motorefficiëntie 37% - 40% bij 40 km/u

Route	Afstand (in km)	Energie lading	Energie snelheid	Totale energie (in kWh)	Totale kost (in €) 37%	Totale kost (in €) 40%
(0,1,2,3,4,0)	107,7	13,449	7,78	21,232	46,2153	43,0186
(0,3,2,1,4,0)	102,4	13,876	7,3997	21,275	44,9093	41,7112
(0,4,1,2,3,0)	102,4	14,028	7,3997	21,428	44,9761	41,7730

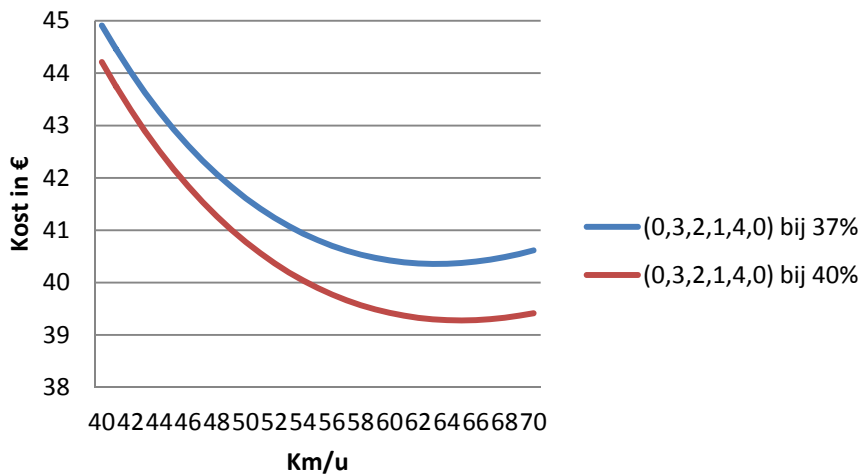
In tabel 5.17 wordt een overzicht gegeven van de optimale routes indien afstand, energie en gewogen lading geminimaliseerd worden bij een motorefficiëntie van 40% en snelheid van 40 km/u. De totale kost van de energieminimaliserende oplossing (0,1,2,3,4,0) daalt met 6,92% als de motor een efficiëntie heeft van 40% in plaats van 37%. Wanneer de route gekozen wordt met de laagste kost bij 40 km/u, is de oplossing (0,3,2,1,4,0). De kost van deze route daalt met 7,12% dankzij de technologische vooruitgang. Uiteraard geldt dan ook hier dat de energieminimaliserende oplossing verandert bij een snelheid van 43 km/u naar route (0,3,2,1,4,0), zie figuur 5.8.

De verbruikte energie blijft hetzelfde voor alle routes ondanks het veranderen van de motorefficiëntie. Het brandstofverbruik daarentegen daalt indien een motor met een efficiëntie van 40% gebruikt wordt in plaats van 37%. Figuur 5.9 toont het brandstofverbruik in functie van de snelheid van route (0,3,2,1,4,0) bij een motorefficiëntie van 37% en 40%. Het brandstofverbruik bij 40% motorefficiëntie ligt 7,5% lager dan bij 37%. Bijgevolg liggen de brandstofkosten ook lager en dus ook de totale kosten, zie figuur 5.10.

Figuur 5. 9: Brandstofverbruik in functie van snelheid



Figuur 5. 10: Kosten in functie van snelheid



Wanneer de kosten geminimaliseerd worden, moet rekening gehouden worden met de snelheid. In figuur 5.10 wordt de kostenfunctie van route (0,3,2,1,4,0) in functie van de snelheid uitgezet bij 37% en 40% motorefficiëntie. Bij een efficiëntie van 37% is de kost geminimaliseerd bij een snelheid van 63 km/u. De kost van de route bedraagt dan €40,357. Indien een motorefficiëntie van 40% wordt gehaald, wordt de kost geminimaliseerd bij 65 km/u en bedraagt deze €39,279. Uiteraard is het in de praktijk niet mogelijk om deze hoge gemiddelde snelheden te behalen bij het bedienen van deze route. De kosten minimaliseren tot deze waarden is dan ook niet realistisch. Wat hier aangetoond wordt, is dat de snelheid wel degelijk invloed heeft op de kosten, naast de motorefficiëntie.

Er kan dus besloten worden dat het veranderen van de efficiëntie van de motor geen direct effect heeft op het verbruik van de totale energie maar wel op het brandstofverbruik en dus ook op de totale kost.

5.3 Reflectie

Naarmate meer klanten aan het netwerk toegevoegd worden, wordt het rittenplanningsprobleem steeds complexer. Wanneer de afstand of de kosten (zonder energiekosten) geminimaliseerd worden, maakt het geen verschil in welke richting de route bediend worden indien de afstandenmatrix symmetrisch is ($d_{ij} = d_{ji}$). Het aantal verschillende routes met n klanten bedraagt dan $n!/2$. Wanneer rekening gehouden wordt met de energie en dus ook met de emissies maakt het wel een verschil in welke richting de route bediend wordt aangezien de lading en afstand een effect hebben. Het aantal routecombinaties bedraagt in dat geval $n!$ waardoor de complexiteit van het probleem enorm stijgt als het aantal klanten toeneemt. Exacte oplossingsmethoden zijn dus niet geschikt om het probleem op te lossen naarmate de complexiteit toeneemt. Benaderingsmethoden zoals heuristieken en metaheuristieken geven een oplossing omdat ze het probleem sneller kunnen oplossen dan exacte algoritmes. Een heuristiek zorgt voor een specifieke strategie maar die leidt niet altijd tot de optimale oplossing.

Bektaş en Laporte (2011) hebben nog geen oplossingsmethoden zoals heuristieken aangereikt. Özeceylan et al. (2011) bestudeert een model dat sterk lijkt op dat van Bektaş en Laporte (2011) namelijk het groene handelsreizigersprobleem (Green TSP). De afleiding van de emissiekosten gebeurt op dezelfde manier en ook de parameters zijn hetzelfde. Enkel de toegepaste oplossingsbenaderingen zijn verschillend. Bektaş en Laporte (2011) behandelen het model als een geheelgetalig lineair programmeringsprobleem. Özeceylan et al. (2011) gebruiken een gemengd niet-lineair geheelgetalig programmeringsprobleem en een hybride heuristiek om het model op te lossen. De hybride heuristiek is gebaseerd op ant colony optimization (cfr. 2.6.3).

Een mogelijk algoritme voor het oplossen van een probleem zoals het pollution-routing problem kan gebaseerd worden op de hybride heuristiek van Özeceylan et al. (2011). Een globaal overzicht van de stappen volgt hieronder, voor meer details van de heuristiek wordt verwezen naar het artikel van Özeceylan et al. (2011).

Het algoritme volgt de volgende stappen:

Stap 1: In de initiatiefase worden k mieren willekeurig toegewezen aan de steden/klanten (n) zodat $k=n$ met een waarde $\tau_{ij}(0)$. $\tau_{ij}(0)$ is de restinhoud feromoon op het tijdstip t tussen de knooppunten i en j .

Stap 2: Iedere mier bouwt een toenemende tour door telkens de volgende stad te kiezen waar hij naar toe gaat. Hij doet dit op basis van twee types informatie: het feromoon τ en de heuristische informatie η . Wanneer een mier k op een plaats i is, wordt de volgende stad als volgt gekozen:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in \gamma} [\tau_{ik}(t)]^\alpha [\eta_{ik}]^\beta}, & \text{als } j \notin \gamma \\ 0, & \text{anders} \end{cases}$$

Waar p_{ij}^k de waarschijnlijk is dat een mier k verschuift van stad i naar stad j op tijdstip t . De tabulijst γ is een lijst die alle sporen bevat die een mier reeds voorbij is gegaan en die niet opnieuw gekozen moet worden. De paramters α en β meten de relatieve belangrijkheid van het feromoon (ervaring) en de lokale heuristiek (kennis), respectievelijk.

Stap 3: Na het toewijzen van de volgende stad van mier k , is de volgende stap het bepalen van de optimale snelheid S_{ij} tussen twee toegewezen steden. De bedoeling is het bereiken van een optimale waarde S_{ij} zodat de waarde E_{ij} geminimaliseerd wordt. E_{ij} is de totale geconsumeerde energie tussen knooppunt i en j .

Stap 4: Lokaal bijwerken: na iteratie t wanneer alle mieren hun oplossingen voltooid hebben, worden de feromoonniveaus bijgewerkt.

Stap 5: Iteratie is voltooid.

Dit is een mogelijk voorbeeld om het pollution-routing probleem uit te werken met een heuristiek indien het probleem te complex wordt om met een exacte methode uit te werken. Ten slotte volgt in de volgende sectie een reeks aanbevelingen voor verder onderzoek.

5.4 Aanbevelingen

Ter afsluiting van dit eindwerk worden nog enkele aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan. Een eerste aanbeveling voor verder onderzoek bestaat uit het ontwikkelen van heuristische en metaheuristische om zo de complexiteit van het probleem te vergroten en realistischer te maken. Op die manier kan het pollution-routing model beter toegepast worden in de praktijk.

Ten tweede kan het model uitgebreid worden door rekening te houden met de mogelijkheid om een heterogene vloot voertuigen te gebruiken of een gemengde vloot. De flexibiliteit door het gebruik van verschillende voertuigen kan een vermindering in energieconsumptie betekenen maar ook in de totale kost.

Ten derde wordt in dit eindwerk geen rekening gehouden met tijdsvensters van klanten. In de praktijk specificeren klanten tijdsvensters waarbinnen de bediening dient aan te vangen. Het is dan ook interessant om de invloed van deze tijdsvensters op de kost te bepalen.

Ten slotte kan een andere uitbreiding rekening houden met de tijdsafhankelijke versie van het probleem zoals in Figliozzi (2011). Congestie en de pogingen tot het vermijden van filevormende wegen kunnen hierdoor opgenomen worden in de rittenplanning waardoor het model praktisch relevanter wordt. In omgevingen met congestie is de snelheid immers lager dan 40 km/u, versnellingen en vertragingen veroorzaakt door frequent stoppen hebben een belangrijke invloed op de uitstoot van pollutanten.

Aangezien het onderzoek omtrent rittenplanningsproblemen met milieudoelstellingen zeer recent is, zijn er nog veel opportuniteiten om verschillende parameters te onderzoeken.

Hoofdstuk 6: Algemene conclusies

De transportsector veroorzaakt een aantal externe effecten door de uitstoot van emissies. Ze zorgen voor toenemende luchtvervuiling en voor de opwarming van de aarde. Externe kosten kunnen in rekening gebracht worden door ze op te nemen in de rittenplanning.

Traditionele rittenplanningsproblemen zoals het handelsreizigersprobleem, het rittenplanningsprobleem met capaciteitsrestricties en het rittenplanningsprobleem met tijdsvensters formuleren meestal één doelstelling. In de praktijk worden echter vaak naast het minimaliseren van kosten, reistijd of afstand meerdere doelstellingen gelijktijdig opgenomen. In het derde hoofdstuk werd nagegaan hoe meerdere doelstellingen opgenomen worden in rittenplanningsproblemen. Ze worden voornamelijk op drie manieren gebruikt. Een eerste manier breidt een klassiek academisch probleem uit, zoals bijvoorbeeld het rittenplanningsprobleem met capaciteitsrestricties, zodat de praktische toepassing vergroot kan worden. Nieuwe doelstellingen worden toegevoegd aan het reeds bestaande probleem. Een tweede soort veralgemeent klassieke problemen door doelstellingen toe te voegen in plaats van één of meerdere beperkingen. Een laatste soort onderzoekt reële gevalsstudies.

Verschillende technieken worden voorgesteld om problemen met meerdere doelstellingen op te lossen. De ideale vector van doelstellingen wordt gedefinieerd door elke doelfunctie individueel te optimaliseren. Meestal zijn de verschillende doelfuncties in strijd met elkaar waardoor een ideale doelstelling vector niet bereikbaar is. In plaats daarvan moeten er gekeken worden naar een afweging van de doelstellingen. Het doel bij het oplossen van een multi-objective probleem (MOP) is het vinden van een Pareto-optimale set. Een populaire methode die gebruikt wordt bij een MOP is de gewogen lineaire aggregatie. Bij deze techniek worden gewichten gegeven aan iedere doelfunctie. Wanneer een doelfunctie belangrijker is, krijgt deze een zwaarder gewicht. Een andere benadering is de hiërarchische methode waarbij iedere doelfunctie een prioriteitswaarde toegewezen krijgt. De problemen worden opgelost volgens dalende prioriteit.

Vervolgens werd in hoofdstuk vier een antwoord gegeven op de tweede deelvraag: "Welke modellen bestaan er om emissies op te nemen in de rittenplanning?". De rittenplanningsproblemen met milieudoelstellingen zijn in drie categorieën op te splitsen. In een eerste categorie wordt de kostenfunctie aangepast zodat milieuaspecten opgenomen kunnen worden. Hier wordt gefocust op het energiegebruik of het brandstofverbruik. Verder gebruikt een tweede soort voertuigen met alternatieve brandstoffen. Een laatste groep bestaat uit modellen waarin de uitstoot van emissies in rekening gebracht worden. In deze groep worden de emissies effectief berekend en geminimaliseerd.

In het eerste deel van de praktijkstudie werd gekeken naar de invloed van het transport op het milieu. Het wegtransport stoot verschillende pollutanten uit maar koolstofdioxide CO₂ is het belangrijkste bijproduct van verbranding van fossiele brandstoffen. De uitstoot van dit pollutant neemt ook in dezelfde mate toe als het energiegebruik van een voertuig en is dus rechtstreeks gerelateerd aan de transportactiviteit. De schade veroorzaakt door de uitstoot van CO₂ is meestal niet van monetaire aard. De uitstoot draagt bij tot de opwarming van de aarde maar het is niet eenvoudig om een kost in euro te geven aan deze opwarming. Daarom dient de schade omgerekend te worden naar geldeenheden. In de literatuur worden verschillende kostwaarderingen gegeven voor CO₂. In de voorbeelden van de praktijkstudie werd een kost van €20/ ton CO₂ gehanteerd.

In het tweede deel van de praktijkstudie werd het pollution-routing problem van Bektaş en Laporte (2011) dieper bestudeerd om zo een antwoord te geven op de derde en vierde deelvraag van de eindverhandeling: "Welke parameters bepalen de uitstoot van emissies bij wegtransport en hoe worden de parameters opgenomen in een doelstelling?". De totale verbruikte energie bestaat uit een ladingsafhankelijke en snelheidsafhankelijk component. De energie afhankelijk van de lading wordt beïnvloed door het gewicht van het voertuig en de lading, de afstand en componenten zoals de versnelling, gravitatieconstante, weghoek en de rolweerstandscoefficient. De energie afhankelijk van de snelheid wordt beïnvloed door de snelheid en de afstand en componenten zoals de luchtweerstand, het frontale oppervlak van het voertuig en de luchtdensiteit. Voor iedere boog (i,j) wordt de hoeveelheid energie berekend om te weten hoeveel liter brandstof verbruikt wordt. Aan de hand van het aantal verbruikte liter brandstof kan de hoeveelheid uitstoot CO₂ berekend worden.

Het eerste voorbeeld van de praktijkstudie bestaat uit een netwerk van vier knooppunten. In de scenario's worden achtereenvolgens de verschillende routes vergeleken op basis van de afstandminimaliserende (P_d), energieminimaliserende (P_e), gewogen ladingminimaliserende (P_w) en kostenminimaliserende (P_c) doelstelling voor zowel een benzine- als een dieselmotor. De minimaliserende kostenfunctie wordt bepaald door de snelheid van de energieminimaliserende oplossing zo te zetten dat de kost minimaal is. De doelstelling P_c geeft op die manier de laagste totale kost maar de hoogste milieu- en operationele kost. De kost van de bestuurder blijkt dus een dominerende rol te spelen. Het tweede voorbeeld bestaat uit een regionaal netwerk van vijf knooppunten. Op die manier kan gekeken worden of het kiezen van een route op basis van de energieminimaliserende doelstelling ook effect heeft op kleinere afstanden.

Op basis van beide voorbeelden kunnen een aantal conclusies getrokken worden. Zowel de lading als de snelheid hebben een grote invloed op de verbruikte energie en de kosten. Het eerst afleveren van de zwaarste lading geeft niet noodzakelijk de energieminimaliserende oplossing aangezien de afstand waarover de lading gedragen moet worden ook een invloed heeft. Het is dus belangrijk om rekening te houden met de gedragen lading (ton/km). Zelfs op kleinere afstand blijkt dat de hoeveelheid lading een impact heeft op de keuze van de route. Snelheid speelt ook een belangrijke rol in het kiezen van de optimale energieminimaliserende oplossing. Door sneller te rijden stijgt de emissie- en brandstofkost maar daalt de bestuurderskost aangezien het traject sneller wordt afgelegd.

De technologische vooruitgang van de motorefficiëntie heeft geen effect op de verbruikte energie maar wel op het brandstofverbruik. Het brandstofverbruik daalt indien de efficiëntie stijgt waardoor ook de emissies en de brandstof- en emissiekost dalen. De oplossing van de energieminimaliserende doelfunctie zal dus hetzelfde blijven maar die van de kostenminimaliserende doelfunctie zal veranderen.

Verder kan ook besloten worden dat naarmate meer klanten aan het netwerk toegevoegd worden het probleem steeds complexer wordt. Wanneer rekening gehouden wordt met de energie is de richting van de route ook van belang en bedraagt het aantal routecombinaties uit $n!$ routes. Exacte oplossingsmethoden zijn bijgevolg niet meer mogelijk. Benaderingsmethoden zoals heuristieken geven een oplossing omdat ze het probleem sneller kunnen oplossen maar ze leiden niet altijd tot de optimale oplossing.

Ten slotte werden nog enkele aanbevelingen gegeven voor verder onderzoek. Aangezien het onderzoeksgebied van rittenplanningsproblemen met milieudoelstellingen recent is, zijn er nog talrijke opportuniteiten om te onderzoeken. De invloed van een heterogene vloot, tijdsvensters en congestie zijn enkele suggesties die nog onderzocht dienen te worden. In dit onderzoek werd enkel gefocust op de uitstoot van CO_2 aangezien deze pollutant rechtstreeks gerelateerd is aan het brandstofverbruik. De berekening van de uitstoot van andere pollutanten vraagt om meer gegevens en is complexer om te modelleren in een rittenplanningsprobleem. Ook hier zijn dus nog opportuniteiten om te onderzoeken.

Lijst der geraadpleegde werken

Akçelik, R., & M., B. (2003). Operating cost, fuel consumption, and emission models in aaSIDRA and aaMOTION. *25th Conference of Australian Institutes of Transport Research*. Adelaide, Australia: University of Adelaide.

Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B* .

Bowerman, R., Hall, B., & Calamai, P. (1995). A multi-objective optimization approach to urban school bus routing: Formulation and solution method. *Transportation Research Part A* , 29, 123-197.

Bräysy, O. (2001). Local search and variable neighborhood search algorithms for the vehicle routing problem with time windows. Doctoral dissertation, University of Vaasa, Finland.

Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005a). Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms. *Transportation Science* , 39 (1), 104-118.

Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005b). Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part II: Metaheuristics. *Transportation Science* , 29 (1), 119-139.

Chitty, D., & Hernandez, M. (2004). A hybrid ant colony optimisation technique for dynamic vehicle routing. *Lecture Notes in Computer Science* , 3102, 48-59.

Clarke, G., & Wright, J. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research* , 12, 568-581.

Cordeau, J.-F., Laporte, G., Savelsbergh, M., & Vigo, D. (2007). Vehicle Routing. In C. Barnhart, & G. Laporte, *Handbooks in Operations Research and Management Science: Transportation* (Vol. 14, pp. 367-428). North Holland: Elsevier B.V.

Cozijnsen, J. (2010). *Analyse van de CO2-markt*. Opgeroepen op 2 mei 2012, van Emissierechten: www.emissierechten.nl

Dantzig, G., & Ramser, J. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science* , 6 (1), 80-91.

Desrochers, M., Lenstra, J., Savelsbergh, M., & Soumis, F. (1988). Vehicle Routing with Time Windows: Optimization and Approximation. In B. Golden, & A. Assad, *Vehicle Routing: Methods and Studies* (pp. 65-84). Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland).

Doerner, K., Focke, A., & Gutjahr, W. (2006). Multicriteria tour planning for mobile healthcare facilities in a developing country. *European Journal of Operational Research* .

Duysinx, P., Germain, A., & Heyen, G. (2009). *Infopagina's Ecoscore*. Liège: Université de Liège.

Ecoscore. (2011, 29 september). *Hoe bereken je de CO2-uitstoot uit het brandstofverbruik?* Opgeroepen op 22 april 2012, van Ecoscore: <http://www.ecoscore.be/hoe-bereken-je-de-co2-uitstoot-uit-het-brandstofverbruik>

Engineeringtoolbox. (2012). Opgeroepen op 24 april 2012, van www.engineeringtoolbox.com: http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html

Environmental Protection Agency, U.S. (2009). *Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 - 2007*. EPA 430-R-09-004.

Environmental Protection Agency, U.S. (2010). *MOVES 2010 (Motor Vehicle Emission Simulator-User Guide Version)*. EPA.

Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2011). A Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part E*.

Europese Commissie (2007). *Routekaart voor hernieuwbare energie*. Opgeroepen op 4 mei 2012, van http://europa.eu/legislation_summaries/energy/renewable_energy/l27065_nl.htm

Europese Commissie (2009). *Panorama of Transport*. Luxemburg: Bureau voor officiële publicaties van Europese Gemeenschappen.

Europese Commissie (2011). *Witboek - Stappenplan voor een interne Europese vervoersruimte - werken aan een concurrerend en zuinig vervoerssysteem*. Brussel: Europese Commissie.

Feillet, D., Dejax, P., & Gendreau, M. (2005). Traveling Salesman Problems with Profits. *Transportation Science*, 39 (2), 188-205.

Figliozzi, M. (2010). Emissions Minimization Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Record 2010*.

Figliozzi, M. (2011). The impacts of congestion on time-definitive urban freight distribution networks CO2 emission levels: Results from a case study in Portland, Oregon. *Transportation Research*, 19, 766-778.

Freshfields Bruckhaus Deringer LLP (2011). *European Commission proposes a new CO2 tax and an amended energy tax*.

Friedrich, R., & Bickel, P. (2001). *Environmental External Costs of Transport*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F. (1997). The covering tour problem. *Operations Research*, 45, 568-576.

Gillett, B., & Miller, L. (1974). A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. *Operations Research*, 21, 340-349.

- Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introduction to Operations Research*. New York: McGraw-Hill .
- INFRAS, & IWW. (2000). *External costs of Transport - Accidents, Environmental and Congestion Costs in Western Europe*. Zürich/Karlsruhe: UIC.
- Jozefowicz, N., Semet, F., & Talbi, E.-G. (2002). Parallel and hybrid models for multi-objective optimization: Application to the vehicle routing problem. *Lecture Notes in Computer Science* , 2439, 271-280.
- Jozefowicz, N., Semet, F., & Talbi, E.-G. (2006). Enhancements of NSGA II and its application to the vehicle routing problem with route balancing. *Lecture Notes in Computer Science* , 3871, 131-142.
- Jozefowicz, N., Semet, F., & Talbi, E.-G. (2008). Multi-objective vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research* , 189, 293-309.
- Kara, I., Kara, B., & Yetis, M. (2007). Energy Minimizing Vehicle Routing Problem. (A. Dress, Y. Xu, & B. Zhu, Red.) *LNCS* , 62-71.
- Lacomme, P., Prins, C., & Sevaux, M. (2003). Multiobjective Capacitated Arc Routing. *LNCS* , 2632, 550-564.
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research* , 59, 345-358.
- Laporte, G., & Osman, I. (1995). Routing problems: a bibliography. *Annals of Operations Research* , 61, 227-262.
- Laporte, G., Nobert, Y., & Desrochers, M. (1985). Optimal routing under capacity and distance restrictions. *Operations Research* , 33, 1050-1073.
- Lawler, E., Lenstra, J., Rinnooy Kan, A., & Shmoys, D. (1987). *The Traveling Salesman Problem*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Lee, L., Tan, K., Ou, K., & Chew, Y. (2003). Vehicle capacity planning system (VCPS): A case study on vehicle routing problem with time windows. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics: Part A* , 33, 169-178.
- Lee, T.-R., & Ueng, J.-H. (1998). A study of vehicle routing problems with load-balancing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics* , 29 (10), 646-658.
- Li, W. (2005). Finding Pareto-Optimal Set by Merging Attractors for a Bi-objective Traveling Salesmen Problem. *Lecture Notes in Computer Science* , 797-810.
- Lin, S. (1965). Computer solutions of the travelling salesman problem. *Bell System Technical Journal* , 44, 2245-2269.

- MacKay, D. J. (2009). *Sustainable energy - without hot air*. Cambridge: UIT Cambridge Ltd.
- Malandraki, C., & Daskin, M. (1992). Time-dependent vehicle-routing problems - formulations, properties and heuristic algorithms. *Transportation Science*, 26 (3), 185-200.
- Mima, S., & Criqui, P. (2003). The future of fuel cells in a long term inter-technology competition network. In A. Avadikyan, P. Cohendet, & J.-A. Heraud, *The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies* (pp. 43-77). Berlin/Heidelberg: Springer.
- MIRA (2010). *Milieurapport Vlaanderen, Achtergronddocument 2010, Transport*. Vlaamse Milieumaatschappij.
- Murata, T., & Itai, R. (2007). Multi-objective vehicle routing problems using two-fold EMO algorithm to enhance solution similarity on non-dominated set. *C.A. 3410*, pp. 201-215. Guanajanto, Mexico: Springer.
- Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2000). *COPERT III: Computer programme to calculate emissions from road transport - Methodology and emission factors (Version 2.1)*. Copenhagen: European Environment Agency.
- Ombuki, B., Ross, B., & Hanshar, F. (2006). Multi-objective genetic algorithm for vehicle routing problem with time windows. *Applied Intelligence*, 24, 17-30.
- Özceylan, E., Kiran, M., & Atasagun, Y. (2011). A New Hybrid Heuristic Approach for Solving Green Traveling Salesman Problem. *41st International Conference on Computers & Industrial Engineering*, (pp. 720-725). Los Angeles, USA.
- Palmer, A. (2008). *The Development of an Integrated Routing and Carbon Dioxide Emissions Model for Goods Vehicles*. Ph.D Thesis Cranfield University, November 2007.
- Park, Y., & Koelling, C. (1986). A solution of vehicle routing problems in multiple objective environment. *Engineering Costs and Production Economics*, 10, 121-132.
- Payscale. (2012). Opgeroepen op 22 april 2012, van http://www.payscale.com/research/UK/Job=Truck_Driver%2c_Heavy_%2f_Tractor-Trailer/Hourly_Rate
- Savelsbergh, M., & Sol, M. (1995). The general pickup and delivery problem. *Transportation Science*, 29 (1), 17-29.
- Schaffer, J. (1985). Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. *Genetic Algorithms and their Applications, Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms*, 93-100.
- Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2012). *The Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations*. Kaiserslautern, Germany: University of Kaiserslautern.

Solomon, M. M., & Desrosiers, J. (1988). Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems. *Transportation Science* , 22 (1), 1-13.

Tan, K., Chew, Y., & Lee, L. (2006). A hybrid multi-objective evolutionary algorithm for solving truck and trailer vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research* , 172, 855-885.

VAB. (sd). *Brandstofprijzen in Europa*. Opgeroepen op 23 april 2012, van VAB: <http://www.vab.be/nl/viavab/verkeersinfo/europa/brandstofprijzen/default.aspx>

Van der Veen, J.A.A. (1992). Solvable Cases of the Traveling Salesman Problem with Various Objective Functions. Ph.D.-thesis University of Groningen.

Veurman J., Wilmink, I., Gense R., Baarbé H. (2002) Effecten van congestie op brandstofverbruik en luchtkwaliteit. Verkeerskunde nr. 2-2002.

Vlaamse overheid (2010). *Ontwerp milieubeleidsplan 2011-2015*. Departement Leefmilieu, Natuur en Energie. Brussel: Vlaamse overheid.

Vlaamse overheid (2006). *Vlaams Klimaatbeleidsplan 2006-2012*. Departement Leefmilieu, Natuur & Energie. Brussel: Vlaamse overheid.

Wren, A. (1971). *Computers in Transport Planning and Operation*. London: Ian Allan.

Wren, A., & Holliday, A. (1972). Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points. *Operational Research Quarterly* , 23, 333-344.

Wygonik, E. & Goodchild, A. (2010) Using a GIS-based emissions minimization vehicle routing problem with time windows (EVRPTW) model to evaluate CO₂ emissions and cost trade-offs in a case study of an urban delivery system.

Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I., & Xu, Y. (2011). Development of a Fuel Consumption Optimization Model for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research* .

Zhenyu, Y., Linghai, Z., Lishan, K., & Guangming, L. (2003). A New MOEA for Multi-objective TSP and Its Convergence Property Analysis. *Lecture Notes in Computer Science* , 342-354.

Bijlagen

- Bijlage 1: Vraagpatroon 1
- Bijlage 2: Vraagpatroon 2
- Bijlage 3: Vraagpatroon 3
- Bijlage 4: Vraagpatroon 4
- Bijlage 5: Vraagpatroon 5

Bijlage 1: Vraagpatroon 1

Route	Afstand	Energie lading	Energie snelheid	Totale energie	Totale kost
(0,1,2,3,4,0)	107,7	13,4492	7,7827	21,2319	46,2153
(0,4,3,2,1,0)	107,7	15,8990	7,7827	23,6817	47,2873
(0,1,3,2,4,0)	134,5	16,0162	9,7193	25,7355	54,8859
(0,4,2,3,1,0)	134,5	20,6351	9,7193	30,3544	56,9070
(0,1,4,2,3,0)	151,7	18,5627	10,9622	29,5249	60,8441
(0,3,2,4,1,0)	151,7	22,7756	10,9622	33,7378	62,6875
(0,1,4,3,2,0)	147	17,4591	10,6226	28,0817	59,0375
(0,2,3,4,1,0)	147	22,5984	10,6226	33,2210	61,2863
(0,1,2,4,3,0)	146,2	17,6021	10,5648	28,1669	58,8749
(0,3,4,2,1,0)	146,2	22,2374	10,5648	32,8021	60,9031
(0,1,3,4,2,0)	168,3	19,0655	12,1618	31,2272	65,7390
(0,2,4,3,1,0)	168,3	26,7963	12,1617	38,9581	69,1217
(0,2,3,1,4,0)	124,5	18,0804	8,9967	27,0771	52,9730
(0,4,1,3,2,0)	124,5	15,8459	8,9967	24,8426	51,9952
(0,3,2,1,4,0)	102,4	13,8757	7,3997	21,2754	44,9094
(0,4,1,2,3,0)	102,4	14,0283	7,3997	21,4280	44,9761
(0,2,4,1,3,0)	163	25,8098	11,7788	37,5886	67,1975
(0,3,1,4,2,0)	163	18,6077	11,7788	30,3865	64,0460
(0,2,1,4,3,0)	136,2	18,3842	9,84212	28,2264	56,4009
(0,3,4,1,2,0)	136,2	18,7303	9,84212	28,5724	56,5523
(0,2,1,3,4,0)	119	16,5530	8,5992	25,1522	50,7558
(0,4,3,1,2,0)	119	15,8745	8,5992	24,4737	50,4588
(0,3,1,2,4,0)	123,7	14,9589	8,9389	23,8978	51,3818
(0,4,2,1,3,0)	123,7	18,7494	8,9389	27,6882	53,0404

Bijlage 2: Vraagpatroon 2

Route	Afstand	Energie lading	Energie snelheid	Totale energie	Totale kost
(0,1,2,3,4,0)	107,7	14,5937	7,7827	22,3764	46,7161
(0,4,3,2,1,0)	107,7	14,7545	14,7545	22,5372	46,7865
(0,1,3,2,4,0)	134,5	18,2180	9,7193	27,9373	55,8494
(0,4,2,3,1,0)	134,5	18,4333	9,7193	28,1526	55,9436
(0,1,4,2,3,0)	151,7	23,6258	10,9622	34,5880	63,0595
(0,3,2,4,1,0)	151,7	17,7125	10,9622	28,6747	60,4721
(0,1,4,3,2,0)	147	22,1188	10,6226	32,7414	61,0765
(0,2,3,4,1,0)	147	17,9387	10,6226	28,5613	59,2474
(0,1,2,4,3,0)	146,2	18,7466	10,5648	29,3114	59,3756
(0,3,4,2,1,0)	146,2	21,0929	10,5648	31,6576	60,4023
(0,1,3,4,2,0)	168,3	24,8861	12,1618	37,0478	68,2858
(0,2,4,3,1,0)	168,3	20,9757	12,1618	33,1375	66,5748
(0,2,3,1,4,0)	124,5	15,8786	8,9967	24,8753	52,0095
(0,4,1,3,2,0)	124,5	18,0477	8,9967	27,0444	52,9587
(0,3,2,1,4,0)	102,4	12,7312	7,3997	20,1309	44,4086
(0,4,1,2,3,0)	102,4	15,1728	7,3997	22,5725	45,4770
(0,2,4,1,3,0)	163	20,7468	11,7788	32,5256	64,9820
(0,3,1,4,2,0)	163	23,6707	11,7788	35,4495	66,2615
(0,2,1,4,3,0)	136,2	17,2397	9,8422	27,0819	55,9001
(0,3,4,1,2,0)	136,2	19,8748	9,8422	29,7169	57,0531
(0,2,1,3,4,0)	119	15,4085	8,5992	24,0078	50,2549
(0,4,3,1,2,0)	119	17,0190	8,5992	25,6182	50,9596
(0,3,1,2,4,0)	123,7	16,1034	8,9389	25,0423	51,8826
(0,4,2,1,3,0)	123,7	17,6049	8,9389	26,5437	52,5396

Bijlage 3: Vraagpatroon 3

Route	Afstand	Energie lading	Energie snelheid	Totale energie	Totale kost
(0,1,2,3,4,0)	107,7	15,6292	7,7827	23,4112	47,1692
(0,4,3,2,1,0)	107,7	13,7190	7,7827	21,5017	46,3334
(0,1,3,2,4,0)	134,5	17,1825	9,7193	26,90186	55,3963
(0,4,2,3,1,0)	134,5	19,4688	9,7193	29,1881	56,3967
(0,1,4,2,3,0)	151,7	24,6613	10,9622	35,6235	63,5126
(0,3,2,4,1,0)	151,7	16,6770	10,9622	27,6392	60,0190
(0,1,4,3,2,0)	147	21,0833	10,6226	31,7060	60,6234
(0,2,3,4,1,0)	147	18,9742	10,6226	29,5968	59,7005
(0,1,2,4,3,0)	146,2	23,4009	10,5648	33,9657	61,4122
(0,3,4,2,1,0)	146,2	16,4386	10,56478	27,0033	58,3657
(0,1,3,4,2,0)	168,3	20,2318	12,1618	32,3935	66,2493
(0,2,4,3,1,0)	168,3	25,6300	12,1618	37,7918	68,6113
(0,2,3,1,4,0)	124,5	16,9141	8,9967	25,9108	52,4626
(0,4,1,3,2,0)	124,5	17,0122	8,9967	26,0089	52,5056
(0,3,2,1,4,0)	102,4	11,6957	7,3997	19,0954	43,9555
(0,4,1,2,3,0)	102,4	16,2083	7,3997	23,6080	45,9300
(0,2,4,1,3,0)	163	26,9761	11,7788	38,7550	67,7078
(0,3,1,4,2,0)	163	17,4414	11,7788	29,2202	63,5357
(0,2,1,4,3,0)	136,2	22,0085	9,8422	31,8506	57,9867
(0,3,4,1,2,0)	136,2	15,1060	9,8422	24,9482	54,9665
(0,2,1,3,4,0)	119	17,7193	8,5992	26,3186	51,2661
(0,4,3,1,2,0)	119	14,7082	8,5992	23,3074	49,9485
(0,3,1,2,4,0)	123,7	13,7926	8,9389	22,7315	50,8715
(0,4,2,1,3,0)	123,7	19,9157	8,9389	28,8545	53,5507

Bijlage 4: Vraagpatroon 4

Route	Afstand	Energie lading	Energie snelheid	Totale energie	Totale kosten
(0,1,2,3,4,0)	107,7	17,2370	7,7827	25,0197	47,8727
(0,4,3,2,1,0)	107,7	12,1113	7,7827	19,8940	45,6299
(0,1,3,2,4,0)	134,5	21,2645	9,7193	30,9838	57,1824
(0,4,2,3,1,0)	134,5	15,3867	9,7193	25,1060	54,6105
(0,1,4,2,3,0)	151,7	20,5792	10,9622	31,5414	61,7264
(0,3,2,4,1,0)	151,7	20,7591	10,9622	31,7213	61,8051
(0,1,4,3,2,0)	147	19,4756	10,6226	30,0982	59,9199
(0,2,3,4,1,0)	147	20,5819	10,6226	31,2045	60,4040
(0,1,2,4,3,0)	146,2	21,7932	10,5648	32,3580	60,7087
(0,3,4,2,1,0)	146,2	18,0463	10,5648	28,6111	59,0692
(0,1,3,4,2,0)	168,3	21,8395	12,1618	34,0013	66,9528
(0,2,4,3,1,0)	168,3	24,0222	12,1618	36,1840	67,9079
(0,2,3,1,4,0)	124,5	20,0969	8,9967	29,0936	53,8553
(0,4,1,3,2,0)	124,5	13,8294	8,9967	22,8261	51,1129
(0,3,2,1,4,0)	102,4	15,8922	7,3997	23,2919	45,7917
(0,4,1,2,3,0)	102,4	12,0118	7,3997	19,4115	44,0938
(0,2,4,1,3,0)	163	23,7933	11,7788	35,5721	66,3151
(0,3,1,4,2,0)	163	20,6242	11,7788	32,4030	64,9284
(0,2,1,4,3,0)	136,2	20,4007	9,8422	30,2429	57,2832
(0,3,4,1,2,0)	136,2	16,7138	9,8422	26,5560	55,6699
(0,2,1,3,4,0)	119	19,3271	8,5992	27,9263	51,9696
(0,4,3,1,2,0)	119	13,1004	8,5992	21,6997	49,2450
(0,3,1,2,4,0)	123,7	19,1499	8,9389	28,0888	53,2157
(0,4,2,1,3,0)	123,7	14,5583	8,9389	23,4972	51,2066

Bijlage 5: Vraagpatroon 5

Route	Afstand	Energie lading	Energie snelheid	Totale energie	Totale kosten
(0,1,2,3,4,0)	107,7	15,2273	7,7827	23,0100	46,9934
(0,4,3,2,1,0)	107,7	14,1210	7,7827	21,9036	46,5092
(0,1,3,2,4,0)	134,5	18,1703	9,7193	27,8896	55,8285
(0,4,2,3,1,0)	134,5	18,4810	9,7193	28,2003	55,9644
(0,1,4,2,3,0)	151,7	21,8572	10,9622	32,8194	62,2856
(0,3,2,4,1,0)	151,7	19,4810	10,9622	30,4432	61,2459
(0,1,4,3,2,0)	147	20,0342	10,6226	30,6568	60,1643
(0,2,3,4,1,0)	147	20,0233	10,6225	30,6459	60,1596
(0,1,2,4,3,0)	146,2	20,3857	10,5648	30,9505	60,0929
(0,3,4,2,1,0)	146,2	19,4538	10,5648	30,0186	59,6851
(0,1,3,4,2,0)	168,3	21,5057	12,1618	33,6675	66,8067
(0,2,4,3,1,0)	168,3	24,3560	12,1618	36,5178	68,0539
(0,2,3,1,4,0)	124,5	17,7425	8,9967	26,7392	52,8251
(0,4,1,3,2,0)	124,5	16,1838	8,9967	25,1805	52,1431
(0,3,2,1,4,0)	102,4	13,5487	7,3997	20,9484	44,7663
(0,4,1,2,3,0)	102,4	14,3553	7,3997	21,7550	45,1192
(0,2,4,1,3,0)	163	24,3315	11,7788	36,1103	66,5506
(0,3,1,4,2,0)	163	20,0860	11,7788	31,8648	64,6929
(0,2,1,4,3,0)	136,2	19,5083	9,8422	29,3504	56,8927
(0,3,4,1,2,0)	136,2	17,6062	9,8422	27,4484	56,0604
(0,2,1,3,4,0)	119	17,2520	8,5992	25,8512	51,0616
(0,4,3,1,2,0)	119	15,1755	8,5992	23,7748	50,1530
(0,3,1,2,4,0)	123,7	16,0012	8,9389	24,9401	51,8379
(0,4,2,1,3,0)	123,7	17,7071	8,9389	26,6459	52,5843

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Opnemen van milieudoelstellingen in rittenplanning

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur-operationeel management en logistiek**

Jaar: **2012**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Thyssen, Anja

Datum: **31/05/2012**