

2013•2014  
FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN  
*master in de toegepaste economische wetenschappen:  
handelsingenieur*

Masterproef  
Rittenplanning voor voertuigen met alternatieve brandstoffen

Promotor :  
Prof. dr. An CARIS

Copromotor :  
dr. Kris BRAEKERS

Jeroen Corstjens  
*Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste  
economische wetenschappen: handelsingenieur*

2013•2014

FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE  
WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:  
handelsingenieur*

Masterproef

Rittenplanning voor voertuigen met alternatieve  
brandstoffen

Promotor :  
Prof. dr. An CARIS

Copromotor :  
dr. Kris BRAEKERS

Jeroen Corstjens

*Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste  
economische wetenschappen: handelsingenieur*



## Woord vooraf

---

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn opleiding Handelsingenieur in de Bedrijfseconomische Wetenschappen, afstudeerrichting operationeel management en logistiek met optie finance, aan de Universiteit Hasselt.

Het schrijven van deze eindverhandeling was niet mogelijk geweest zonder de hulp van een aantal mensen. Ik wil daarom langs deze weg een dankwoord aan hen richten.

Allereerst gaat mijn dank uit naar mijn promotor Dr. An Caris voor de deskundige begeleiding, advies en opbouwende feedback gedurende dit academiejaar. Daarnaast gaat mijn dank ook uit naar Dr. Kris Braekers voor onder meer de raadgevingen over het softwareprogramma AIMMS. Tot slot wil ik heel graag mijn ouders en vrienden bedanken voor hun steun en vertrouwen gedurende mijn hele studieloopbaan.

Jeroen Corstjens

Gellik, mei 2014

## Samenvatting

---

Wanneer gesproken wordt over het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen, wordt de transportsector vaak gezien als een van de moeilijkste problemen, want deze is verantwoordelijk voor een aanzienlijk deel van het globale energieverbruik en dus ook voor de daaraan gerelateerde emissies. Het is om deze reden belangrijk dat de transportindustrie eender welke strategie ter vermindering van de schadelijk emissies mee moet uitvoeren om een daadwerkelijke verbetering te verkrijgen.

Op overheidsniveau werden hieromtrent reeds in vele landen wetgevende initiatieven genomen zowel op korte als lange termijn. Deze wetgeving heeft vaak betrekking op het stimuleren van het gebruik van alternatieve brandstoffen, zoals elektriciteit, waterstof, biobrandstoffen en aardgas. Daarnaast wordt voor het goederenvervoer ook naar alternatieve vervoersmogelijkheden gekeken, zoals over het spoor of via het water, en dit voornamelijk voor transport over lange afstand. Het is belangrijk dat nu actie ondernomen wordt, aangezien de hernieuwbare brandstoffen vele nieuwe investeringen vereisen die jaren in beslag nemen. Daarom zullen de beslissingen die vandaag genomen worden bepalend zijn voor de transportsector op lange termijn.

Het in beschouwing nemen van alternatieve brandstoffen leidt ook tot nieuwe theoretische modellen en inzichten, zoals bij het rittenplanningsmodel. Traditioneel wordt in dit model gezocht naar een set van ritten die elke klant exact een keer bezoekt en dit zodanig dat de transportkosten geminimaliseerd worden. De integratie van hernieuwbare brandstoffen brengt enkele aanpassingen mee zoals het opnemen van tankstations voor alternatieve brandstoffen. In de literatuur zijn tot nog toe slechts twee modellen gekend die dergelijke aanpassingen doorgevoerd hebben, namelijk het 'Green Vehicle Routing Problem' van Erdogan & Miller-Hooks (2012) en 'The Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations' van Schneider, Stenger & Goeke (2012). Het 'Green Vehicle Routing Problem' was het eerste model waarbij rekenschap gegeven werd aan voertuigen op alternatieve brandstoffen door het beperkte rijbereik van dergelijke voertuigen in beschouwing te nemen en de mogelijkheid op te nemen om tijdens de route een voertuig bij te tanken bij zogenaamde 'alternative fuel stations'. 'The Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations' bouwt verder op dit model door tijdvensters, variabele laadtijden en vrachtbeperkingen te introduceren. Dit model is wel uitsluitend gericht elektrische voertuigen.

In het praktijkonderzoek werden een aantal experimenten uitgevoerd op laatstgenoemde model en dit aan de hand van zes scenario's. In deze scenario's wordt gekeken naar het effect van verschillende types van laadstations waarmee de elektrische batterij kan opgeladen worden, evenals de plaatsing van zogenaamde snellaadstations en de invloed van de vrachtlading op het batterijverbruik.

Uit de resultaten blijkt wanneer verschillende types laadstations in beschouwing genomen worden, de gemiddelde afgelegde afstand zal toenemen, in vergelijking met het scenario met uitsluitend snellaadstations. De grootste toename in afstand is waar te nemen wanneer geen centraal gelegen

publiek snellaadstation beschikbaar is, maar deze installatie bij het depot geplaatst wordt. Het overgrote merendeel van de onderzochte replicaties vond het niet opportuun gebruik te maken van de laadinstallatie op het depot. Wanneer het snellaadstation echter meer centraal gelegen is op een publiek laadpunt, is de toename in de gemiddelde afstand minder groot.

Om het model nog dichter bij de realiteit te brengen werd vervolgens een nieuwe variabele geïntroduceerd, namelijk de goederenstroom tussen twee punten. Op die manier kan een variabel verbruiksniveau per kilometer bepaald worden en waardoor meer optimaal gebruik gemaakt kan worden van de batterijen van elektrische voertuigen. De eerste drie scenario's werden nog eens herhaald, maar dan nu met een variabel batterijverbruiksniveau. Uit alle drie scenario's blijkt dat de gemiddelde afgelegde afstand hierdoor korter wordt. Bovendien daalt ook het gemiddeld aantal tussenstops bij laadstations waar de batterij wordt opgeladen.

De integratie van alternatieve brandstoffen in rittenplanningsmodellen brengen dus een aantal aanpassingen mee die de modellen complexer maken, maar maken het voor bedrijven met alternatieve wagenparken wel mogelijk om deze voertuigen optimaal in te zetten in de dienstverlening.

## Inhoudsopgave

---

Woord vooraf .....	I
Samenvatting.....	II
Inhoudsopgave .....	IV
Lijst van tabellen.....	V
Lijst van figuren .....	VI
Hoofdstuk 1: Introductie .....	1
1.1.    Probleemstelling.....	1
1.2.    Centrale onderzoeksvraag.....	3
1.3.    Ecologisch rijden.....	4
1.4.    Alternatieve brandstoffen .....	4
1.5.    Barrières voor alternatieve brandstoffen en technologieën .....	7
Hoofdstuk 2: Planningsmodellen voor alternatieve brandstoffen.....	9
2.1.    Rittenplanningsmodellen .....	9
2.1.1    The pollution routing problem .....	11
2.1.2    A green vehicle routing problem.....	13
2.1.3    The electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations ....	18
2.2.    Allocatiemodellen.....	21
2.3.    Conclusie .....	27
Hoofdstuk 3: Praktijkstudie .....	29
3.1    Introductie.....	29
3.2    Modelformulering .....	29
3.3    Beschrijving van de gegevens.....	30
3.4    Scenario 1: Uitsluitend snellaadstations .....	35
3.5    Scenario 2: Verschillende types van laadstations .....	41
3.5.1    Scenario 2.1: Snellaadstation bij depot.....	43
3.5.2    Scenario 2.2: Snellaadstation bij centraal gelegen publiek laadstation.....	48
3.6    Scenario 3: Invloed vrachtlading op batterijverbruiksniveau .....	51
3.7    Conclusie .....	65
3.7.1.    Conclusies onderzoek.....	65
3.7.2.    Beperkingen en verder onderzoek.....	66
Literatuurlijst .....	69
Bijlagen .....	73

## Lijst van Tabellen

---

Tabel 1: Overzicht literatuurmodellen .....	10
Tabel 2: Symbolenlijst Pollution Routing Problem .....	11
Tabel 3: Symbolenlijst G-VRP/E-VRPTW .....	14
Tabel 4: Symbolenlijst Flow-Capturing Location Model .....	21
Tabel 5: Symbolenlijst Flow Refueling Location Model .....	22
Tabel 6: Symbolenlijst allocatiemodel Wang & Lin (2013) .....	25
Tabel 7: Overzicht gegevens replicatie 1 .....	31
Tabel 8: Gemiddelde vraag per klant over alle replicaties heen .....	33
Tabel 9: Resultaten replicatie 1 scenario 1 .....	37
Tabel 10: Overzichtstabel resultaten scenario 1 .....	38
Tabel 11: Hypothesetesten scenario 1 .....	40
Tabel 12: Overzicht verschillende types van laders .....	42
Tabel 13: Resultaten replicatie 1 scenario 2.1 .....	44
Tabel 14: Overzicht resultaten scenario 2.1 .....	45
Tabel 15: Hypothesetest scenario 2.1 .....	47
Tabel 16: Resultaten replicatie 1 scenario 2.2 .....	48
Tabel 17: Overzicht resultaten scenario 2.2 .....	49
Tabel 18: Hypothesetest scenario 2.2 .....	50
Tabel 19: Symbolenlijst vergelijking Mannering et al (2008) .....	51
Tabel 20: Resultaten replicatie 1 scenario 3.1 .....	53
Tabel 21: Vergelijking batterijverbruik scenario 1 versus scenario 3.1 .....	55
Tabel 22: Resultaten replicatie 1 scenario 3.2 .....	55
Tabel 23: Resultaten replicatie 1 scenario 3.3 .....	56
Tabel 24: Verbruikswaarden bij de verschillende snelheden .....	57
Tabel 25: Overzicht resultaten scenario 3.1 .....	58
Tabel 26: Hypothesetesten scenario 3.1 .....	59
Tabel 27: Batterijverbruik rit 2 van replicatie 5 .....	59
Tabel 28: Vergelijking batterijverbruik rit 2 van replicatie 5 bij 65 km/u en 80 km/u .....	60
Tabel 29: Overzicht resultaten scenario 3.2 .....	61
Tabel 30: Hypothesetesten scenario 3.2 .....	62
Tabel 31: Overzicht resultaten scenario 3.3 .....	63
Tabel 32: Hypothesetesten scenario 3.3 .....	64
Tabel 33: Euclidische afstandsmatrix replicatie 1 .....	73
Tabel 34: Reistijden replicatie 1 (65 km/u) .....	74



## Lijst van Figuren

---

Figuur 1: Weergave punten replicatie 1 in cartesisch coördinatenstelsel .....	32
Figuur 2: Verdeling gemiddelde vraag over alle replicaties heen .....	34
Figuur 3: Elektrische stroom- en voltageniveau gedurende opladen lithium batterij (Battery University, 2010) .....	35
Figuur 4: Ritten replicatie 1 scenario 1 .....	37
Figuur 5: Ritten replicatie 1 scenario 2.1 .....	44
Figuur 6: Ritten replicatie 1 scenario 2.2 .....	49
Figuur 7: Ritte replicatie 1 scenario 3.1 .....	54
Figuur 8: Ritten replicatie 1 scenario 3.2 .....	56
Figuur 9: Ritten replicatie 1 scenario 3.3 .....	57

## Hoofdstuk 1: Introductie

---

### 1.1. *Probleemstelling*

Het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen is een van de actuele milieukwesties en de transportsector wordt hierbij gezien als een van de moeilijkste problemen. Volgens cijfers uit 2004 is transport over de hele wereld verantwoordelijk voor 26 procent van het totale energieverbruik en voor 23 procent van de hieraan gerelateerde uitstoot van broeikasgassen. De sector is een grote verbruiker van fossiele brandstoffen: maar liefst 95 procent van de energie gebruikt voor transport is afkomstig uit fossiele brandstoffen, voornamelijk olie (Lindfeldt, Magnusson, Mohseni & Saxe, 2010). Transport speelt bijgevolg een belangrijke rol in het uitzetten van een strategie om de klimaatverandering aan te pakken en energiezuikerheid te garanderen. Eender welke beoogde strategie dient toegepast te worden door de sector om broeikasgasemissies te verminderen en onafhankelijker te worden van fossiele brandstoffen. Op lange termijn zullen hernieuwbare energiebronnen en voertuigen die hier gebruik van maken een oplossing kunnen bieden, maar op korte termijn blijft het van belang om de uitstoot van de bestaande transportvloot te verminderen en dit zal de komende jaren een effectieve maatregel blijven (Nie & Li, 2013).

Transport is ook binnen de Europese Unie de grootste verbruiker van olieproducten en verantwoordelijk voor de op een na grootste uitstoot van koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) (Achnicht, Bühler & Hermeling, 2012). Bij benadering 32 procent van alle energieverbruik binnen de zevenentwintig lidstaten is afkomstig uit de transportsector en 80 procent hiervan kan toegeschreven worden aan het wegvervoer binnen de sector (Lucas, Silva & Neto, 2012). Het verbruik en de uitstoot wordt dus door het wegtransport gedomineerd. De Europese Commissie wil deze afhankelijkheid van olie terugdringen en het transport duurzamer maken. Daarom heeft de Commissie als doel vooropgesteld om tegen 2020 10 procent van de conventionele transportbrandstoffen te vervangen door hernieuwbare alternatieven, zoals biobrandstof, waterstof en groene elektriciteit (Achnicht et al., 2012). Verschillende verordeningen zijn opgesteld om het aantal emissies terug te dringen. Zo legt EU verordening 510/2011 vanaf 2020 aan lichte commerciële voertuigen (d.i. <3,5 ton) een boete van vijftien euro op voor elke gram boven honderdzevenenveertig gram CO<sub>2</sub> per kilometer (Schneider, Stenger & Goeke, 2012). Daarnaast heeft de Commissie in 2011 een Witboek opgesteld met daarin ambitieuze doelstellingen om de emissies te doen afnemen tegen 2050. Om deze objectieven te bereiken is het noodzakelijk systematisch over te schakelen naar hernieuwbare energiebronnen die het transport kunnen aandrijven, en dit vooral voor personenvoertuigen. De Duitse overheid heeft al een plan uitgewerkt die de aankoop van elektrische voertuigen aanmoedigt en ernaar streeft om tegen het einde van het decennium een miljoen elektrische en plug-in hybride voertuigen op de Duitse wegen te krijgen (Achnicht et al., 2012).

Om de opwarming van het klimaat te beperken tot 2°C heeft de EU zichzelf vooropgesteld om tegen 2050 de totale uitstoot te verminderen met 80 tot 95 procent ten opzichte van het niveau van 1990. Voor de vervoersector betekent dit dat tegen 2050 de uitstoot van broeikasgassen met minsten 60 procent moet worden verminderd ten opzichte van 1990. Als tussendoel wordt voor vervoer tegen 2030 een daling van de emissies met 20 procent ten opzichte van 2008 nagestreefd.

De uitdaging hierin ligt in het verzoenen van de toename van het vervoer en de mobiliteit met een emissiereductie van 60 procent. De EU wil dit bereiken door het drastisch verminderen van de olieafhankelijkheid zonder in te boeten aan efficiëntie en mobiliteit. Hiervoor werden tien doelstellingen geformuleerd waaronder een verbod vanaf 2050 op het gebruik van voertuigen met een klassieke verbrandingsmotor in stedelijke gebieden.

In het Witboek wordt een onderscheid gemaakt tussen goederenvervoer op lange afstand (meer dan 300 km) enerzijds en goederenvervoer op korte en middellange afstand anderzijds. De Europese Commissie stelt dat tegen 2030 30 procent van het wegtransport op lange afstand moet gebeuren over het spoor of via het water en tegen 2050 wordt een aandeel van 50 procent nagestreefd. Voor het goederenvervoer op korte en middellange afstand wordt gesteld dat dit in grote mate met vrachtwagens zal blijven gebeuren. Het is dus belangrijk om niet alleen alternatieve vervoersoplossingen aan te moedigen, zoals via het spoor of het water, maar ook het efficiënter maken van vrachtwagens door bijvoorbeeld de ontwikkeling van nieuwe motoren en schonere brandstoffen. Er dient nu actie ondernomen te worden, want de ontwikkeling van infrastructuur neemt vele jaren in beslag. De keuzes die nu gemaakt worden, gaan bepalend zijn voor het vervoer in 2050 (Europese Commissie, 2011).

Het cruciale probleem voor de transportsector is niet het gebrek aan alternatieven, maar de hoge kostprijs van de meeste hernieuwbare brandstoffen en het feit dat ze meer energie-intensief zijn om te produceren en te verdelen dan conventionele brandstoffen. De noodzakelijke verandering zal dus massale politieke steun nodig hebben, zoals subsidies en belastingverlagingen, zodat de alternatieven ook echt beter zijn dan de status quo (Lindfeldt et al., 2010). Het is dus via beleid op Europees niveau en vervolgens op nationaal niveau dat bedrijven gemotiveerd worden of dat de eis gesteld wordt meer en meer voertuigen in de vloot op te nemen die kunnen rijden op alternatieve brandstoffen. In de Verenigde Staten worden overigens soortgelijke maatregelen genomen via onder meer de 'Energy Policy Act' en de 'Energy Independence and Security Act'. Federale overheidsdiensten met een vloot van 20 motorvoertuigen of meer moeten de petroleumconsumptie doen afnemen met 2 procent per jaar tot einde 2015 met 2005 als referentiejaar. Daarnaast is het ook verplicht het gebruik van alternatieve brandstoffen te doen toenemen met 10 procent per jaar relatief tot het vorige jaar (Erdogan & Miller-Hooks, 2012).

Het gebruik van alternatieve brandstoffen vraagt ook aanpassingen bij het oplossen van het rittenplanningsprobleem. Het traditionele 'Vehicle Routing Problem (VRP)' streeft naar de minimalisatie van transportkosten bij het bezoeken van klanten, waarbij elke klant exact een keer bezocht wordt en de route begint en eindigt bij het depot. Door de jaren heen zijn uitbreidingen gemaakt op dit probleem en ook voor het integreren van alternatieve brandstoffen moeten enkele aanpassingen aangebracht worden zoals het beschouwen van een beperkt rijbereik van voertuigen en het opnemen van tankstations voor alternatieve brandstoffen. Erdogan & Miller-Hooks (2012) hebben hiervoor een model opgesteld en waren de eersten om een VRP te combineren met de mogelijkheid voor het bijtanken of herladen van een voertuig bij een station tijdens de route (Schneider et al., 2012). Schneider et al. (2012) bouwden hierop verder met een model voor elektrische voertuigen.

## *1.2. Centrale onderzoeksvraag*

Uit bovenstaande probleemstelling blijkt dat de transportsector een aanzienlijk aandeel heeft in de uitstoot van emissies. De stijgende olieprijs, de verwachte groei in de sector en de maatregelen die genomen worden op Europees niveau, zijn drijfveren om af te stappen van het gebruik van de traditionele petroleumbrandstoffen voor voertuigen.

Deze overstap naar alternatieve, meer milieuvriendelijke brandstoffen brengen bijkomende beperkingen met zich mee in de rittenplanning. In deze verhandeling wordt onderzocht hoe bedrijven, rekeninghoudend met deze beperkingen, tot een optimale rittenplanning kunnen komen.

Volgende centrale onderzoeksvraag wordt vooropgesteld:

*“Hoe kan het gebruik van alternatieve brandstoffen geïntegreerd worden in de rittenplanning?”*

Deze onderzoeksvraag zal beantwoord worden aan de hand van enkele deelvragen:

- 1. Welke alternatieve brandstoffen bestaan er en wat zijn hun eigenschappen*
- 2. Welke obstakels staan een overstap naar voertuigen op alternatieve brandstoffen in de weg?*
- 3. Welke bestaande modellen hebben reeds de nieuwe beperkingen opgenomen?*
- 4. Hoe deze beperkingen opnemen in de rittenplanning en mathematisch weergeven?*
- 5. Welke invloed heeft de tankinfrastructuur op de vorming van ritten?*
- 6. Hoe kan de vrachtlading in het model geïntegreerd worden om tot een meer realistisch brandstofverbruik te komen?*

Alvorens de eerste deelvraag te behandelen wordt ecologisch rijden kort besproken als een manier om de uitlaatgassen terug te dringen zonder naar een andere brandstof over te schakelen. Hierna volgt een bespreking van de verschillende alternatieve brandstoffen.

### *1.3. Ecologisch rijden*

Onder ecologisch rijden wordt verstaan een zodanig rijgedrag aannemen zodat het brandstofverbruik en de broeikasgasemissies afnemen. Hierdoor is een verbetering van de emissies mogelijk van de orde 5 à 10 procent. Het gaat vaak om het aanhouden van een constante snelheid dicht bij de maximumsnelheid, een vlotte acceleratie en het vermijden van stationair draaien.

Een belangrijk aspect dat vaak vergeten wordt bij bestaande strategieën voor ecologisch rijden is de impact van de routekeuze. De gemiddelde rijsnelheid van een voertuig – de voornaamste factor voor het bepalen van emissies – is sterk gecorreleerd met de heersende snelheid van de weg waarop het voertuig rijdt. Ter minimalisatie van emissies dient gekozen te worden voor een route waarbij een gemiddelde snelheid gehaald kan worden die zo dicht mogelijk bij de milieuvriendelijke snelheid ligt. Deze simpele strategie kan echter bemoeilijkt worden door het opnemen van andere doelstellingen bij het kiezen van een route, zoals de reistijd. Deze bijkomende doestellingen kunnen in conflict komen met het idee van emissiereductie (Nie et al., 2013).

### *1.4. Alternatieve brandstoffen*

De uitputting van fossiele brandstoffen, stijgende petroleumprijzen en strikte milieuvoorschriften hebben de interesse in de ontwikkeling van andere, niet-op-petroleum gebaseerde, brandstoffen sterk gestimuleerd. Het gebruik van deze hernieuwbare brandstoffen kunnen de CO<sub>2</sub>-emissies aanzienlijk terugdringen (Salvi, Subramanian & Panwar, 2013).

#### *1.4.1 Elektriciteit*

Drie types van elektrische voertuigen zijn te onderscheiden. De eerste twee types betreffen hybride voertuigen, waarbij zowel een interne verbrandingsmotor als elektrische motor aanwezig is. Het verschil tussen de twee types zit in het al dan niet aangesloten zijn op de wielen van de interne verbrandingsmotor. Een derde en laatste type wordt volledig aangedreven door een grote batterij, een zogenaamd 'battery electric vehicle (BEV)' (van Vliet et al., 2011). Het rijbereik van BEV's is afhankelijk van het type en aantal batterijen dat geïnstalleerd zijn en kan variëren van ongeveer vijftig kilometer tot bij benadering tweehonderd kilometer (Browne, O'Mahony & Caulfield, 2012).

Elektrische voertuigen zijn efficiënter wat betreft energieconversie. Het omzetten van elektrische naar mechanische energie door een elektrische motor verloopt veel efficiënter dan mechanische energie afleiden uit fossiele brandstoffen in een interne verbrandingsmotor. Bij een puur elektrische aandrijving kan dit nog verhoogd worden via recuperatief remmen. Dit leidt tot een veel hogere 'tank-to-wheel' efficiëntie voor elektrische voertuigen (Shukla et al, 2011). Verder hebben deze voertuigen ook betere rijprestaties, maar daartegenover staat wel het beperkte rijbereik, de lange herlaadtijden, de hoge batterijkost en het zwaarder totaalgewicht (Liu et al., 2013).

Van alle alternatieve brandstoffen op de markt neemt het opladen van een elektrische batterij de meeste tijd in beslag. Bij benzine- of dieselveertuigen is de gemiddelde tanktijd ongeveer vijf minuten en bij brandstofcelwagens worden twee minuten extra geteld. Dit staat in schril contrast tot de oplaadtijden voor BEV's. Het onderscheid wordt gemaakt tussen snellaadstations en installaties die langzaam opladen. In het eerste geval wordt in twintig à dertig minuten 80 procent van de volledige capaciteit bereikt. In het tweede geval, echter, kan gerekend worden op zes tot acht uur vooraleer de batterij volledig opgeladen is (van Rijnsoever, Hagen & Willems, 2013).

#### *1.4.2 Waterstof*

Waterstof kan mechanische energie genereren via verbranding in een interne verbrandingsmotor of het kan elektrische energie ontwikkelen via een reactie met zuurstof in een brandstofcel. Een van de belangrijkste voordelen is dat waterdamp het enige oxidatieproduct is dat vrijkomt, er is geen uitstoot van koolstofdioxide. Desondanks is weinig vooruitgang te merken in de ontwikkeling van voertuigen voor dit type brandstof en dit heeft enkele redenen (Shukla et al, 2011).

Waterstof kan gemaakt worden met behulp van fossiele brandstoffen of via elektrolyse van water. De eerste methode zou veel meer fossiele brandstof vereisen dan dat nu gebruikt wordt voor hetzelfde doel en zou leiden tot een aanzienlijke stijging van de energie-import alsook tot een negatieve impact op de opwarming van de aarde. Waterstof genereren via elektrolyse zou een kostenstijging meebrengen. Het direct gebruik van elektriciteit zou half zoveel kosten als via de waterstofroute (Shinnar, 2003). Voor transportgebruik zijn ook bezwaren te vinden. Waterstof kan in auto's opgeslagen worden als een samengedrukt gas, als een vloeistof in cryogene containers, of in metaalhybriden. Aangezien waterstof een extreem lage dichtheid heeft, zal samengeperst waterstof niet in staat zijn een vergelijkbaar rijbereik te geven als benzine (Shukla et al, 2011). Hoewel waterstof veilig behandeld kan worden, is het ook de gevaarlijkste van alle gekende brandstoffen en wordt een krachtig explosief wanneer het gemengd wordt met zuurstof in een gesloten ruimte. Dit vereist meer en strengere veiligheidsmaatregelen dan bij andere brandstoffen. Het gevolg is dat de maximumhoeveelheid die veilig opgeslagen kan worden beperkt is en bovendien is speciale expertise vereist om de stof te behandelen (Shinnar, 2003).

Dit heeft ertoe geleid dat verschillende automobielfabrikanten hun plannen voor waterstofauto's hebben laten vallen en dit ten voordele van elektrische voertuigen (Shukla et al, 2011).

#### *1.4.3 Ethanol en methanol*

Ethanol wordt vervaardigd door de fermentatie van suikers, methanol van methaan en stoom om synthesegas te vormen (Astbury, 2008). Zo goed als alle benzinevoertuigen kunnen brandstofmengels verbranden die maximaal 10 procent ethanol bevatten (Anderson, 2012).

De markt voor ethanol in de VS als substituut voor benzine is een snelgroeiende markt. Vanwege de stijgende benzineprijzen en overheidssteun voor alternatieve voertuigen en infrastructuur is het aantal tankstations dat E85 aanbiedt meer dan verdubbeld in de periode 2006-2009 tot meer dan duizendnegenhonderd. E85 is een alternatieve brandstofmengeling die voor 85 procent bestaat uit ethanol en voor 15 procent uit benzine (Anderson, 2012).

In vergelijking met benzinevoertuigen is geen bijkomend onderhoud vereist en zit het enige verschil in het aantal kilometers dat per liter brandstof gereden kan worden (Corts, 2010), want zuiver benzine heeft een hogere energiedichtheid dan E85 (Anderson, 2012).

In tegenstelling tot benzine en diesel bevat alcohol zuurstof. Door een alcohol toe te voegen aan petroleumproducten wordt een meer volledige verbranding van de brandstof toegelaten vanwege de aanwezigheid van zuurstof. Hierdoor wordt het verbrandingsrendement verhoogd en verlaagt het de luchtvervuiling (Surisetty, Dalai & Kozinski, 2011).

#### *1.4.4 Biodiesel*

Biodiesel kan geproduceerd worden door het chemisch combineren van eender welke natuurlijke olie of vet met een alcohol zoals methanol of ethanol. De energiedichtheid ligt zeer dicht bij conventionele diesel en daarnaast zijn ook overeenkomsten wat betreft verbrandingseigenschappen.

Biodiesel heeft een dynamische koolstofcyclus vanwege het fotosyntheseproces. Planten absorberen meer CO<sub>2</sub> dan vrijkomt bij de verbranding van biodiesel en dus kan het gebruik van deze biobrandstof de CO<sub>2</sub>-emissie effectiever terugdringen, het milieu beschermen en een ecologisch evenwicht behouden. Daarnaast is ook de uitstoot van SO<sub>2</sub> heel wat minder vanwege de lagere zwavelinhoud in biodiesel. De brandstof kan bovendien ook gebruikt worden in bestaande dieselmotoren vanwege de gelijkaardige verbrandingsperformantie met gewone dieselolie.

De keerzijde van de medaille is dat om de oliehoudende gewassen te produceren veel landoppervlak nodig is. Dit heeft ertoe geleid dat ongerept regenwoud vrijgemaakt is ten voordele van deze plantages. Wereldwijd is de ontbossing verantwoordelijk voor een geschatte 20 procent van de broeikasgasemissies. (Huang, Zhou & Lin, 2012).

#### *1.4.5 Aardgas*

Aardgas wordt reeds vele jaren gebruikt voor onder meer huisverwarming en grootschalige elektriciteitsgeneratie. Dit gas gebruiken in de transportsector is dus een logische volgende stap. Gezien de zeer lage dichtheid, vereist dit dat aardgas opgeslagen wordt als ofwel samengedrukt aardgas, beter bekend als 'compressed natural gas (CNG)', ofwel in vloeibare vorm, beter bekend als 'liquefied natural gas (LNG)', om het praktisch te gebruiken voor transport (Astbury, 2008).

Yeh (2007) haalt drie belangrijke factoren aan die overheden motiveren om aardgasvoertuigen te promoten. Een eerste factor betreft minder luchtvervuiling. In vergelijking met diesel- en benzinevoertuigen stoten voertuigen die rijden op aardgas kleinere hoeveelheden schadelijke stoffen uit zoals fijn stof, koolstofmonoxide, stikstofoxiden, enzovoort. Een tweede factor is de beschikbaarheid van aardgasbronnen en bestaande pijplijn- en leveringsinfrastructuur die gebruikt kunnen worden. Een laatste factor betreft het onafhankelijker worden van geïmporteerde olie. Deze laatste twee factoren gelden vooral voor die landen met grote aardgasreserves, zoals landen in Zuid-Amerika. Overvloedige bronnen in eigen land bieden een sterk economisch voordeel ten opzichte van benzine en dus een motivatie voor overheden om aardgasvoertuigen te promoten.

### *1.5. Barrières voor alternatieve brandstoffen en technologieën*

De tweede deelvraag betreft de obstakels die een succesvolle overstap naar voertuigen op alternatieve brandstoffen in de weg staan. Verschillende soorten obstakels worden onderscheiden.

#### *1.5.1 Technische barrières en marktbeschikbaarheid*

Hieronder vallen barrières wat betreft technologie, infrastructuur en onzekerheid over beschikbaarheid van grondstoffen. Technologische barrières voor plug-in hybride voertuigen zijn onder meer (i) de energiedichtheid van de lithium-ion-batterij, deze is 1 procent van die van benzine, (ii) de lange tijdsduur om deze op te laden en (iii) de onzekerheid over de levensduur van de batterij, (iv) technische moeilijkheden verbonden aan de integratie met het nationale elektriciteitsnet, en (v) het kan problematisch zijn voor bewoners van appartementsblokken of rijhuizen waar vaak op straat geparkeerd moet worden om thuis op te laden (Browne et al., 2012).

Waterstofvoertuigen zijn nog niet op grote schaal beschikbaar op de markt tenzij in nichetoeepassingen en demonstratieprogramma's. De verwachting is dat de wijde commerciële beschikbaarheid niet zal gebeuren voor 2020 vanwege enkele eerder aangehaalde technologische knelpunten – opslag, materiaalbeschikbaarheid, hoge kosten, ... (Browne et al., 2012).

Het gebrek aan tankstations is een van de voornaamste barrières voor de doorbraak van voertuigen op alternatieve brandstoffen, zeker die voertuigen die op een enkele brandstof rijden en dus niet de hybride voertuigen (Melaina & Bremson, 2008). Binnen de EU zijn naar schatting duizend aardgasstations, maar slechts een klein deel van dit aantal is open voor het publiek en het overgrote merendeel is behouden voor privégebruik van bedrijfswagenparken. Dit cijfer is minder dan 1 procent van het totaal aantal benzinestations binnen de EU, dat rond de honderddertenduizend ligt. Het ontbreken van een voldoende infrastructuur van tankstations kan leiden tot de perceptie dat voertuigen op alternatieve brandstoffen niet geschikt zijn voor langere reizen (Browne et al., 2012). Een adequate tank- of herlaadbeschikbaarheid is fundamenteel voor de commercialisatie van deze voertuigen. Consumenten zullen deze dan ook niet aanschaffen als er niet ergens getankt kan worden, ongeacht de kosten of prestaties van het voertuig in kwestie.

Bij voertuigen op alternatieve brandstoffen wordt ook verwezen naar het kip-en-eiprobleem, waarbij er een link is tussen drie belanghebbenden: consumenten die weigerachtig zijn voertuigen te kopen die niet getankt kunnen worden, automobielfabrikanten die weigerachtig zijn voertuigen te produceren die niet gekocht zullen worden, en tenslotte brandstofleveranciers die weigerachtig zijn brandstoffen te voorzien voor voertuigen die niet bestaan. Vanwege de stilstand en het marktfalen verbonden aan dit kip-en-eiprobleem, en de publieke baten van vele alternatieve brandstoffen in overweging nemend, spelen overheidsinstanties een kritische rol als vierde belanghebbende. Deze instanties kunnen financiële stimuleringsmaatregelen lanceren, zorgen voor informatieverbreiding, mandaten toekennen, codes en standaarden ontwikkelen, enzovoort.

De uitdaging bestaat erin het kip-en-eiprobleem te overwinnen en op een bepaald moment een noodzakelijk, kritisch aantal tankstations te vestigen zodat tegemoetgekomen wordt aan de tankbehoeften van een groot deel van de zogenaamde 'early adopters'. Hiervoor is een groot



aantal tankstations nodig, die verspreid zijn over relatief grote geografische gebieden en operationeel dienen te zijn vooraleer voertuigen op alternatieve brandstoffen succesvol in massaproductie gaan en verkocht worden.

Tenslotte kan ook de lange-termijn beschikbaarheid van grondstoffen zoals lithium een beperkende factor zijn voor de ontwikkeling van elektrische voertuigen. Ook de gelimiteerde beschikbaarheid van platinagroepmetalen kan voor problemen zorgen bij brandstofcelvoertuigen. Aardgas heeft dan weer dezelfde lange-termijn begrenzing als ruwe olie en grondstoffen voor biobrandstoffen kunnen evenzeer beperkt zijn (Browne et al., 2012).

#### *1.5.2 Financiële barrières*

Financiële barrières zijn onder meer de hogere kosten voor consumenten, initiële en werkingskosten voor investeerders evenals fiscale maatregelen die de overheid uitvaardigt zoals subsidies en opheffing van accijnzen. Voor de consument kunnen deze hogere kosten onder meer de duurdere aankoopprijs zijn, werkingskosten van het voertuig, bijkomende brandstofkosten, onderhoudskosten en mogelijk kosten voor de aanpassing van het voertuig, bijvoorbeeld wanneer een persoon een of andere biobrandstof wenst te gebruiken. Op lange termijn worden kostenverlagingen verwacht door onder meer schaalvoordelen in productie en ontwerpverbeteringen. Voor elektrische voertuigen is het echter waarschijnlijk dat ook op lange termijn de prijs significant hoger zal liggen dan die van conventionele voertuigen en dit omwille van de kosten van de lithiumbatterijen.

#### *1.5.3 Overige barrières*

Andere barrières die Browne et al. (2012) aanhalen zijn institutionele en administratieve barrières waarbij er een afkeer kan zijn van nieuwe of innovatieve technologieën en weerstand om te veranderen van stakeholders die 'sunks costs' hebben in bestaande infrastructuur. Een vierde barrière betreft publieke aanvaarding dat afhankelijk is van een aantal factoren, zoals voldoende infrastructuur om vrees voor beperkt bereik te voorkomen en mogelijkheden bieden tot tanken, opladen en onderhoud. Daarnaast bestaan ook regelgevende of juridische barrières die betrekking hebben op onder meer lacunes in de regelgeving indien de overheid niet de gepaste wetgeving voorziet. Dit kan het vertrouwen van investeerders schaden en hen afschrikken evenals de consumentenvraag. Een laatste categorie zijn de fysieke barrières die relateren aan beperkingen op de beschikbaarheid van materiaalinputs. Elektrische voertuigen bijvoorbeeld vereisen de ontginning van zeldzame aardmetalen en platinagroepmetalen die gebruikt worden in batterijen. Productie van biobrandstoffen vereist voldoende landoppervlak, water en klimatologische omstandigheden. Door de toenemende biobrandstofproductie is er ook een toegenomen vraag naar landbouwgrond, wat geresulteerd heeft in de conversie van bossen en wouden naar akkerland (Browne et al., 2012).

## Hoofdstuk 2: Planningsmodellen voor alternatieve brandstoffen

---

### 2.1. Rittenplanningsmodellen

Het 'vehicle routing problem (VRP)' of rittenplanningsprobleem wordt in bijna alle transportgebieden toegepast, gaande van postinzameling tot de bagageafhandeling op luchthavens (Bard et al, 1998). Het traditionele VRP streeft naar de minimalisatie van transportkosten bij het bezoeken van klanten, waarbij elke klant exact één keer bezocht wordt en de route begint en eindigt bij het depot. Door de jaren heen werden uitbreidingen gemaakt aan dit model, zoals het 'Capacitated VRP (CVRP)', waarbij de beperkte vrachtcapaciteit van voertuigen beschouwd wordt, en het rittenplanningsprobleem met tijdvensters (VRPTW), waarbij klanten bereikt dienen te worden binnen een bepaald tijdsinterval (Schneider et al.,2012).

Het gebruik van alternatieve brandstoffen is ook een uitbreiding die aanpassingen vereist in de rittenplanning vanwege de beperkte tankinfrastructuur en voor sommige brandstoffen ook het beperkte rijbereik van een volle tank of batterij. Aangezien dergelijke alternatieve voertuigen nog relatief nieuw zijn en de productie langzamerhand opgevoerd wordt, is op dit moment relatief weinig onderzoek hierover beschikbaar. Waarschijnlijk wordt op dit moment aan heel wat onderzoeken gewerkt en zullen deze pas in de toekomst beschikbaar worden. Enkele onderzoekers hebben zich reeds gewaagd aan het opstellen van een rittenplanningsmodel waarbij alternatieve brandstoffen of voertuigen geïncorporeerd zijn. Het 'pollution routing problem (PRPR)' van Bektas & Laporte stelt een kostenfunctie op met daarin ook de milieu- en sociale impact en niet enkel de economische kosten. In dit model is nog geen sprake van alternatieve brandstoffen. Erdogan & Miller-Hooks (2012) waren de eersten om een traditioneel VRP te combineren met de mogelijkheid om bij te tanken langs de route en introduceerden het 'green vehicle routing problem (G-VRP)'. Dit model werd toegepast op voertuigen die rijden op biodiesel, LNG en CNG, maar kan ook gebruikt worden voor andere types van brandstoffen. Schneider et al. (2012) bouwden hierop verder door tijdvensters, variabele laadtijden en vrachtbeperkingen in het G-VRP te introduceren en ontwikkelden zo het 'electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations (E-VRPTW)'. Tot slot wordt een locatiemodel behandeld waarin het eerder besproken probleem van de beperkte laadinfrastructuur gemodelleerd wordt in het 'Flow Refueling Location model (FRLM)'. Tabel 1 geeft een overzicht van de besproken modellen.

Rittenplanningsmodellen				Locatiemodel
	PRP	G-VRP	E-VRPTW	FRLM
<b>Jaar</b>	2011	2012	2012	2013
<b>Auteurs</b>	Bektas & Laporte	Erdogan & Miller-Hooks	Schneider, Stenger & Goeke	Wang & Lin
<b>Doel</b>	Minimaliseren van totale kosten	Minimaliseren van totale afgelegde afstand per dag	Minimaliseren van totale afgelegde afstand	Maximaliseren van dekking van elektrische voertuigstromen
<b>Alternatieve brandstoffen</b>	Neen	Ja, biodiesel, LNG en CNG (ook toepasbaar op andere alternatieve brandstoffen)	Ja, elektriciteit	Ja, elektriciteit
<b>Belangrijke factoren</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lading</li> <li>- Snelheid</li> <li>- Emissiekosten</li> <li>- Operationele kosten</li> <li>- Kosten chauffeurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alternatieve tankstations</li> <li>- <i>m</i> homogene voertuigen</li> <li>- Vaste laadtijden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tijdvensters</li> <li>- Variabele laadtijden</li> <li>- Beperkte vrachtcapaciteit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verschillende types laadstations</li> <li>- Budgetbeperkingen</li> </ul>
<b>Oplossingsmethoden</b>	CPLEX 12.1 met standaardinstellingen	Twee heuristieken <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modified Clarke and Wright Savings (MCWS)</li> <li>- Density-Based Clustering Algorithm (DBCA)</li> </ul>	Hybride methode: VNS met TS	Branch and bound methode van LINGO
<b>Conclusies</b>	Arbeidskosten domineren de totale kosten; emissiekosten zijn minder belangrijk	De formulering van het G-VRP en de oplossingstechnieken stellen organisaties met alternatieve voertuigen in staat de moeilijkheden betreffende tankinfrastructuur te overkomen. Het helpt bedrijven eveneens begrijpen welke mogelijke impact een conversie naar een alternatief wagenpark heeft op de dagelijkse operaties en kosten.	De hybride methode levert betere prestaties op dan de heuristieken van het G-VRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Een optimale ontplooiing van infrastructuur kan bereikt worden ongeacht minimum allocatiekost of maximum verkeersstromen.</li> <li>- Een gemengd station locatieplanning geeft de optimale planning in vergelijking met de locatieplanning van een enkel type station.</li> </ul>

Tabel 1: Overzicht literatuurmodellen

### 2.1.1 The pollution routing problem

Het 'Pollution Routing Problem (PRP)' geeft nog geen rekenschap aan alternatieve brandstoffen, maar kijkt toch al verder dan louter economische kostobjectieven door ook de milieu- en sociale impact in het model op te nemen. Er wordt niet enkel gekeken naar de reisafstand zoals het klassieke VRP doet, maar ook naar de hoeveelheid broeikasgasemissies, brandstof, reistijden en de kosten daarvan (Bektas & Laporte, 2011).

Elk voertuig stoot een bepaalde hoeveelheid broeikasgassen uit wanneer het reist van het ene punt naar het ander. Deze hoeveelheid is afhankelijk van een aantal factoren waaronder lading en snelheid. Dit zijn beheersbare variabelen in tegenstelling tot vaste variabelen zoals de zwaartekracht en helling van de route. Het probleem in dit model is het creëren van ritten voor een set voertuigen om te voldoen aan de vraag van alle klanten op een manier zodat alle voertuigen vertrekken en terugkeren aan het depot, niet meer lading dragen dan de capaciteit toelaat, en elke klant wordt bediend binnen het respectievelijke tijdsvenster. Het overkoepelende doel is het minimaliseren van de totale kosten bestaande uit emissies, operationele kosten (brandstofkosten) en kosten van de chauffeurs (Bektas & Laporte, 2011).

#### Symbolenlijst

$x_{ij}$	Gelijk aan 1 wanneer een voertuig over boog $(i, j)$ reist
$f_{ij}$	De hoeveelheid van de goederenstroom
$\bar{v}^r = \frac{l^r + u^r}{2}$	De gemiddelde snelheid $l^r, u^r$ : onder-/bovengrens snelheid (o.b.v. verkeersregels)
$z_{ij}^r$	Gelijk aan 1 indien voertuig een snelheidsniveau $r \in \mathcal{R}$ rijdt
$c_f$	De eenheidskost van de brandstof
$d_{ij}$	De afstand tussen $i$ en $j$
$e$	De kost van een eenheid broeikasgas (meestal in gram)
$p$	Loon bestuurder per tijdseenheid (meestal per uur)
$q_i$	Vraag bij klant $i$
$[a_i, b_i]$	Het voorafbepaalde tijdvenster voor klant $i$
$Q$	Ladingcapaciteit
$s_j = \left( y_j + t_j + \frac{d_{j0}}{v_{j0}} \right) x_{j0}$	Totale rittijd met $j \in N_0$ als laatste knooppunt (daarna naar depot) $y_j$ : starttijd dienstverlening bij $j$ ; $t_j$ : duur dienstverlening bij klant $j$ $v_{ij}$ = snelheid op bepaalde boog
$w$	Gewicht voertuig in lege toestand (d.i. zonder lading)
$\alpha_{ij} = a + g \sin \theta_{ij} + g C_r \cos \theta_{ij}$	Boogspecifieke constante $a$ = versnelling ( $m/s^2$ ); $\theta$ = helling van de weg $g$ = constante van de zwaartekracht ( $9,81 m/s^2$ ) $C_r$ = coëfficiënt voor de rolweerstand
$\beta = 0,5 C_d A \rho$	Voertuigspecifieke constante $C_d$ = coëfficiënt voor de luchtweerstand; $A$ = frontaal oppervlak voertuig ( $m^2$ ); $\rho$ = luchtdichtheid ( $kg/m^3$ )

Tabel 2: Symbolenlijst Pollution Routing Problem

De doelfunctie van het probleem bevat vier componenten en wordt geformuleerd als:

$$\text{Minimaliseer } \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) \alpha_{ij} d_{ij} w x_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) \alpha_{ij} f_{ij} d_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) d_{ij} \beta \left( \sum_{r \in \mathcal{R}} (\bar{v}^r)^2 z_{ij}^r \right) + \sum_{j \in \mathcal{N}_0} p s_j$$

Een symbolenlijst kan teruggevonden worden in Tabel 2. De eerste twee componenten meten de kosten opgelopen door de lading in het voertuig. De derde component geeft de kosten resulterend uit variaties in snelheid. Deze drie componenten samen vertalen rechtstreeks in de totale kost van brandstofconsumptie en broeikasgasemissies. De drie elementen worden berekend door de eenheidskost  $(c_f + e)$  en vermenigvuldigd met de totale hoeveelheid brandstof verbruikt tijdens elke link  $(i, j)$ . De laatste component meet hoeveel betaald wordt aan de chauffeurs (Bektas & Laporte, 2011).

De limiet op de lading wordt weergegeven in beperking (1) en tijdsvensters in (2) en (3).

$$(1) \quad q_j x_{ij} \leq f_{ij} \leq (Q - q_i) x_{ij} \quad \forall (i, j) \in \mathcal{A}$$

$$(2) \quad y_i - y_j + t_i + \sum_{r \in \mathcal{R}} \left( \frac{d_{ij}}{\bar{v}^r} \right) z_{ij}^r \leq M_{ij} (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N}_0, i \neq j \quad \text{met } M_{ij} = \max \left\{ 0, b_i + s_i + \frac{d_{ij}}{l_{ij}} - a_j \right\}$$

$$(3) \quad a_i \leq y_i \leq b_i$$

Bektas & Laporte (2011) geven nog drie varianten op bovenstaande doelfunctie. Een waarbij de afstand geminimaliseerd wordt (i), een waarbij de gewogen lading geminimaliseerd wordt (ii), en een energieminimaliserende doelfunctie (iii).

$$(i) \quad \text{Min } \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} d_{ij} x_{ij}$$

$$(ii) \quad \text{Min } \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \alpha_{ij} d_{ij} w x_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \alpha_{ij} f_{ij} d_{ij}$$

$$(iii) \quad \text{Min } \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \alpha_{ij} d_{ij} w x_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \alpha_{ij} f_{ij} d_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} d_{ij} \beta \left( \sum_{r \in \mathcal{R}} (\bar{v}^r)^2 z_{ij}^r \right)$$

De vier modellen worden door middel van een numeriek experiment met elkaar vergeleken met model (i) als het referentiemodel. Hieruit blijkt dat in het kostenminimaliserende model het brandstofverbruik hoger ligt, alsook de CO<sub>2</sub>-emmissies. De ritten duren echter minder lang, omdat gereden kan worden tegen hogere snelheden, een reden voor de hogere brandstof- en CO<sub>2</sub>-kosten. De totale kosten, echter, zijn lager in vergelijking met het afstandminimaliserende model. Dit bewijst dat de lonen voor chauffeurs veel zwaarder doorwegen in de totale kosten en dus relatief belangrijker zijn dan brandstof- of emissiekosten. Ritten in het kostenminimaliserende model verbruiken meer energie door sneller te rijden, maar hierdoor worden wel de bestuurderskosten naar beneden gehaald. Modellen (ii) en (iii) vereisen iets meer tijd en afstand om een rit te vervolledigen, maar hiertegenover staat een lager energieverbruik en dus ook lagere brandstof- en emissiekosten. Over het algemeen presteren deze twee modellen beter dan model (i).

De auteurs kwamen tot de conclusie dat het minimaliseren van emissies niet het volledige verhaal vertelt vanuit een kostenperspectief. Zo zijn er andere factoren waarmee rekening dient gehouden te worden zoals arbeidskosten die de totale kosten lijken te domineren. Op basis van schattingen stellen zij dat de kosten van CO<sub>2</sub>-emissies niet zo belangrijk zijn als brandstof- of arbeidskosten (Bektas & Laporte, 2011).

### 2.1.2A green vehicle routing problem

In deze sectie wordt het eerste rittenplanningsmodel besproken dat de mogelijkheid van bijtanken tijdens de route in beschouwing neemt en ontworpen is voor voertuigen op alternatieve brandstoffen (Schneider et al., 2012).

Erdogan & Miller-Hooks (2012) hebben een model ontwikkeld die een organisatie met een alternatief wagenpark moet helpen om de moeilijkheden die gepaard gaan met een beperkte tank- of oplaadinfrastructuur te overwinnen. In dit model worden haltes bij alternatieve tankstations opgenomen in de rittenplanning zodat het risico om zonder brandstof te vallen wordt geëlimineerd en tegelijk de lage kostenroutes worden behouden. Hiervoor werd het 'green vehicle routing problem (G-VRP)' gecreëerd en geformuleerd als een gemengd geheeltallig lineair probleem.

De auteurs hebben bij de formulering van dit probleem verder gebouwd op concepten geïntroduceerd door Bard et al. (1998). Bard et al. formuleerden een rittenplanningsprobleem met satellietfaciliteiten – het 'vehicle routing problem with satellite facilities (VRPSF)' – als een gemengd geheeltallig lineair probleem met beperkingen op de capaciteit en tijdsduur van een rit. Het gebruik van satellietfaciliteiten laat voertuigen toe vracht bij te laden tijdens de route. Op deze manier kunnen bijvoorbeeld pakjesdiensten leveringen blijven maken totdat de shift erop zit en dit zonder terug te keren naar het centraal depot. Door gebruik te maken van dergelijke faciliteiten kunnen bedrijven zich wapenen tegen onverwachte vraag.

Het VRPSF werd gedefinieerd door een set  $I$  van  $n$  klanten die een gekende niet-negatieve vraag hebben voor een bepaald goed. Elke klant moet bediend worden door exact één van  $m$  homogene voertuigen die bij het begin gestationeerd zijn in een centraal depot. Dit wordt grafisch voorgesteld door  $G = (V, A)$ , waarbij de verzameling knopen  $V$  overeenkomt met de klantenset  $I$ , het depot  $0$ , en een set van  $s \geq 0$  satellietfaciliteiten. De set  $A \in V \times V$  stelt de bogen voor tussen de knopen in  $V$ . Het depot en de satellietfaciliteiten beschikken over een onbeperkte voorraad van het te verdelen goed. Het belangrijkste onderscheid tussen het depot en een satellietfaciliteit is dat het depot zowel dienst doet als beginpunt evenals eindbestemming voor elk voertuig (Bard et al., 1998).

Om de individuele haltes aan een satellietfaciliteit te onderscheiden, is het noodzakelijk om een uniek knooppunt te creëren voor elke potentiële stop, ook wanneer bijgeladen wordt aan het depot. Dus associëren Bard et al. (1998) faciliteit  $\alpha$  met  $n_\alpha$  knopen in  $V$  in plaats van enkel een knoop.

$$\bar{n} = n + \sum_{\alpha=0}^s n_\alpha$$

Het totaal aantal knopen in  $V$  wordt nu gedefinieerd als  $\bar{n} + 1$ . Een geschikte ("feasible") losvolgorde voor een voertuig vertrekt aan het depot, bezoekt een subset van klanten waar de gevraagde hoeveelheid van het goed wordt afgeleverd, stopt misschien aan een satellietfaciliteit om bij te laden, en keert op het einde van de route terug naar het depot. Een bijkomende vereiste die gesteld wordt is dat de volledige losvolgorde gerealiseerd dient te worden binnen  $T$  uren.

## Symbolenlijst

$\tau_{ij}$	Reistijd tussen knooppunten $i$ en $j$
$m$	Aantal voertuigen beschikbaar per dag
$n_\alpha$	Bovengrens voor het aantal keer dat satellietfaciliteit $\alpha \in F$ bezocht mag worden
$Q$	Brandstofcapaciteit
$\hat{Q}$	Maximumhoeveelheid van een goed overblijvend in een voertuig vooraleer bijladen toegestaan wordt; $\hat{Q} < Q$
$T$	Maximumtijd toegelaten voor een rit
$C$	Vrachtcapaciteit
$q_i$	Vraag van klant $i$
$r$	Mate van verbruik door voertuig (gallons per mijl)
$p_i$	Bedieningstijd bij klant $i$ ; Indien $i \in F$ , dan is $p_i$ de bijlaadtijd
$t_j$	Aankomsttijd van een voertuig op knooppunt $j$
$y_j$	Resterende lading/ brandstofniveau van een voertuig bij aankomst knooppunt $j$
$F$	Set van satellietfaciliteiten/ AFS knooppunten
$\alpha$	Index voor satellietfaciliteiten of het depot; $\alpha \in F = \{1, \dots, s\}$
$F_\alpha$	Set van knooppunten voor potentiële bezoeken aan satellietfaciliteit $\alpha \in F \cup \{0\}$

Tabel 3: Symbolenlijst G-VRP/E-VRPTW

De mathematische formulering voor het VRPSF is:

$$(1) \quad \text{Min} \sum_{\substack{i,j=0 \\ i \neq j}}^{\bar{n}} d_{ij} x_{ij}$$

Begrensd door

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

$$(3) \quad \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ij} \leq 1 \quad i \in F_0 \cup \dots \cup F_s$$

$$(4) \quad \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{\bar{n}} x_{ji} - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{\bar{n}} x_{ij} = 0 \quad j = 0, \dots, \bar{n}$$

$$(5) \quad \sum_{j=1}^n x_{0j} \leq m$$

$$(6) \quad t_j \geq t_i + \tau_{ij} x_{ij} - T_{ij}(1 - x_{ij}) \quad i \neq j; i \in I \cup F_0 \cup \dots \cup F_s; j \in I_0 \cup F_0 \cup \dots \cup F_s$$

$$(7) \quad \max_{l \in I} (2\tau_{0l} + p_l) \leq t_0 \leq T$$

$$(8) \quad \tau_{0j} \leq t_j \leq T - (p_j + \tau_{j0}) \quad j = 1, \dots, n$$

$$(9) \quad \min_{l \in I} (\tau_{0l} + p_l + \tau_{lj}) \leq t_j \leq \max_{l \in I} (T - p_j - \tau_{jl} - p_l - \tau_{l0}) \quad j \in F_0 \cup \dots \cup F_s$$

$$(10) \quad y_j \leq y_i - \bar{q}_i x_{ij} + \bar{Q}_i (1 - x_{ij}) \quad i \neq j \quad i \in I \cup F_0 \cup \dots \cup F_s; j \in I_0 \cup F_0 \cup \dots \cup F_s$$

$$(11) \quad q_j \leq y_j \leq Q \quad j = 1, \dots, n$$

$$(12) \quad 0 \leq y_j \leq \hat{Q} \quad j \in F_0 \cup \dots \cup F_s$$

$$(13) \quad x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j$$

Een symbolenlijst wordt weergegeven in Tabel 3. De doelfunctie (1) minimaliseert de totale afgelegde afstand per dag. Vergelijking (2) garandeert dat elke klant exact één opvolgend knooppunt heeft, namelijk een andere klant, een satellietfaciliteit of het depot. In geval van het depot zou index  $j$  ofwel gelijk zijn aan 0 of een element zijn van  $F_0$ , naargelang de route werd beëindigd of het voertuig stopte om bij te laden. Beperking (3) zorgt ervoor dat elke

satellietfaciliteit hoogstens één opvolger heeft. Vergelijking (4) garandeert continuïteit van flow door te verzekeren dat het aantal aankomsten bij een knoop gelijk is aan het aantal vertrekken. Dit geldt wanneer  $j$  een klant of satellietfaciliteit is en niet het depot. Beide sommatietermen moeten dan gelijk zijn aan 1, wat betekent dat elke knoop exact één voorganger heeft. Wanneer  $j$  het depot is ( $j = 0$ ) zal de de sommatie niet groter zijn dan  $m$  – zie beperking (5) – aangezien niet meer dan  $m$  voertuigen gebruikt kunnen worden per dag.

Beperking (6) gaat de tijd na wanneer de dienst begint aan een knoop en samen met vergelijkingen (7) en (8) wordt verzekerd dat elke route tegen tijd  $T$  vervolledigd wordt. Op  $t_0$  ( $j = 0$ ) moeten alle voertuigen teruggekeerd zijn in het depot. De variabele  $t_j$  duidt het tijdstip aan waarop de dienstverlening begint bij knooppunt  $j$ . Omdat de  $t_j$  variabelen toenemen, zorgt (6) er ook voor dat geen klantknooppunt tweemaal bezocht wordt of deel uitmaakt van een geïsoleerde cyclus. Op deze manier kunnen geen subtours gevormd worden. In (7) wordt de ondergrens voor  $t_0$  berekend door te zoeken naar de maximale tijd die nodig is om eender welke klant te bereiken, die klant te bedienen en dan terug te keren naar het depot. De bovengrens is de vooropgestelde maximumtijd  $T$ . De ondergrens in (8) voor  $t_j$  wordt bepaald door de tijd die nodig is om van het depot naar klant  $j$  te gaan. De bovengrens is het verschil tussen de maximumtijd  $T$  en de minimumtijd voor de dienstverlening en terugreis van klant  $j$  naar het depot (Bard et al., 1998).

Vergelijking (9) heeft een ondergrens die bepaald wordt door de minimumtijd nodig om te reizen van het depot naar een klant, de dienst uit te voeren, en dan te reizen naar een satellietfaciliteit. De bovengrens is het laatste tijdstip waarop het mogelijk is om plaats  $j$  te verlaten, een andere klant  $l$  te bezoeken, dan terug te keren naar het depot en dit niet later dan  $T$ . De lading van een voertuig net voor knoop  $j$  bezocht wordt, wordt nagegaan door vergelijking (10). Beperking (11) begrenst  $y_j$  wanneer  $j$  een klant is, en (12) doet dit wanneer  $j$  een satellietfaciliteit is.  $\hat{Q}$  is een voorafbepaalde waarde die kleiner is dan  $Q$ , de capaciteit van een voertuig (Bard et al., 1998).

Erdogan & Miller-Hooks (2012) bouwen verder op de formulering van het VRPSF. Het 'green vehicle routing problem (G-VRP)' verschilt op enkele gebieden van het VRPSF. Een eerste verschil is dat het VRPSF geen afstandsbeperkingen op basis van brandstoftankcapaciteit beschouwt. Dus wordt de mogelijkheid om onderweg naar een klant zonder brandstof te vallen niet in overweging genomen. Een tweede verschil is dat brandstof wordt verbruikt op de bogen van het netwerk, terwijl goederen worden geconsumeerd op de knooppunten. Bijgevolg kunnen capaciteitsbeperkingen zoals in het VRPSF niet gebruikt worden bij de modellering van de beperkingen rond brandstofverbruik. Een derde onderscheid betreft het bepalen van de onder- en bovengrenzen voor de aankomsttijden bij knooppunten. Door de behoefte om bij te tanken of de batterij bij te laden wordt dit meer complex. Dit is vanwege het groter aantal combinaties van mogelijke knooppuntvolgordes in vergelijking met het VRPSF en bovendien zal het aantal alternatieve tankstations bij een G-VRP waarschijnlijk groter zijn dan het aantal satellietfaciliteiten in een typisch VRPSF. De extra combinaties volgen uit het feit dat in het G-VRP de mogelijkheid bestaat dat een voertuig dient bijgetankt te worden nog voor de klant bereikt wordt en daardoor moet reizen naar een tankstation vanuit elke klant beschouwd worden. Bij het VRPSF wordt het



bijladen bij een satellietfaciliteit enkel in overweging genomen wanneer de goederen aangevuld dienen te worden. Een laatste verschil is dat satellietfaciliteiten strategisch geplaatst worden, terwijl de ligging van alternatieve tankstations buiten de controle van het bedrijf zijn. Dit kan de moeilijkheid beïnvloeden waarmee goede routes bepaald kunnen worden.

Het G-VRP vertrekt gelijkaardig aan het VRPSF van een diagram bestaande uit knooppunten van klantenlocaties, alternatieve tankstations en een depot. Hierbij wordt gezocht naar een set van ritten met een minimale afstand en waarbij elke rit start aan het depot, een aantal klanten bezoekt binnen een vooraf bepaalde tijdslimiet, en terugkeert naar het depot zonder het rijbereik van het voertuig te overschrijden. Elke rit kan een tussenstop bevatten bij een of meer alternatieve tankstations waarbij het voertuig kan bijtanken of opladen. Vanwege de hoge complexiteit werd gekozen om gebruik te maken van twee heuristieken voor de oplossing van het G-VRP waardoor snel tot een resultaat gekomen kan worden.

Erdogan & Miller-Hooks (2012) definiëren een verzameling  $I = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  bestaande uit de klantknooppunten, het depot  $v_0$  en een set van  $s \geq 0$  'alternative fuel stations (AFS's)',  $F = \{v_{n+1}, v_{n+2}, \dots, v_{n+s}\}$ . De volledige set knooppunten wordt gedefinieerd als  $V = \{v_0\} \cup I \cup F = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_{n+s}\}$ . De veronderstelling wordt gemaakt dat het depot gebruikt kan worden als een tankstation en dat alle tankstations ongelimiteerde capaciteiten hebben. Knooppunten worden met elkaar verbonden door bogen met  $v_i$  als vertrekkknooppunt en  $v_j$  als eindknooppunt. Elke  $(v_i, v_j)$  wordt geassocieerd met een niet-negatieve reistijd  $t_{ij}$  en afstand  $d_{ij}$ . Reissnelheden worden verondersteld constant te zijn. Er staat geen limiet op het aantal haltes dat gemaakt kan worden om bij te tanken. Wanneer getankt wordt, wordt verondersteld dat de tank gevuld wordt tot maximumcapaciteit. De satellietfaciliteiten in het VRPSF worden in het G-VRP dus vervangen door alternatieve tankstations.

Het G-VRP zoekt maximum  $m$  ritten, een voor elk voertuig, die starten en eindigen bij het depot, een subset van knooppunten bezoeken, inclusief alternatieve tankstations indien nodig, zodat de totale afstand geminimaliseerd wordt. Alle klanten dienen door een voertuig bediend te worden binnen een vooraf bepaalde tijdslimiet  $T_{max}$ . Een bijkomende veronderstelling is dat alle klanten bezocht kunnen worden met hoogstens één tussenstop bij een alternatief tankstation. De formulering maakt een onderscheid tussen bezoeken aan alternatieve tankstations, het depot en klanten. Dit wordt gedaan omdat elk alternatief tankstation in se meer dan eens bezocht kan worden of helemaal niet. Daarenboven dient het depot bezocht te worden bij het begin en einde van elke rit en kan het ook dienen als een alternatief tankstation indien gewenst. Klanten, daarentegen, moeten exact één keer bezocht worden. Om dit mogelijk te maken dat een subset van knooppunten meerdere keren of helemaal niet bezocht wordt, werd het bestaande diagram vermeerderd met een set van  $s'$  dummy knooppunten,  $\Phi = \{v_{n+s+1}, v_{n+s+2}, \dots, v_{n+s+s'}\}$ , een voor elke mogelijke stop aan een alternatief tankstation of het depot dat dienst doet als een alternatief tankstation. Dit gelijkaardig aan het VRPSF. De volledige set knooppunten wordt nu gedefinieerd als  $V' = V \cup \Phi$ .

Volgende mathematische formulering wordt bekomen:

$$(1) \quad \text{Min} \sum_{\substack{i,j \in V' \\ i \neq j}} d_{ij} x_{ij}$$

Begrensd door

$$(2) \quad \sum_{\substack{j \in V' \\ j \neq i}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I$$

$$(3) \quad \sum_{\substack{j \in V' \\ j \neq i}} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in F_0$$

$$(4) \quad \sum_{\substack{i \in V' \\ j \neq i}} x_{ji} - \sum_{\substack{i \in V' \\ j \neq i}} x_{ij} = 0, \quad \forall j \in V'$$

$$(5) \quad \sum_{j \in V' \setminus \{0\}} x_{0j} \leq m$$

$$(6) \quad \sum_{j \in V' \setminus \{0\}} x_{j0} \leq m$$

$$(7) \quad t_j \geq t_i + (\tau_{ij} - p_j)x_{ij} - T_{max}(1 - x_{ij}), \quad i \in V', \forall j \in V' \setminus \{0\} \text{ and } i \neq j$$

$$(8) \quad 0 \leq \tau_0 \leq T_{max}$$

$$(9) \quad t_{0j} \leq t_j \leq T_{max} - (\tau_{j0} + p_j), \quad \forall j \in V' \setminus \{0\}$$

$$(10) \quad y_j \leq y_i - r \cdot d_{ij} x_{ij} + Q(1 - x_{ij}), \quad \forall j \in I \text{ and } i \in V', i \neq j$$

$$(11) \quad y_j = Q \quad \forall j \in F_0$$

$$(12) \quad y_j \geq \min\{r \cdot d_{j0}, r \cdot (d_{jl} + d_{l0})\}, \quad \forall j \in I, \forall l \in F'$$

$$(13) \quad x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i,j$$

De doelfunctie (1) is hetzelfde als bij het VRPSF en tracht de totale afgelegde afstand door het wagenpark te minimaliseren. Beperkingen (2) tot en met (5) zijn ook identiek aan het VRPSF, behalve dan dat nu gesproken wordt van alternatieve tankstations in plaats van satellietfaciliteiten. Vergelijking (6) doet het omgekeerde van (5), namelijk dat niet meer dan  $m$  voertuigen terugkeren naar het depot. Beperkingen (7) tot en met (9) betreffen tijden en garanderen dat elk voertuig niet later terugkeert naar het depot dan  $T_{max}$ .

De volgende drie beperkingen zijn relevant voor het gebruik van alternatieve brandstoffen en behandelen het tanken of opladen. De variabele  $y_j$  duidt het resterende brandstofniveau aan bij aankomst in knooppunt  $j$ . Deze wordt terug op  $Q$  - volledig gevuld - gezet bij elk tankstationknooppunt en het depot (beperking (11)). Beperking (10) stelt dat wanneer knooppunt  $j$  bezocht wordt meteen na knooppunt  $i$  ( $x_{ij} = 1$ ) en knooppunt  $i$  is een klantknooppunt, dan reduceert de eerste term in de beperking het brandstofniveau bij aankomst in  $j$  op basis van de afgelegde afstand vanuit knooppunt  $i$  en de mate van brandstofverbruik  $r$  door het voertuig. Beperking (12) garandeert dat er genoeg resterende brandstof overblijft om vanaf een klantlocatie rechtstreeks terug te keren naar het depot of via een AFS. Tenslotte duidt beperking (13) op het binaire karakter van de dummy variabelen.

Voor de oplossing van dit probleem wordt gebruik gemaakt van twee heuristieken, 'the Modified Clarke and Wright Savings (MCWS)' heuristiek en 'the Density-Based Clustering Algorithm (DBCA)', waardoor een snelle oplossing mogelijk wordt. Bij de MCWS-heuristiek wordt eerst een lijst gemaakt van alle mogelijke ritten die starten aan het depot, een reeks klanten bezoeken en dan terugkeren naar het depot. Na het berekenen van de tijdsduur en de afgelegde afstand voor elke rit in de lijst, worden de ritten geklasseerd als 'feasible' of 'non-feasible' afhankelijk van het al dan

niet overschrijden van de beperkingen van rijbereik en maximale ritduur. Voor elke rit op de lijst 'non-feasible' wordt dan de kost berekend van het opnemen van een AFS tussen een klant en het depot en wordt voor de AFS gekozen met de laagste kost. Indien de eerder vermelde beperkingen nu wel voldaan zijn, wordt deze rit toegevoegd aan de lijst 'feasible'. Indien niet wordt de rit verworpen, want de auteurs beschouwen geen ritten met meer dan één AFS. Bij deze heuristiek worden beperkingen (5) en (6) betreffende maximaal  $m$  ritten tijdelijk gerelaxeerd. In een volgende stap worden besparingen berekend bij het samenvoegen van een paar 'feasible' ritten en hierna worden de beperkingen opnieuw nagegaan. Indien deze voldaan zijn, wordt opnieuw gekeken of een fusie met een andere rit ook nog mogelijk is. Indien niet wordt getracht – zoals eerder beschreven – een AFS toe te voegen. Zo werkt de heuristiek totdat geen enkel fusie of toevoeging van AFS meer mogelijk is en het resulterende aantal ritten is het kleinste aantal haalbaar via dit algoritme. De tweede heuristiek, DBCA, maakt gebruik van clusters en definieert een radius rond deze clusters en een minimaal aantal punten – klanten – die binnen deze radius moeten liggen om 'feasible' te zijn. Voor elke cluster wordt dan de MCWS methode toegepast om ritten te vormen (Erdogan & Miller-Hooks, 2012).

De auteurs hebben voor het G-VRP voornamelijk gekeken hebben naar wagenparken die rijden op biodiesel, LNG en CNG. Voor deze brandstoffen bestaat er een beperkte tankinfrastructuur, maar kunnen wel vaste tanktijden verondersteld worden (Schneider et al., 2012). Daarnaast wordt gesteld dat het G-VRP toepasbaar is op eender welke brandstofkeuze. Zo wordt rekening gehouden met de bedieningstijden in tankstations, waardoor deze benadering relevant wordt voor het gebruik van elektrische voertuigen. Bovendien kan het model eveneens gebruikt worden voor het zoeken naar optimale ritten voor benzine of diesel in het geval het betreffende wagenpark speciale tankarrangementen nodig heeft (Erdogan & Miller-Hooks, 2012).

### *2.1.3 The electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations*

Schneider et al. (2012) bouwen voort op het G-VRP en introduceren een rittenplanning voor elektrische voertuigen met tijdsvensters en laadpunten, het zogenaamde 'Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations (E-VRPTW)'. De veronderstelling van vaste laadtijden bij Erdogan & Miller-Hooks (2012) wordt aangepast naar een tijd die afhangt van in welke mate de batterij nog opgeladen is wanneer het voertuig bij het laadpunt aankomt. In een voorstelling van knooppunten verbonden door bogen consumeert elke boog een hoeveelheid  $r \cdot d_{ij}$  van de resterende batterijlading waarbij  $r$  een constant batterijverbruik aanduidt en  $d_{ij}$  de afgelegde afstand. Bij een laadpunt wordt het verschil tussen het huidige batterijniveau en de batterijcapaciteit opgeladen met een bepaald oplaadtempo  $g$  wat betekent dat de herlaadtijd afhankelijk is van het batterijniveau wanneer deze aankomt bij het respectievelijke laadpunt. De bezoeken aan laadpunten dienen opgenomen te worden in de rittenplanning om inefficiënte ritten met lange omwegen te vermijden. De auteurs beschouwen daarnaast ook de beperkte vrachtcapaciteit van voertuigen en de beperking dat klanten binnen een bepaald tijdshorizon bediend dienen te worden, wat onder meer belangrijk is in sectoren zoals de industrie van carrierdiensten. Elk knooppunt  $i \in V_{0,n+1}$  heeft een tijdvenster  $[e_i, l_i]$  en alle klanten  $j \in I$  hebben een

bedieningstijd  $s_j$ . De dienstverlening mag niet beginnen voor  $e_i$ , wat kan lijden tot wachttijd, en kan niet later starten dan  $l_i$ , maar kan wel later eindigen.

Het doel van het E-VRPTW is net als bij het G-VRP het minimaliseren van de totale afgelegde afstand. In de mathematische voorstelling blijft de doelfunctie dus identiek, evenals beperkingen (2), (3), (4) en (13) die de binaire aard garanderen.

$$(5) \tau_i + (t_{ij} + s_i)x_{ij} - l_0(1 - x_{ij}) \leq \tau_j \quad \forall i \in I_0, \forall j \in V_{n+1}, i \neq j$$

$$(6) \tau_i + t_{ij}x_{ij} + g(Q - y_i) - (l_0 + gQ)(1 - x_{ij}) \leq \tau_j \quad \forall i \in F', \forall j \in V_{n+1}, i \neq j$$

$$(7) e_j \leq \tau_j \leq l_j \quad \forall j \in V_{0,n+1}$$

$$(8) 0 \leq u_j \leq u_i - q_i x_{ij} + C(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_{n+1}, i \neq j$$

$$(9) 0 \leq u_0 \leq C$$

$$(10) 0 \leq y_j \leq y_i - (r \cdot d_{ij})x_{ij} + Q(1 - x_{ij}) \quad \forall j \in V_{n+1} \text{ en } i \in I, i \neq j$$

$$(11) 0 \leq y_j \leq Q - (r \cdot d_{ij})x_{ij} \quad \forall j \in V_{n+1}, \forall i \in F'_0, i \neq j$$

Beperking (5) verzekert de tijdshaalbaarheid van bogen die klanten en het depot verlaten. (6) doet hetzelfde voor bogen die oplaadknooppunten verlaten. Beperking (7) garandeert dat elk knooppunt bezocht wordt binnen het voorziene tijdsvenster. Deze drie voorgaande vergelijkingen verhinderen verder de vorming van subtours. (8) en (9) moeten zorgen voor de vervulling van de vraag ( $q_i$ ) bij alle klanten door een niet-negatieve cargo te verzekeren bij aankomst op een knooppunt. De variabele  $u_j$  stelt hierbij de resterende vrachtlading voor bij knooppunt  $j$ . Beperking (10) is hetzelfde als vergelijking (10) bij Erdogan en Miller-Hooks (2012). (10) en (11) samen moeten garanderen dat de batterijlading nooit kleiner dan nul wordt.

Als oplossingsmethode hebben de auteurs gekozen voor een hybride methode, een combinatie van 'Variabele Neighbourhood Search (VNS)' en 'Tabu Search (TS)'. In een eerste stap, de voorverwerking, worden alle niet-haalbare bogen verwijderd en een initiële oplossing  $S$  gegenereerd met een gegeven aantal voertuigen. Onuitvoerbare oplossingen zijn deze die de beperkingen betreffende capaciteit en tijd overschrijden en voor dit probleem specifiek ook overtredingen met betrekking tot de batterij. Indien het reizen op een boog en het reizen naar en van die boog tot een tankstation of het depot meer batterij verbruikt dan de batterijcapaciteit, dan kan deze boog als onuitvoerbaar bestempeld worden. De initiële oplossing wordt bekomen door eerst alle klanten te sorteren in oplopende volgorde van de hoek tussen het depot, een willekeurig gekozen punt en de klant. Vervolgens worden klanten iteratief toegevoegd in de actieve route op die positie waar de toename in afgelegde afstand minimaal is. Dit gaat verder totdat een overschrijding van de capaciteit of batterijcapaciteit zich voordoet. Wanneer zo een overschrijding voorkomt, wordt een nieuwe route geactiveerd totdat maximaal het vooraf gedefinieerde aantal routes geopend zijn. De batterijcapaciteitsoverschrijding wordt bepaald onder de assumptie dat er geen herlaadmogelijkheid bestaat.

Niet-haalbare oplossingen worden toegelaten tijdens de zoektocht en geëvalueerd op basis van een boetekostfunctie. Vervolgens wordt een haalbaarheidsfase uitgevoerd waarbij het aantal voertuigen verhoogd wordt indien geen haalbare oplossing gevonden werd voor een gegeven aantal van  $\eta_{feas}$

iteraties. Nadat een haalbare oplossing gevonden wordt, zullen  $\eta_{dist}$  andere iteraties uitgevoerd worden om de reisafstand te optimaliseren (d.i. zo kort mogelijk).

Bij de klassieke VNS wordt de huidige oplossing als de beste oplossing gezet en wordt gezocht naar naburige oplossingen. Indien een naburige oplossing beter is dan de huidige oplossing accepteert het algoritme deze en wordt het de nieuwe referentie-oplossing totdat weer een naburige uitkomst gevonden wordt die beter is. Voor het E-VRPTW gebruiken de auteurs een ander aanvaardbaarheids criterium dat geïnspireerd is op de metaheuristiek 'simulated annealing'. Hierbij worden alle oplossingen die beter zijn altijd aanvaard, terwijl de oplossingen die slechter zijn enkel aanvaard worden volgens een bepaalde kans die berekend wordt. De TS component vertrekt van de oplossing gevonden bij VNS en bij elke iteratie wordt gekozen voor de beste 'non-tabu' mogelijkheid. Deze is superieur indien het in staat is het aantal gebruikte voertuigen te verminderen of als het in staat is een lagere waarde uit te komen voor de kostenfunctie. De TS component introduceert een geheugenstructuur waardoor voorkomen wordt dat teruggekeerd wordt naar de vorige oplossing en de zoektocht in een cyclus terechtkomt. Elke boog die verwijderd wordt uit de oplossing komt in een zogenaamde tabulijst te staan. Dit betekent dat de heropneming van die boog in de oplossing verboden is voor een bepaald aantal iteraties. De procedure stopt uiteindelijk na een bepaald aantal iteraties (Schneider et al., 2012).

Schneider et al. (2012) voeren een numeriek experiment uit om de prestaties van de hybride methode te vergelijken met de heuristieken van het G-VRP. De heuristieken worden vergeleken met de best bekomen oplossing door optimalisatieprogramma CPLEX. Uit de resultaten kunnen de auteurs concluderen dat de VNS/TS heuristiek beter presteert dan de MCWS en DBCA heuristieken voorgesteld door Erdogan & Miller-Hooks (2012). In elk geval wordt de CPLEX-oplossing geëvenaard of wordt zelfs een betere oplossing bekomen. Bovendien is de hybride methode in staat om in bijna de helft van de gevallen het gebruikte aantal voertuigen te halveren.

Het E-VRPTW, dat specifiek gericht is op elektrische voertuigen, breidt het G-VRP verder uit door de toevoeging van tijdvensters en wijkt af van de assumptie van vaste laadtijden. In de toekomst zou verder onderzoek het G-VRP nog beter kunnen doen aansluiten bij de realiteit door bijvoorbeeld af te wijken van de veronderstelling van homogene voertuigen. In de bestaande literatuur over het G-VRP wordt tot nu toe uitgegaan van eenzelfde – homogene – voertuigen. Voertuigen kunnen echter verschillen in snelheid, draagvermogen, uitrusting alsook kostenstructuur. Aangezien het model voor brandstofverbruik nauw verwant is aan de staat van het voertuig, kan de flexibiliteit geboden door verschillende types van voertuigen te gebruiken resulteren in een verdere daling van het brandstofverbruik. Andere problemen in de realiteit gaan bijvoorbeeld over de beschikbaarheid aan en de capaciteit van laadstations. Deze kunnen voor veranderingen zorgen in de optimale routes. Ook de willekeurige dienstverleningstijd aan dergelijke stations zal een invloed hebben op de reistijd en de aankomsttijd bij elk knooppunt (Lin, Choy, Ho, Chung & Lam, 2013).

## 2.2. Allocatiemodellen

Een cruciale hindernis die de algemene verspreiding van voertuigen op alternatieve brandstoffen tegenhoudt is – zoals eerder aangehaald in sectie 1.5.1 – het beperkte rijbereik en de schaarsheid aan tank- of laadfaciliteiten op gunstige locaties. Een belangrijke barrière hierbij zijn de enorme investeringskosten die gepaard gaan met de ontwikkeling van een goed verspreide tank- of laadinfrastructuur. Dit is een van de redenen waarom de automobielenindustrie op dit moment hybride voertuigen die zowel op benzine als elektriciteit rijden promoten als hét voertuig voor lage emissies. Hybride voertuigen kunnen bijgetankt worden bij bestaande tankstations, maar het blijft onzeker of deze voor een significante daling van de emissies en petroleumimporten zullen zorgen. Daarom is het belangrijk methoden te ontwikkelen die de kosten gekoppeld aan de uitbouw van een tankinfrastructuur voor alternatieve brandstoffen kunnen minimaliseren (Kuby & Lim, 2005).

Het onderscheid wordt gemaakt tussen twee types van oplaadstations voor elektrische voertuigen. Enerzijds bestaan zogenaamde snellaadpunten waarbij een batterij in twintig à dertig minuten volledig wordt opgeladen, maar in de praktijk blijkt dat het overgrote merendeel van de laadstations langzaam opladen. Dit is te wijten aan mogelijk beperkte stroomvoorziening op elke site en de levensduur van een batterij. Een derde mogelijkheid is het vervangen van de batterij door een nieuwe, welke aangekocht kan worden in bijvoorbeeld een supermarkt. Wang & Lin (2013) stellen dat in de nabije toekomst oplaadsystemen verwacht mogen worden die meerdere types van laadstations aanbieden waarbij zowel snel als traag opgeladen kan worden of eventueel de batterij vervangen kan worden. Dit om tegemoet te komen aan de wisselende vraag of voorkeuren die EV weggebruikers hebben. Wang & Lin (2013) hebben een allocatiemodel ontwikkeld voor deze zogenaamde gemengde oplaadstations.

Hodgson (1990) creëerde een 'flow-capturing location model (FCLM)' dat gebaseerd was op het concept van maximale dekking – 'maximum-cover problem' – en waarbij  $p$  faciliteiten gesitueerd werden om de dekking van de voorbijkomende verkeersstromen te maximaliseren.

### Symbolenlijst

$q$	Duidt een bepaald OD-paar aan
$Q$	Set van alle OD-paren
$f_q$	Duidt de flow aan tussen OD-paar $q$
$k$	Duidt een potentiële faciliteitlocatie aan
$K$	Set van alle potentiële faciliteitslocaties
$y_q$	Binaire variabele: 1 indien $f_q$ gedekt wordt; 0 indien niet
$x_k$	Binaire variabele: 1 indien er een faciliteit is op locatie $k$ ; 0 indien niet
$N_q$	De set knooppunten die in staat zijn $f_q$ te dekken (d.i. de set van knooppunten op pad $q$ tussen $O_i$ en $D_j$ )
$p$	Het aantal te plaatsen faciliteiten

Tabel 4: Symbolenlijst Flow-Capturing Location Model

Het model werd als volgt geformuleerd met een symbolenlijst weergegeven in Tabel 4.

$$(1) \text{Max } Z = \sum_{q \in Q} f_q y_q$$

onderworpen aan

$$(2) \sum_{k \in N_q} x_k \geq y_q \quad \forall q$$

$$(3) \sum_{k \in K} x_k = p$$

$$(4) x_k, y_q \in \{0,1\} \quad \forall k, q$$

Hodgson (1990) heeft gekozen elk oorsprong-bestemmingspaar (OD-paar) uit te drukken met een enkele index  $q$  in plaats van het dubbele subscript  $ij$ . Omdat Hodgson (1990) veronderstelt dat een bestuurder slechts aan één faciliteit stopt onderweg, moet verhinderd worden dat stromen meer dan een keer geteld worden. Dit wordt bereikt via beperking (2) en het definiëren van  $y_q$  als een binaire variabele. Zelfs als de linkerkzijde van (2) meerdere  $x_k$  variabelen zou bevatten gelijk aan één, dan nog kan  $y_q$  niet groter zijn dan één. Beperking (3) bepaalt dat het aantal geplaatste faciliteiten gelijk is aan het aantal te plaatsen faciliteiten  $p$ .

De auteur was een van de eersten die afweek van de veronderstelling dat er een speciale rit gemaakt werd om naar het tankstation te gaan. Heel veel soorten faciliteiten, zoals supermarkten, bankautomaten en benzinstations, dienen de vraag in de vorm van verkeerstromen die de faciliteit passeren. Dus in plaats van de vraag te zien als een set van knooppunten, wordt hier gekeken naar de vraag in de vorm van oorsprong-bestemmingsstromen op het kortste pad. Elke combinatie van vertrek- en eindpunt oefent een bepaalde unieke vraag uit en wordt dus niet geuit op een knooppunt. De auteur legde een basisraamwerk vast dat het probleem van de allocatie van alternatieve tankstations wist aan te pakken, maar deze theorie was afhankelijk van de assumptie dat indien een stroom een dergelijke faciliteit passeerde, dan was die stroom gedekt (Kuby & Lim, 2005). Dit kon niet toegepast worden op alternatieve voertuigen, aangezien deze een beperkt bereik hebben en meerdere haltes moeten maken bij tankstations om hun rijbereik te verlengen en lange afstandsritten te maken (Wang & Lin, 2013). Dit probleem werd verholpen in het model van Kuby & Lim (2005) en later werden nog verbeteringen aan het model gemaakt (Capar & Kuby, 2012; Wang & Lin, 2009; Wang, 2011).

### Symbolenlijst

$h$	Index van combinaties van faciliteiten
$H$	Set van alle mogelijke faciliteitcombinaties
$a_{hk}$	Coëfficiënt: 1 indien faciliteit $k$ in combinatie $h$ zit; 0 elders
$b_{qh}$	Coëfficiënt: 1 indien faciliteitcombinatie $h$ OD-paar $q$ kan bijtanken; 0 elders
$v_h$	1 indien alle faciliteiten in combinatie $h$ open zijn; 0 elders

Tabel 5: Symbolenlijst Flow Refueling Location Model

Kuby & Lim (2005) introduceerden het 'flow refueling location' model (FRLM).

$$(1) \text{Max } Z = \sum_{q \in Q} f_q y_q$$

begrensd door

$$(2) \sum_{h \in H} b_{qh} v_h \geq y_q \quad \forall q \in Q$$

$$(3) a_{hk} x_k \geq v_h \quad \forall h \in H; k | a_{hk} = 1$$

$$(4) \sum_{k \in K} x_k = p$$

$$(5) x_k, v_h, y_q \in \{0,1\} \quad \forall k, h, q$$

Een symbolenlijst is weergegeven in Tabel 5. De doelfunctie (1) die het totale stroomvolume maximaliseert dat bijgetankt kan worden met  $p$  faciliteiten is hier hetzelfde als in het FCLM. Het volume op elk pad,  $f_q$ , wordt traditioneel gemeten in ritten. Beperking (2) is gelijkaardig aan beperking (2) in het vorige model, alleen in plaats van de vereiste dat tenminste één geschikte faciliteit  $i$  open moet zijn op pad  $q$ , is de vereiste nu dat tenminste één geschikte combinatie van faciliteiten  $h$  open moet zijn voor paden die moeten bijtanken. De nieuwe subscript  $h$  duidt op een combinatie van faciliteiten die in staat zijn pad  $q$  bij te tanken. Er is een masterlijst van combinaties  $h$ , gedeeld door alle  $q$ , die sequentieel geïndexeerd wordt beginnend bij 1. Het is mogelijk dat eenzelfde combinatie  $h$  meer dan één pad  $q$  bijtankt. Beperking (3) zorgt ervoor dat  $v_h$  nul blijft tenzij alle faciliteiten in combinatie  $h$  open zijn. Beperking (4) vereist net als in het FCLM dat exact  $p$  faciliteiten gebouwd dienen te worden.

Kuby & Lim (2005) hebben een algoritme ontwikkeld dat alle haalbare combinaties  $h$  die pad  $q$  kunnen bijtanken genereert en registreert. Hiervoor wordt de assumptie gemaakt dat het bereik van elk voertuig vastligt. Dit betekent dat het brandstofverbruik constant is per kilometer op alle bogen en dat alle voertuigen op hetzelfde tempo brandstof verbruiken en een identieke tankgrootte hebben. Dit laat toe dat brandstof gemeten kan worden als afstandsequivalent, bijvoorbeeld 100 mijl brandstof resterend in de tank. Het algoritme bestaat uit acht stappen. In de eerste stap, de initialisatiestap, worden voor alle OD-paren  $q$  de kortste paden gegenereerd en de knopen en links van het pad opgeslagen. Vervolgens wordt een lege masterlijst opgesteld van alle combinaties  $h$ . In stap 2 wordt beginnend met het volgend pad  $q$  op de lijst een lijst gegenereerd van alle mogelijke combinaties  $h$  van de knopen op het pad. Stap 3 verwijdert faciliteitcombinaties die een voertuig met een gegeven bereik niet kunnen bijtanken op een bepaald pad. In stap 4 worden combinaties verwijderd die supersets zijn van andere overblijvende combinaties. Bijvoorbeeld, indien een pad bijgetankt kan worden door knooppunten 3, 5 en 7, maar ook door 3 en 7 alleen, dan is het niet nodig om de grotere combinatie nog verder te beschouwen. Stap 5 registreert de faciliteiten  $k$  in elke haalbare combinatie  $h$ , en de haalbare combinaties  $h$  voor pad  $q$ . Deze relaties worden opgeslagen in twee coëfficiënten, namelijk  $a_{hk}$  en  $b_{qh}$  die in bovenstaande symbolenlijst verklaard worden. Stap 6 stelt dat stappen 2 tot 5 herhaald dienen te worden voor alle paden  $q$ . Dit algoritme laat zien hoe exogeen bepaald kan worden welke faciliteitcombinaties  $h$  succesvol voertuigen op elk pad  $q$  kunnen bijtanken.

Het FRLM werd getest op hetzelfde vijftientigknoppennetwerk dat Hodgson gebruikt voor het FCLM-model. De kandidaatfaciliteiten waren beperkt tot de vijftientig knopen van het netwerk. De probleemgrootte varieert met het rijbereik van het voertuig. Hoe groter het bereik, hoe meer combinaties mogelijk een gegeven pad kunnen bijtanken. De auteurs vergeleken de optimale



(exacte) oplossing met een zogenaamde 'greedy' oplossing (Kuby & Lim, 2005). Het 'greedy' algoritme begint met een set van vaste faciliteiten en voegt elke keer een faciliteit toe aan de geselecteerde set om de bijkomende gedekte flow te maximaliseren. Dit gaat verder totdat het vooraf bepaald aantal faciliteiten werd toegevoegd (Lim & Kuby, 2010). Uit de vergelijking bleek dat de kloof tussen beide oplossingen tamelijk groot kan zijn voor voertuigen met een zeer klein rijbereik, met als gevolg dat de 'greedy' oplossing suboptimaal is. Dit is vanwege het feit dat de 'greedy' benadering niet in staat is de voordelen te anticiperen van combinaties van faciliteiten. Een knooppunt aangrenzend aan een eerste knooppunt – en dus een combinatie – wordt door dit algoritme niet beschouwd, omdat er geen OD-paren bijgetankt worden die het eerste knooppunt al kan bijtanken. De auteurs suggereren dat een effectief 'greedy' algoritme voor het FRLM in staat zou moeten zijn om tenminste twee faciliteiten voorbij de huidige oplossing te kijken vooraleer een faciliteit toe te voegen (Kuby & Lim, 2005).

'Flow-capturing' modellen zijn een goed vertrekpunt voor het FRLM, maar deze laatste verschilt aangezien het concept 'beperkt rijbereik' opgenomen wordt in het model. Daarnaast was het in het FCLM zeer belangrijk dat stromen die door meer dan één faciliteit bediend konden worden niet dubbel geteld werden, maar in het FRLM vereist de beperking van het rijbereik dat net wel meerdere faciliteiten beschouwd kunnen worden (Kuby & Lim, 2005).

Wang & Lin (2013) bouwen verder op deze modellen en wijken af van bepaalde assumpties die in eerdere modellen gemaakt worden. Zo worden meerdere types van herlaadstations (d.i. verschillende herlaadtijden) beschouwd, alsook budgetbeperkingen en praktisch routeringsgedrag van voertuigen. Dit laatste verwijst naar het feit dat veel voorgaande modellen veronderstellen dat het afgelegde traject een heen-en-terugreis is. Dit betekent dat een knooppunt opnieuw bezocht zal worden in de terugrit. In de praktijk is dit echter niet noodzakelijk het geval, bijvoorbeeld bij toeristen. Dergelijk gedrag moet dus opgenomen worden in het model. Het is daarnaast soms onmogelijk om te voldoen aan de volledige tankvraag vanwege bron- of budgetbeperkingen en daarom zullen maximale dekkingmodellen waarschijnlijk meer geschikt zijn voor de planning van stationslocaties dan 'set coverage' modellen. Het 'set coverage' model van Wang (2011) is gebaseerd op de assumptie dat er voldoende budget is om de totale vraag te dekken van de passerende verkeerstrom, wat in realiteit niet altijd zo is.

### Symbolenlijst

$B_i^q$	Het beschikbare bereik (km) met het resterende batterijniveau bij knoop $i$ op pad $p$
$R_i^q$	Het extra bereik (km) verkregen na opladen van de batterij bij knoop $i$ op pad $p$
$Y_{ik}^q$	= 1 indien een EV opgeladen wordt door een station van type $k$ bij knoop $i$ op pad $p$ = 0 elders
$t_i^q$	Verblijfsduur bij knoop $i$ op pad $p$
$\beta^k$	De bijkomende rijafstand per minuut dat opgeladen wordt (km/min)
$\gamma$	Maximale batterijcapaciteit, gelijk aan het EV bereik (km) met volle batterij
$s^k$	Mate waarin een laadpunt gezamenlijk gebruikt
$X_i^k$	$\geq 0$ indien er stations van type $k$ gevestigd zijn bij knooppunt $i$ ; 0 elders

$u_i^k$	Het maximum aantal stations van type $k$ dat gevestigd kan worden op knooppunt $i$
$c_i^k$	Kost van het plaatsen van een tankstation van type $k$ op knooppunt $i$
$l$	Beschikbaar budget voor het vestigen van tankstations
$N$	Set van alle knooppunten (potentiële locaties)
$K$	Set van alle types van tankstations

**Tabel 6: Symbolenlijst allocatiemodel Wang & Lin (2013)**

Het probleem van de allocatie van meerdere types van tankstations kan als volgt geformuleerd worden (Wang & Lin, 2013):

$$\text{Max} \sum_{q \in Q} f_q y_q$$

onderworpen aan

- (1)  $B_j^q = (B_i^q + R_i^q) - y_q d_{ij} \quad \forall i, j \in N, \forall q \in Q$
- (2)  $R_i^q \leq -B_i^q \quad \forall i \in N, \forall q \in Q$
- (3)  $R_i^q \leq \sum_{k \in K} (Y_{ik}^q t_i^q \beta^k) \quad \forall i \in N, \forall q \in Q$
- (4)  $R_i^q \leq y_q \gamma \quad \forall i \in N, \forall q \in Q$
- (5)  $\sum_{k \in K} Y_{ik}^q \leq 1 \quad \forall i \in N, \forall q \in Q$
- (6)  $s^k X_i^k \leq \sum_{q \in Q} (Y_{ik}^q f_q) \quad \forall k \in K, \forall i \in N$
- (7)  $X_i^k \leq u_i^k \quad \forall k \in K, \forall i \in N$
- (8)  $\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} c_i^k X_i^k \leq l$
- (9)  $y_q, Y_{ik}^q \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall i \in N, \forall q \in Q$
- (10)  $X_i^k, B_i^q, R_i^q \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in N, \forall q \in Q$

Een symbolenlijst wordt weergegeven in Tabel 6. De doelfunctie maximaliseert de dekking van elektrische voertuigstromen op paden door de allocatie van meerdere types van stations. Beperking (1) stelt dat wanneer een elektrisch voertuig reist van knooppunt  $i$  naar knooppunt  $j$  (d.i. indien  $y_q = 1$ ), dan is het beschikbare rijbereik met de resterende energie bij knooppunt  $j$  gelijk aan het beschikbare rijbereik met de resterende energie bij knooppunt  $i$ , plus het bijkomende bereik indien de batterij opgeladen werd bij  $i$ , en minus de afgelegde afstand (d.i. de energie verbruikt) tussen de twee knooppunten. De variabele  $y_q$  is hier de kritische variabele die bepaalt of een pad al dan niet gedekt wordt. De volgende beperking (2) geeft een voorstelling van het extra bereik gebruikmakend van de bijgetankte energie bij een knooppunt, die kleiner of gelijk moet zijn dan het bereik van de verbruikte energie. Beperking (3) bepaalt dat het bijkomend bereik kleiner of gelijk moet zijn aan het bijkomende bereik wanneer de batterij volledig opgeladen wordt. Dus een elektrisch voertuig met een maximaal rijbereik van 40 km en een huidig bereik van 10 km kan maximaal 30 km bijkomend bereik verkrijgen. Belangrijke factoren hierbij zijn het type laadstation ( $k$ ), de tijd dat bij het tankstation gebleven wordt ( $t_i^q$ ) en het tempo van opladen ( $\beta^k$ ) uitgedrukt in kilometers per minuut.

Beperking (4) stelt dat wanneer een pad niet gedekt wordt, dus  $y_q = 0$ , dan moet het bijkomend bereik op elk knooppunt van dat pad gelijk zijn aan 0. Wanneer  $y_q = 1$ , dan is het extra bereik kleiner of gelijk aan het maximum bereik ( $\gamma$ ) van het elektrisch voertuig. De vijfde beperking

bepaalt dat een EV op een pad enkel één type van laadstation kan gebruiken bij een knooppunt. Beperking (6) stelt dat het totaal aantal voertuigen dat opgeladen wordt aan stationtype  $k$  in knooppunt  $i$  groter of gelijk is aan het aantal stations van type  $k$  op knooppunt  $i$ . Beperking (7) betekent dat het aantal van elk type laadstation gelegen op een site kleiner of gelijk moet zijn aan de plaatsingscapaciteit voor elk stationtype. De limieten van het lokale stroomverbruik en landgebruik worden beschouwd in de parameter  $u_i^k$ . Beperking (8) geeft de budgetbeperking en stelt een maximum op het aantal stations, ongeacht het type. Beperking (9) bepaalt integere waarden voor  $y$  en  $Y$  en beperking (10) garandeert dat de variabelen  $X$ ,  $B$  en  $R$  niet kleiner zijn dan nul.

Om het aantal laadstations en locatie ervan te bepalen tegen zo laag mogelijke kosten stellen Wang & Lin (2013) volgende doelfunctie voorop.

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} c_i^k X_i^k$$

De beperkingen blijven identiek als in bovenstaand model. Met een kostenminimaliserend objectief is de stationkost dus een kritische factor bij de selectie van het type laadstation.

In dit model wordt gewerkt met een enkel objectief, namelijk het minimaliseren van de kosten of het maximaliseren van de flow-dekking, en is vooral interessant vanuit het standpunt van de leverancier. Voertuiggebruikers, daarentegen, kunnen andere zaken belangrijk vinden, zoals hoe toegankelijk de infrastructuur is en of het voertuig in korte tijd opgeladen kan worden. In de toekomst zou het bestaande model dus uitgebreid kunnen worden met meerdere objectieven, bijvoorbeeld het minimaliseren van de laadkosten of laadtijd. Dan kan vanuit het standpunt van de gebruikers de optimale samenstelling van stationslocaties bepaald worden. Verder dient ook de impact van het tanksysteem op het bestaande elektriciteitsnet onderzocht te worden.

### 2.3. Conclusie

Elk type alternatieve brandstof wordt tijdens de ontwikkeling geconfronteerd met obstakels van een structurele aard. Het is belangrijk naar de toekomst toe om betrouwbare technologieën te verkrijgen. De risico's verbonden aan deze nieuwe technologieën hebben betrekking op de aanvaarding van dit type voertuigen alsook investeringsrisico's. Fabrikanten zullen niet geneigd zijn dergelijke risico's te nemen zonder een duidelijk wetgevend kader dat de ontwikkeling van deze nieuwe motortechnologieën afdwingt en ondersteunt. Beleidsmakers hebben dus een rol te spelen in het wegnemen of verminderen van de onzekerheid door gepaste en tijdige maatregelen, wetgeving en standaarden te implementeren. Ook op gebied van kosten kan de overheid een rol spelen. Op dit moment zijn de kosten verbonden aan alternatieve brandstoffen nog vrij hoog, maar deze zullen geleidelijk aan afnemen naarmate het gebruik ervan toeneemt. Belastingvoordelen kunnen op dit gebied een extra stimulans geven (Steenberghen & López, 2008).

Uit de besproken modellen is gebleken dat het incorporeren van alternatieve brandstoffen of voertuigen aanpassingen vereist. Anders dan bij voertuigen op benzine of diesel kan er niet vanuit gegaan worden dat ritten met een tank de volledige route kunnen afleggen zonder bij te tanken. Deze beperking van het rijbereik dient in het model opgenomen te worden, maar ook de optimale plaatsing van alternatieve tankstations is cruciaal om tot optimale ritten te komen. Het G-VRP en het E-VRPTW zijn op dit moment de enige twee gepubliceerde onderzoekmodellen die herlaad- of bijtankproblemen behandelen. Hierin wordt getracht het risico om zonder brandstof te vallen te elimineren.

In het vervolg van deze thesis wordt een praktijkstudie uitgevoerd op het E-VRPTW model. Dit model werd boven het G-VRP verkozen, aangezien het E-VRPTW het G-VRP gebruikt als basis en er op verderbouwt door tijdsvensters, vrachtbeperkingen en variabele laadtijden toe te voegen. Het model is daarenboven ook specifiek ontwikkeld voor het gebruik van elektriciteit als alternatieve brandstof, welke ook de voorkeur krijgt in dit onderzoek. Elektriciteit werd verkozen aangezien geen vervuilende emissies vrijkomen in tegenstelling tot alternatieve brandstoffen zoals CNG, LNG, biodiesel die weliswaar minder uitstoot van vervuilende stoffen hebben, maar toch nog altijd een bepaalde hoeveelheid uitstoten. Een andere voorname reden is dat bij elektrische voertuigen het probleem van oplaadtijden een belangrijke rol speelt. Bij waterstof, een andere alternatieve brandstof zonder schadelijke emissies, is dit niet het geval, en bovendien is de waterstoftechnologie nog niet op een punt gekomen dat wijdverspreide commerciële exploitatie mogelijk is. Elektrische voertuigen, daarentegen, zijn wel al in commerciële omloop.



## Hoofdstuk 3: Praktijkstudie

---

### 3.1 *Introductie*

In dit hoofdstuk worden een aantal experimenten uitgevoerd op het E-VRPTW model van Schneider et al. (2012). Eerst volgt een gedetailleerde modelformulering gevolgd door een beschrijving van de gegevens van de onderzochte case – replicatie 1. Daarna zullen verschillende scenario's behandeld worden. Zo zal in een eerste scenario gezocht worden naar een oplossing in het geval dat alle beschikbare laadstations snellaadstations zijn. Vervolgens zal dit scenario dichterbij de realiteit gebracht worden door ook andere types van laadpunten in beschouwing te nemen en hierbij zal ook gekeken worden naar beschikbare gegevens over oplaadpunten in België. In een derde scenario zal dan nog de invloed van de vrachtlading op het batterijverbruik in rekening gebracht worden.

Alle scenario's zullen tien keer gerepliceerd worden en dit bij drie verschillende gemiddelde snelheden. De verschillende replicaties zullen gebeuren door middel van verschillende willekeurige getallen.

Alle tests werden uitgevoerd op een desktop computer uitgerust met een Intel Core 2 Duo processor, 4 GB RAM en besturingssysteem Windows 7 Ultimate.

### 3.2 *Modelformulering*

In het 'Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations (E-VRPTW)' van Schneider et al. (2012) wordt een verzameling klanten bediend die elk een bepaalde vraag hebben. Het verschil met eerdere rittenplanningsmodellen is dat in dit model gebruik gemaakt wordt van een elektrisch voertuig. Aangezien de autonomie van dergelijke voertuigen een stuk lager ligt dan van conventionele benzine- of dieselveertuigen, dienen tussenstops bij laadstations, dit zijn tankstations voor elektrische voertuigen, opgenomen te worden in het model. Het G-VRP (Erdogan & Miller-Hooks) veronderstelde nog vaste laad- of tanktijden voor dergelijke voertuigen, maar Schneider et al. (2012), de auteurs van het E-VRPTW, hebben voor een meer realistische benadering gekozen en maken deze tijd afhankelijk van het resterende batterijniveau bij aankomst aan het laadstation.

De verzameling van alle knooppunten wordt aangeduid met  $V = I \cup F'$ , waarbij  $I$  wijst op de set van klanten en  $F'$  op een set van dummyknooppunten gegenereerd om verschillende bezoeken toe te laten aan elk knooppunt in de set van  $F$  laadstations (Schneider et al., 2012). In tegenstelling tot de verschillende klanten kunnen laadstations wel meerdere keren bezocht worden. Om meerdere haltes (of helemaal geen) toe te laten voor een deelverzameling van knooppunten en exact één halte te vereisen voor andere knooppunten, wordt het netwerk vermeerderd met een verzameling van dummyknooppunten, één voor elk potentieel bezoek aan een laadstation (Erdogan & Miller-Hooks, 2012). De knooppunten  $v_0$  en  $v_{n+1}$  duiden hetzelfde depot aan, waarbij elke route begint bij  $v_0$  en eindigt bij  $v_{n+1}$ . De indices 0 en  $n + 1$  geven aan dat een set het betreffende depot bevat,

bijvoorbeeld  $V_0 = V \cup \{v_0\}$ . Op deze manier kan het E-VRPTW gedefinieerd worden op een gericht netwerk  $G = (V_{0,n+1}, A)$  met de set van bogen  $A = \{(i, j) | i, j \in V_{0,n+1}, i \neq j\}$  (Schneider et al., 2012).

Met elke boog wordt een afstand  $d_{ij}$  en een reistijd  $t_{ij}$  geassocieerd. Elke afgelegde boog consumeert  $r \cdot d_{ij}$  van de resterende batterijlading van het voertuig dat op de boog reist, waarbij  $r$  een constant verbruiksniveau aanduidt.

Bij het depot is een set van homogene voertuigen gepositioneerd met een maximum vrachtcapaciteit van  $C$ . Elke knooppunt  $i \in V_{0,n+1}$  heeft een positieve vraag  $q_i$  toegewezen gekregen, die op nul gezet wordt indien  $i \notin I$ . Elk knooppunt  $i \in V_{0,n+1}$  heeft daarnaast een tijdvenster  $[e_i, l_i]$  en alle klanten  $j \in I$  hebben een bijbehorende dienstverleningstijd  $s_j$ . De dienstverlening kan niet beginnen voor  $e_i$ , wat kan leiden tot wachttijd, en is niet toegelaten te beginnen na  $l_i$ , maar kan wel later eindigen. Bij een laadstation wordt het verschil tussen het huidige batterijniveau en de batterijcapaciteit  $Q$  bijgeladen met een herlaadtempo van  $g$ . De herlaadtijd hangt af van het brandstofniveau van het voertuig wanneer deze aankomt bij het respectievelijke laadstation.

De resterende variabelen zijn  $\tau_j$  die de aankomsttijd bij knooppunt  $j$  specificeert,  $u_j$  die duidt op de resterende vrachtlading en  $y_j$  tot slot geeft het resterende batterijniveau aan bij aankomst op knooppunt  $j \in V_{0,n+1}$ . De beslissingsvariabele  $x_{ij} | i \in V_0, j \in V_{n+1}, i \neq j$  is binair en gelijk aan 1 indien op een boog van  $i$  naar  $j$  wordt gereisd, anders 0.

Het doel van het E-VRPTW is om de totaal afgelegde afstand te minimaliseren en het mathematisch model wordt geformuleerd als een gemengd geheeltallig probleem en is zoals weergegeven in sectie 2.1.3.

### 3.3 Beschrijving van de gegevens

Het model wordt toegepast op een eenvoudig voorbeeld dat tien klanten omvat, dus  $I = v_1, \dots, v_{10}$ . Daarnaast worden ook vijf laadstations in het model opgenomen waaronder het depot, aangezien het eveneens mogelijk is om de batterij onderweg op te laden bij het depot. Alle punten worden uitgezet in een cartesisch coördinatenstelsel waarbij zowel de horizontale als verticale as een bereik hebben van nul tot honderdvijftig kilometer. Het actieve gebied bedraagt dus 22 500 km<sup>2</sup>. In dit voorbeeld is  $n = 15$ , namelijk tien klanten en vijf laadstations. De coördinaten van de verschillende punten werden willekeurig bepaald met behulp van de functie ASELETTUSSEN(minimum, maximum) van Microsoft Office Excel (zie Tabel 7 en Figuur 1).

In de tabel zijn ook de tijdsvensers weergegeven voor alle knooppunten. Net als de coördinaten werden ook de tijdsvensers voor de verschillende klanten willekeurig bepaald aan de hand de functie ASELETTUSSEN van Office Excel. Voor  $e_i$  is dit een willekeurig getal tussen 0 en 540 minuten (negen uur), waarbij  $e_i = 0$  het tijdstip acht uur 's morgens aanduidt wanneer het depot opengaat. Het maximum werd op 9 uur gezet zodat alle voertuigen ruim de tijd hebben om terug te keren naar het depot. Voor  $l_i$  ligt dit willekeurig getal tussen  $e_i + 60$  en 540 minuten aangezien

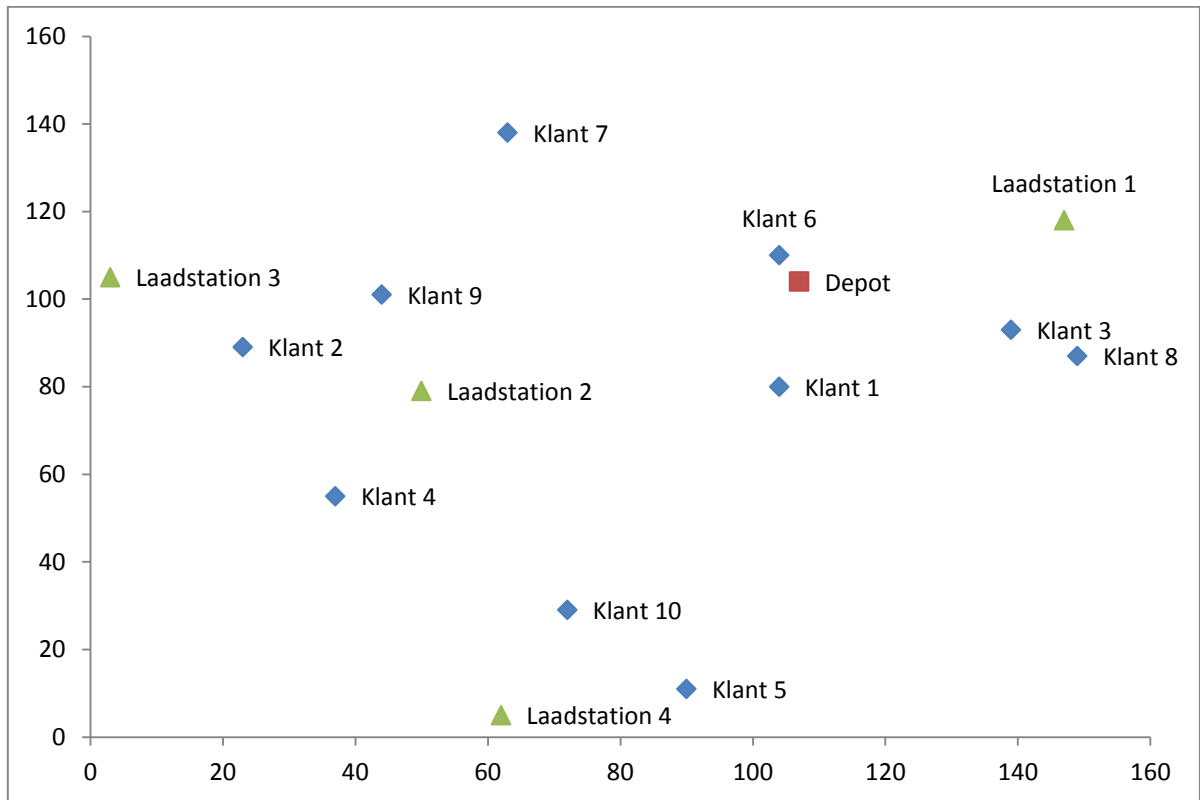
de laatste starttijd voor de dienstverlening nooit eerder kan plaatsvinden dan de vroegste starttijd  $e_i$ . Bovendien wordt ook een minimum tijdvenster van een uur gehanteerd. Alle gevonden willekeurige waarden worden afgerond tot op vijf minuten om bizarre tijdstippen zoals 16u22 te vermijden. Het depot is geopend van 08u00 tot 19u00 en dus dienen alle voertuigen voor 19u00 hun rit voltooid te hebben en teruggekeerd zijn. Voor de laadstations wordt eenzelfde tijdvenster gehanteerd als voor het depot. In realiteit zullen dergelijke stations vaak de klok rond geopend zijn, maar voor het rittenplanningsmodel is het herladen slechts relevant binnen het opgegeven tijdvenster overeenkomend met een werkdag.

Zoals aangehaald in sectie 3.2 maken Schneider et al. (2012) gebruik van een dummy set van laadstations om mogelijke individuele bezoeken te kunnen onderscheiden. In deze case werd arbitrair gekozen om tien mogelijke bezoeken toe te laten aan eenzelfde laadstation. Het is belangrijk dat dit aantal groot genoeg is, zodat bij de vorming van ritten voertuigen de mogelijkheid hebben om bij eender welk laadstation te herladen en niet gedwongen zijn een suboptimaal laadstation te kiezen, wat ook zou leiden tot een suboptimale rittenplanning. Daarom wordt in deze kleinschalige case voor elk van de vijf laadstations tien dummy knooppunten gegenereerd en bevat de dummy set dus veertig punten. In realiteit bestaat wel de kans dat wanneer een voertuig aankomt aan een laadstation mogelijk alle beschikbare laadpunten op die locatie in gebruik zijn. Dit zou dan kunnen leiden tot extra wachttijd of de keuze om verder te rijden naar een ander laadstation (Xi, Sioshansi & Marano, 2013).

	$(x, y)$	Tijdvenster $[e_i, l_i]$	Vraag $q_i$	Dienstverleningstijd $s_i$ (in min)
<b>Depot</b>	(107,104)	[08.00; 19.00]		
<b>Klanten</b>				
$l_1$	(104,80)	[10.45; 13.40]	670	30
$l_2$	(23,89)	[12.20; 14.40]	4979	30
$l_3$	(139,93)	[14.40; 16.20]	2616	30
$l_4$	(37,55)	[11.20; 15.00]	636	30
$l_5$	(90,11)	[10.15; 16.50]	3103	30
$l_6$	(104,110)	[09.45; 13.10]	667	30
$l_7$	(63,138)	[15.45; 16.45]	1320	30
$l_8$	(149,87)	[12.50; 16.55]	953	30
$l_9$	(44,101)	[15.25; 16.30]	28	30
$l_{10}$	(72,29)	[13.00; 15.00]	28	30
<b>Laadstations</b>				
$F_1$	(147,118)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
$F_2$	(50,79)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
$F_3$	(3,105)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
$F_4$	(62,5)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
$F_5$ (d.i. het depot)	(107,104)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij

Tabel 7: Overzicht gegevens replicatie 1





Figuur 1: Weergave punten replicatie 1 in cartesisch coördinatenstelsel

Browne, O'Mahoney & Caulfield (2012) stellen dat de afstand die BEV's kunnen afleggen afhankelijk is van het type en aantal geïnstalleerde batterijen, en kan variëren van ongeveer vijftig kilometer tot bij benadering tweehonderd kilometer. Om de specificaties voor een elektrisch voertuig zo dicht mogelijk bij de realiteit te brengen, werd gezocht naar een praktisch voorbeeld van een dergelijk voertuig. De 'Smith Newton' van Smith Electric Vehicles is zo een voorbeeld. Verschillende bedrijven maken reeds gebruik van dit voertuig, waaronder DHL, TNT Express, Coca Cola en FedEx Express. De 'Smith Newton' heeft een rijbereik van vijfenzestig tot honderdzestig kilometer en kan een topsnelheid bereiken van tachtig kilometer per uur (Smith Electric Vehicles, 2011). Het is dus aannemelijk om in deze case te veronderstellen dat een enkel elektrisch voertuig met een volle batterij gemiddeld honderdvijftig kilometer kan rijden. Dit komt neer op een constant gemiddeld verbruiksniveau van ongeveer 0,66% per kilometer en dus  $r = 0,0066$ . Daarnaast wordt verondersteld dat de gemiddelde snelheid van het voertuig vijfenzestig kilometer per uur bedraagt.

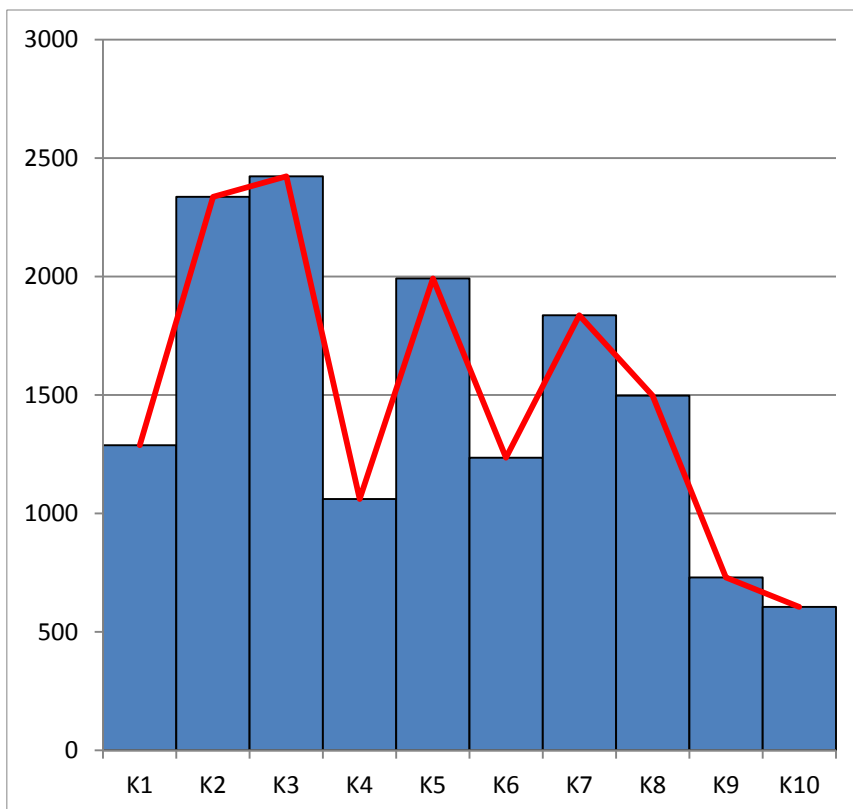
De 'Smith Newton' heeft een vrachtcapaciteit gaande van tweeduizend achthonderd kilo tot zevenduizend vierhonderd kilo (Smith Electric Vehicles, 2011). Op basis hiervan wordt gesteld dat een voertuig een maximum cargocapaciteit heeft van 5000 kilogram. In deze case wordt de veronderstelling gemaakt dat de totale vraag 15 000 kilogram bedraagt. Er zijn dus meerdere ritten nodig om de vraag te bedienen. In een model zonder tijdvensters zou alle vraag bediend kunnen worden met drie voertuigen, maar in het E-VRPTW wordt wel gebruik gemaakt van tijdvensters en dus zal dit een invloed hebben op het aantal gebruikte voertuigen. De vraag per individuele klant wordt weergegeven in Tabel 7. Deze individuele vraag werd net als bij de

tijdvensters en coördinaten bepaald aan de hand van de functie ASELETTUSSEN van Office Excel. Voor klant 1 gaat het hierbij om een willekeurige vraag die ligt tussen 1 kg en 5 000 kg. Het minimum wordt op 1 kg gezet, aangezien bij 0 kg de klant niet bezocht dient te worden, want er is geen vraag. De assumptie wordt gemaakt dat de vraag van elke individuele klant door één voertuig bediend kan worden en dus wordt het maximum voor klant 1 bepaald op 5 000 kg. Voor klant 2 tot en met 9 blijft het minimum hetzelfde, maar wordt voor het maximum een ander cijfer gehanteerd. Aangezien de som van de individuele vraag van de tien klanten gelijk moet zijn aan 15 000 kg, is het maximum dus gelijk 15 000 min de som van alle voorgaande klanten, dus bijvoorbeeld het maximum voor klant 5 bedraagt 15 000 min de som van de vraag van klant 1 tot en met klant 4. Maar daarnaast mag de vraag ook niet groter worden dan 5 000 kg en dus wordt het maximum als volgt gedefinieerd, namelijk  $\text{MIN}(5000; 15000 - \text{SOM}(\text{voorgaande klanten}))$ . Voor klant 10 wordt de vraag simpelweg bepaald als 15 000 min de som van alle voorgaande klanten.

Dit wordt voor alle tien replicaties uitgevoerd en geeft een gemiddelde vraag per klant zoals weergegeven in Tabel 8. Het totaal gemiddelde bedraagt 1500 kg met een standaardfout van 633,26 kg en resulteert in een rechts-scheve verdeling in Figuur 2.

<b>Gemiddelde vraag per klant over alle tien replicaties heen</b>	
<b>Klant 1</b>	1287,3
<b>Klant 2</b>	2335,7
<b>Klant 3</b>	2422,6
<b>Klant 4</b>	1060,6
<b>Klant 5</b>	1991,6
<b>Klant 6</b>	1235,4
<b>Klant 7</b>	1836,7
<b>Klant 8</b>	1496,5
<b>Klant 9</b>	728,9
<b>Klant 10</b>	604,7
<b>Gemiddelde</b>	1500
<b>Variantie</b>	401013,2
<b>Standaard fout</b>	633,2561

Tabel 8: Gemiddelde vraag per klant over alle replicaties heen

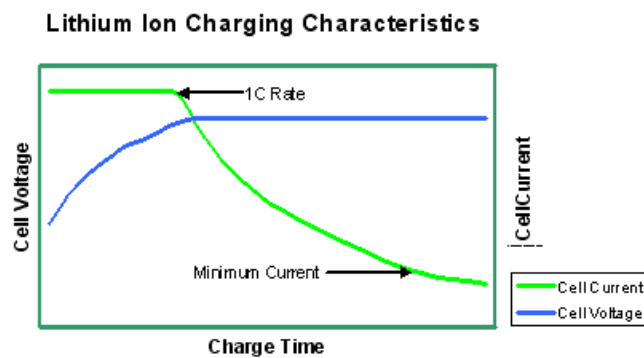


**Figuur 2: Verdeling gemiddelde vraag over alle replicaties heen**

Wat betreft dienstverlening wordt de aanname gemaakt dat dit een vaste tijdsduur heeft bij elke klant, namelijk dertig minuten. De dienstverleningstijden voor de laadstations zijn afhankelijk van de resterende batterijlading bij aankomst aan een laadstation en ook van het scenario.

### 3.4 Scenario 1: Uitsluitend snellaadstations

In dit scenario wordt met betrekking tot het opladen van de batterij aangenomen dat dit gebeurt bij een snellaadstation en dat in twintig à dertig minuten de batterij voor 80 procent opgeladen is (van Rijnsover, Hagen & Willems, 2013). Indien 80 procent op dertig minuten geëxtrapoleerd wordt naar 100 procent, wordt een tijd van zevenendertig en een halve minuut bekomen. Lithiumbatterijen die opgeladen worden kunnen schade ondervinden wanneer de hoogste voltagegrens overschreden wordt. Daarom hebben fabrikanten een 'constant current charging rate' bepaald als het maximum laadtempo die de batterij kan verdragen zonder beschadigd te worden. Hierbij wordt de batterij opgeladen bij wisselende voltages, maar tegen een constante elektrische stroom. Om te voorkomen dat de bovenste voltagegrens overschreden wordt, is het aanbevolen dat de laadmethode overschakelt naar een constant voltage vooraleer deze limiet te bereiken. Tijdens deze constante voltage periode neemt de elektrische stroom af naar een druppellading naarmate de lading de voltooiing benadert. Het gevolg hiervan is dat vanaf de het moment dat overgeschakeld wordt naar een constant voltage, het laadtempo zal gaan afnemen (Battery University, 2010). Figuur 3 geeft de stroom- en voltageniveaus weer.



**Figuur 3: Elektrische stroom- en voltageniveau gedurende opladen lithium batterij (Battery University, 2010)**

Op basis hiervan wordt een oplaadtijd van vijfenveertig minuten verondersteld om tot 100 procent te geraken. Dit betekent dat elke minuut 2,22 procent van de batterij opgeladen wordt of dat 27,02 seconden nodig zijn om 1 procent van de batterij op te laden. Voor de modelformulering komt dit neer op  $g = \frac{1}{0,0222} = 45,05$ .

Aan het E-VRPTW-model wordt ook nog een beperking toegevoegd met betrekking tot het aantal gebruikte voertuigen. Deze beperking is analoog aan degene gebruikt in het G-VRP van Erdogan & Miller-Hooks (2012).

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{0j} \leq m$$

Deze vergelijking stelt dus dat niet meer dan  $m$  voertuigen het depot mogen verlaten. In dit voorbeeld werd gekozen om dit maximum op vijf voertuigen te zetten. Of dit aantal groot genoeg is, is afhankelijk van de gehanteerde tijdvensters.

Voor deze case werd een euclidische afstandsmatrix ( $d_{ij}$ ) opgesteld, waarbij alle waarden zijn uitgedrukt in kilometers. Dit is weergegeven in Tabel 33 in bijlage 1. Op basis van deze afstandsmatrix en de gemiddelde snelheid kunnen ook de reistijden ( $t_{ij}$ ) tussen de verschillende knooppunten bepaald worden. Deze zijn weergegeven in Tabel 34 in bijlage 1. Alle tijden zijn aangeduid in minuten.

Het E-VRPTW werd samen met de gegevens voor de case van tien klanten ingevoerd in het softwareprogramma AIMMS (<http://business.aimms.com/>). Dit modelleersysteem laat toe beslissingsondersteunende applicaties te ontwikkelen die gebaseerd zijn op wiskundige optimalisatie. Aangezien het E-VRPTW verschillende knooppunten hanteert voor vertrekken en aankomen aan het depot, werd ook in de software gebruik gemaakt van twee verschillende knooppunten, namelijk *Start* en *Finish*. Ook de mogelijkheid om de batterij tijdens de rit op te laden bij het depot moest toegevoegd worden. Hiervoor werd Laadstation 5 ( $F_5$ ) gecreëerd. De afstanden en reistijden voor  $F_5$ , *Start* en *Finish* blijven vanzelfsprekend identiek aan die van het depot zoals weergegeven in Tabel 33 en Tabel 34 in bijlage 1.

Een vaststelling die bij het testen van het model gemaakt wordt, is dat bijvoorbeeld de halte aan laadstation 2.10 – dummy 10 van laadstation 2 – gevolgd werd door een halte aan laadstation 2.1 of dat van het depot meteen naar het laadstation van het depot “gereden” werd. Dit is mogelijk aangezien er geen afstand is tussen beide punten – want beide punten stellen hetzelfde laadstation/depot voor – en de doelfunctie streeft naar de minimalisatie van de totale afgelegde afstand. Om deze onrealistische tussenstops te vermijden, werd gekozen om te werken met een ‘als-dan’ stelling. Voor de berekening van de afstand tussen twee knooppunten wordt gebruikt gemaakt van de formule voor de euclidische afstand. Wanneer deze verschillend is van nul wordt de verkregen afstand gebruikt, maar indien echter de formule gelijk is aan nul wordt een zeer grote afstand ingevoegd – 99 999 km – zodat het programma deze onrealistische tussenstops niet in overweging zal nemen. In AIMMS werd dit als volgt geformuleerd bij de definitie van de variabele ‘afstand’.

```

If sqrt  $\left[ (X_{\text{coördinaat}}(j) - X_{\text{coördinaat}}(i))^2 + (Y_{\text{coördinaat}}(j) - Y_{\text{coördinaat}}(i))^2 \right] = 0$  Then
99999
Else sqrt  $\left[ (X_{\text{coördinaat}}(j) - X_{\text{coördinaat}}(i))^2 + (Y_{\text{coördinaat}}(j) - Y_{\text{coördinaat}}(i))^2 \right]$ 
End if

```

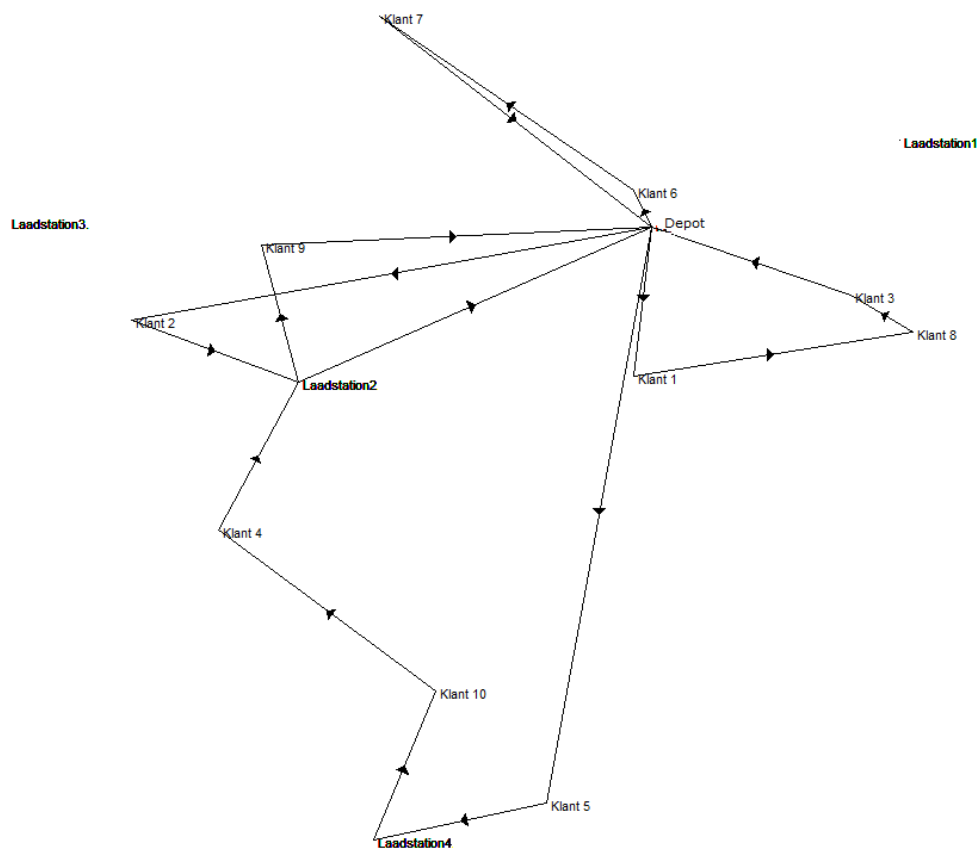
Elke rit begint bij het depot en uiteindelijk dienen alle tien klanten bezocht te worden vooraleer terug te keren naar het depot. Het probleem werd opgelost gebruikmakend van de solver CPLEX 12.5.1. Voor replicatie 1 geeft de best gevonden oplossing na twee uur rekentijd en 23 132 809 iteraties vier ritten met een totale afstand van 709,50 kilometer. Het betreft volgende routes met een overzicht in Tabel 9.

Rit 1 gaat slechts naar een klant, namelijk klant 2. Dit is te verklaren door het feit dat klant 2 de grootste vraag heeft van alle klanten en onvoldoende resterende vrachtcapaciteit heeft om nog andere klanten te bezoeken. De afstand van rit 1 bedraagt 176,36 kilometer waarbij eerst nog een tussenstop wordt gemaakt bij een laadstation. De tweede rit bezoekt drie klanten en is 115,23 kilometer lang. Rit 3 is de langste van de vier ritten en legt een afstand van 305,94 kilometer af. Hierbij worden vier klanten bezocht en eveneens twee keer een tussenstop gemaakt bij een laadstation. De resterende twee klanten worden in de vierde en laatste rit bediend waarbij 111,97 kilometer wordt afgelegd.

Scenario 1 - Replicatie 1: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Laadstation 2.4 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot	115,23
3	Depot → Klant 5 → Laadstation 4.1 → Klant 10 → Klant 4 → Laadstation 2.9 → Klant 9 → Depot	305,94
4	Depot → Klant 6 → Klant 7 → Depot	111,97
<b>Totaal</b>		<b>709,50</b>

Tabel 9: Resultaten replicatie 1 scenario 1

De vier ritten zijn weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Ritten replicatie 1 scenario 1

In dit scenario werd tot nog toe een gemiddelde rijsnelheid van 65 km/u verondersteld. Deze gemiddelde snelheid bepaalt de reistijden tussen de verschillende knooppunten binnen het gebied. Wanneer deze snelheid verhoogd of verlaagd wordt, zullen logischerwijze dan ook de reistijden respectievelijk afnemen of toenemen. Vanwege de gedefinieerde tijdvensters is dan mogelijk ook een invloed op de vorming van de verschillende ritten. Om dit te onderzoeken zullen daarom nog twee snelheden onderzocht worden, namelijk 80 km/u en 50 km/u. 80 km/u is de topsnelheid die de Smith Newton kan bereiken zoals aangegeven in sectie 3.3. Eenzelfde wijziging naar beneden toe geeft 50 km/u. In Tabel 10 worden de oplossingen met de drie verschillende snelheden met elkaar vergeleken. In deze tabel worden eveneens tien replicaties weergegeven, waarbij elke replicatie andere willekeurige getallen heeft voor kolom twee tot en met vier in Tabel 7, namelijk de coördinaten, de tijdvensters en de individuele vraag. Dit is nodig om geldige conclusies te kunnen maken, want dit is niet mogelijk op basis van één casus. Hierdoor zullen de gemaakte besluiten onafhankelijk zijn van één specifieke casus. In Tabel 10 duidt  $m$  op het aantal gebruikte voertuigen,  $s$  op het aantal tussenstops bij een laadstation en  $L_{Best}$  wijst op ofwel de optimale oplossing ofwel de best gevonden oplossing na 7200 seconden (twee uur). Bij het testen van het model is gebleken dat de rekentijd kan oplopen tot meer dan achtenveertig uur. Gezien de vele replicaties bij verschillende gemiddelde snelheden werd voor een tijdslimiet van twee uur gekozen. Indien  $L_{Best}$  de optimale oplossing geeft, zal deze aangeduid worden met een asterisk (\*).

Vergelijking resultaten scenario 1									
Replicaties	50 km/u			65 km/u			80 km/u		
	$m$	$s$	$L_{Best}$	$m$	$s$	$L_{Best}$	$m$	$s$	$L_{Best}$
1	4	3	709,50	4	3	709,50	4	3	703,55*
2	4	5	804,19*	4	5	787,25*	4	5	787,25*
3	4	3	784,74	4	3	712,32	4	4	690,49
4	4	3	762,97	4	3	762,97	4	3	757,79
5	5	5	772,54	4	5	750,63	4	4	745
6	4	3	630,15*	4	3	630,15*	4	3	630,15*
7	4	4	736,74	4	4	736,74	4	4	736,74
8	4	4	829,96*	4	3	767,70*	4	4	746,90*
9	4	2	687,71	4	3	670,30	4	2	673,39
10	4	2	493,53	4	2	493,53*	4	2	493,53
<b>Gemiddelde</b>	<b>4,1</b>	<b>3,4</b>	<b>721,20</b>	<b>4</b>	<b>3,4</b>	<b>702,11</b>	<b>4</b>	<b>3,4</b>	<b>696,48</b>

Tabel 10: Overzichtstabel resultaten scenario 1

Op basis van de tien uitgevoerd replicaties bij een gemiddelde snelheid van 65 km/u kan een gemiddelde totale ritafstand van 702,11 kilometer afgeleid worden. Zeven van de tien replicaties hebben een afstand die tussen de 700 en 800 km ligt. Een uitschieter zit onder de 500 km. In alle tien gevallen volstaan vier voertuigen om de vraag van de klanten te bedienen. Wat betreft het aantal tussenstops aan laadstations kan uit de resultaten afgeleid worden dat dit gemiddeld tussen drie en vier haltes ligt. Alle gegevens van de verschillende replicaties zijn terug te vinden in Bijlage 2.

Het effect van de verschillende gemiddelde snelheden komt in dit scenario enkel tot uiting in de reistijden. Bij een gemiddelde snelheid van 50 km/u zullen de reistijden langer zijn, terwijl deze bij 80 km/u korter zullen zijn. Uit de resultaten van de verschillende replicaties blijkt dat deze langere of kortere reistijden gevolgen hebben voor de vorming van ritten. Bij 50 km/u zullen de tijdvensters voor bepaalde klanten niet meer gehaald worden in tegenstelling tot bij hogere gemiddelde snelheden. De resultaten voor 50 km/u geven bijgevolg ook een langere gemiddelde afstand aan van 721,20 km of 2,72 procent meer dan bij 65 km/u. Ook het gemiddeld aantal gebruikte voertuigen stijgt lichtjes als gevolg van de vorming van een vijfde rit bij replicatie vijf. Een opvallende vaststelling is dat voor het eerst gebruikt gemaakt wordt van het laadstation op het depot, namelijk dummy 8 van laadstation 5 in rit 4 van replicatie 3. De langere reistijden maken het dus voor het eerst opportuun om bij dit laadstation een tussenstop te maken. Voor een gemiddelde snelheid van 80 km/u kan een tegenovergesteld resultaat waargenomen worden, namelijk een kortere gemiddelde afstand van 696,48 km ofwel een vermindering van 0,80 procent ten opzichte van het resultaat bij 65 km/u. Voor alle snelheden blijft het gemiddeld aantal tussenstops bij een laadstation wel identiek.

Om na te gaan of de waargenomen verschillen tussen de snelheden significant zijn, wordt een gepaarde t-test uitgevoerd. Hiervoor wordt voor elke replicatie het verschil berekend tussen de twee alternatieven, in dit geval 65 km/u en 50/80 km/u. Op deze manier worden twee steekproeven samengebracht tot een enkele steekproef. Het voordeel is dat de twee steekproeven niet onafhankelijk moeten zijn van elkaar voor statistische validiteit. Dit laat het gebruik van gemeenschappelijke willekeurige getallen toe (Kelton, Sadowski & Swets, 2010). In deze test wordt een 95% betrouwbaarheidsinterval berekend aan de hand van volgende formules, waarbij  $X_{1j}$  staat voor replicatie  $j$  bij een gemiddelde snelheid van 65 km/u.  $X_{2j}$  staat voor replicatie  $j$  bij een gemiddelde snelheid van 50 of 80 km/u. Voor deze t-test dient het aantal replicaties dat vergeleken wordt gelijk te zijn.

$$Z_j = X_{1j} - X_{2j}$$

$$\bar{Z}(n) = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n}$$

$$S^2(n) = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z}(n))^2}{n - 1}$$

$$BI = \bar{Z}(n) \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}}$$

$$t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} = t_{9, 1-\frac{0,05}{2}} = t_{9, 0,975} = 2,262$$

In de gepaarde t-test zullen volgende hypothesen getest worden.

$H_1$ : Er is een verschil tussen de gemiddelde afstand bij 65 km/u en de gemiddelde afstand bij 50 km/u

$H_2$ : Er is een verschil tussen de gemiddelde afstand bij 65 km/u en de gemiddelde afstand bij 80 km/u

In Tabel 11 worden de betrouwbaarheidsintervallen weergegeven.



Hypothesetesten scenario 1					
Hypothese	$\bar{Z}_{(n)}$	$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})$	95% Betrouwbaarheidsinterval		Hypothese aanvaarden?
			Ondergrens	Bovengrens	
$H_1$	-19,09	727,25	-38,3841	0,1961	Neen
$H_2$	5,63	77,30	-0,6590	11,9190	Neen

Tabel 11: Hypothesetesten scenario 1

Indien nul in het betrouwbaarheidsinterval ligt, zou dit betekenen dat er geen significant verschil is tussen de twee modellen. Uit Tabel 11 kan geconcludeerd worden dat voor zowel hypothese 1 als hypothese 2 nul in het betrouwbaarheidsinterval ligt. Dit betekent dat de verschillen tussen 65 km/u en 50 km/u enerzijds, en 65 km/u en 80 km/u anderzijds niet significant zijn. Voor scenario 1 kunnen dus geen conclusies getrokken worden met betrekking tot verschillen tussen de snelheden.

### 3.5 Scenario 2: Verschillende types van laadstations

In sectie 1.5.1 werd reeds aangehaald dat BEV's de afhankelijkheid van olie kunnen verminderen evenals de uitstoot van broeikasgassen, zeker wanneer ook de productie van deze elektriciteit op een milieuvriendelijke manier gebeurt. Desalniettemin blijft de angst bestaan dat dergelijke voertuigen onvoldoende bereik hebben om een bestemming te bereiken en dit vormt een belangrijk obstakel voor aanvaarding van BEV's door de markt. Een manier om deze vrees te overwinnen is het ontplooiën van een publieke laadinfrastructuur. Voor alle alternatieve brandstoffen ten opzichte van benzine of diesel geldt dat de initiële kost van het bouwen van dergelijke tank- of laadinfrastructuur hoog zal zijn en zal afnemen naarmate het aantal voertuigen gebruikmakend van de alternatieve brandstof toeneemt. Zo stelt Shell Oil Company dat een ontwikkelde tankinfrastructuur voor waterstof in de Verenigde Staten waarbij honderd miljoen waterstofvoertuigen bediend worden, mogelijk honderden miljarden dollars kan kosten. Dit komt neer op duizenden dollars per bediend voertuig. Het National Research Council (2013) schat voor BEV's een drieduizend dollar investeringskost per voertuig, inclusief de kosten voor het installeren van residentiële, werk- en publieke laadpunten. Hoewel deze kosten enorm schijnen, zijn deze in werkelijkheid van dezelfde grootteorde als het geld besteed aan de bouw en het onderhoud van de tankinfrastructuur voor conventionele transportbrandstoffen (Ogden, 2005).

Het herladen van een batterij van een elektrisch voertuig duurt in vergelijking met andere brandstoffen heel wat langer, gaande van dertig minuten tot verschillende uren. Dit is afhankelijk van het laadvermogen, de grootte van de batterij en het laadniveau. Dus is het wenselijk om een BEV op te laden op de bestemming waar een activiteit plaatsvindt zodat het voertuig een aanzienlijke tijd geparkeerd blijft staan.

In de National Electric Code (NFPA, 2011) werden drie laadniveaus gedefinieerd voor het opladen van elektrische voertuigen. Een level 1 lader maakt gebruik van een standaard 120 volt, 15 of 20 ampère stroomcircuit en is een standaard stopcontact zoals teruggevonden kan worden in residentiële en commerciële gebouwen. Het is geschikt om thuis gedurende de nacht op te laden of mogelijk ook op het werk. Dit systeem heeft acht tot dertig uur nodig om de batterij op te laden (Yang, Yao, Kang & Zhu, 2014). Een level 2 lader beschikt over een 240 volt, eenfasig, 30 ampère stroomcircuit en wordt beschouwd als de preferentiële methode voor het opladen van BEV's. Dergelijke systemen zijn gewoonlijk niet terug te vinden in private of publieke gebouwen en dus is mogelijk een systeemupgrade nodig. De oplaadtijd varieert van vier tot acht uur (Yang et al., 2014). Tot slot bestaan level 3 laders, ook wel verwezen als snelladers, die gebruik maken van een hoog voltage. Hierbij wordt gelijkstroom – geen wisselstroom – geleverd aan het batterijpakket van het voertuig waardoor een BEV opgeladen kan worden aan een veel hoger tempo. Bijvoorbeeld, met een level 3 lader kan de batterij van een Nissan Leaf tot 80 procent capaciteit opgeladen worden in dertig minuten. Het nadeel van dit type lader is dat de kosten enorm hoog zijn, aangezien de installatie aanpassingen vereist aan de elektriciteitsinfrastructuur zoals het hoogspanningsnet, nieuwe distributielijnen, enzovoort (Dong, Liu & Lin, 2014). Dergelijke installatie zal dan ook waarschijnlijk niet teruggevonden worden in standaard residentiële omgevingen (Xi, Sioshansi & Marano, 2013).

In Tabel 12 (Dong, Liu & Lin, 2014) wordt een overzicht gegeven van de verschillende types van laders waarbij ook de kosten in dollars weergegeven worden. Het gaat hier om de uitrusting- en installatiekosten van de verschillende types van laders.

	Level 1	Level 2	Level 3
<b>Stroomcircuit</b>	120V, 15A	240V, 30A	500V, 200A
<b>Vermogen (kiloWatt)</b>	1,44	6	90
<b>Kosten (US dollars)</b>	700	5000	50 000

Tabel 12: Overzicht verschillende types van laders

Naast deze drie laadlevels worden in de literatuur ook zogenaamde 'battery swap stations (BSS)' besproken. 'Battery swapping' biedt de mogelijkheid om lege batterijen te vervangen door volgeladen batterijen (Brown, Pyke & Steenhof, 2010). De 'laadtijd' bij dit type ligt heel wat lager dan de eerder besproken laadniveaus, namelijk rond de drie minuten (Liu, 2012).

Voor integratie in het E-VRPTW lijkt het niet opportuun om level 1 laders te gebruiken gezien de erg lange herlaadtijden. Bovendien is dit systeem meer geschikt voor personenvoertuigen die thuis 's nachts opgeladen kunnen worden of tijdens de werkuren, maar voor elektrische trucks zoals de Smith Newton is dit niet wenselijk, zeker ook vanwege de tijdvensters in het rittenplanningsmodel van Schneider et al. (2012).

Om de verdeling van de verschillende types van laadstations te bepalen, wordt gekeken naar de beschikbaarheid van deze stations in België. De website [www.openchargemap.org](http://www.openchargemap.org) biedt wereldwijd een overzicht van de beschikbare laadstations. Volgens de gegevens van deze website beschikt België over eenendertig level 3 snellaadstations en tweeëntachtig level 2 laders. Ongeveer de helft van de snellaadstations, vijftien namelijk, bevinden zich in de omgeving van hoofdstad Brussel. Nog eens zeven zijn terug te vinden in Antwerpen en omgeving, en ook in West-Vlaanderen bevinden zich nog zes stations. Ten oosten van Brussel in de provincie Limburg zijn helemaal geen snellaadstations aanwezig en ook in het zuiden van België onder Luik en Namen ontbreken dergelijke systemen. De level 2 laders zijn iets meer verdeeld over het land met vijftien punten in Brussel en vijftien in Antwerpen. Het overgrote merendeel van dit type bevindt zich overigens in Vlaanderen. Slechts elf van de tweeëntachtig level 2 laders bevinden zich in Wallonië. Dezelfde vaststelling kan gemaakt worden voor de level 3 laders. Hiervan zijn er vier punten van de eenendertig gelegen in Wallonië. De website heeft geen kennis van BSS in België en ook een verdere zoektocht op het internet heeft geen resultaten opgeleverd. Ook wereldwijd zijn deze stations zeer zeldzaam terug te vinden. Tesla Motors Inc heeft in de zomer van 2013 aangekondigd om een eerste BSS te vestigen in de VS, meer bepaald in de staat California (Groom, 2013). Gezien de schaarsheid van dergelijke stations en de beperkte grootte van de onderzochte case – tien klanten en vijf laadstations – zullen ook de BSS buiten beschouwing gelaten worden. De keuze wordt dus gemaakt om verder te werken met twee types van laadstations. De snellaadstations die in het eerste scenario reeds gebruikt werden. Daarnaast worden ook level 2 laders in beschouwing genomen, met een laadtijd van vier uur. Mathematisch worden de twee herlaadtempo's gegeven door  $g_{Snel} = 45,05$  en  $g_{Traag} = 240$ .

### 3.5.1 Scenario 2.1: Snellaadstation bij depot

Voor de vijf laadstations in de case werd gekeken hoe de verschillende types zich verhouden binnen België. Zo zijn er 27,43 procent level 3 snellaadstation en 72,57 procent level 2 laders. Wanneer afgerond wordt naar een geheel getal wordt volgende verdeling bekomen: één snellaadstation en vier level 2 laders. De keuze wordt gemaakt om dit ene snellaadstation bij het depot te plaatsen, wat aannemelijk is voor een bedrijf dat beschikt over een wagenpark van elektrische voertuigen die mogelijk meerdere ritten per dag zullen moeten afleggen en waarbij het wenselijk is om tussen twee ritten zo weinig mogelijk tijd te verliezen.

Door het in beschouwing nemen van verschillende types van laadstation komt de focus in het E-VRPTW meer te liggen op tijd en niet meer zozeer op afstand. Het probleem richt zich nu op het vinden van een route waarbij de mogelijkheid opgenomen wordt van een tussenstop aan een bepaald type laadstation en dit zodanig zodat de totale tijdsduur geminimaliseerd wordt. Dit zou betekenen dat aanzienlijke aanpassingen aan het E-VRPTW model gemaakt dienen te worden, maar dit ligt echter buiten het werkveld van deze thesis. Bovendien zou dan een non-lineaire doelfunctie bekomen worden waardoor niet langer gesproken kan worden van een gemengd geheeltallig lineair probleem. Vandaar dat verkozen wordt om verder te werken met een doelfunctie waarbij de afstand geminimaliseerd wordt. De invloed van de verschillende types laadstations zal dan naar voren komen via de gehanteerde tijdvensters. Door de lange herlaadtijdijden van installaties die traag opladen is het mogelijk dat bepaalde routes aangepast dienen te worden om tegemoet te komen aan de vereiste tijdvensters bij de verschillende klanten. Het is hierbij belangrijk dat de tijdvensters niet te breed gedefinieerd zijn zodat de laadstations ook effectief een rol spelen. Voor de klanten geldt er een gemiddeld tijdvenster van twee uur en ongeveer drieënvijftig minuten. Aangezien opladen bij een traaglaadstation vier uur in beslag kan nemen, wordt de conclusie gemaakt dat de toegepaste tijdvensters niet te breed zijn.

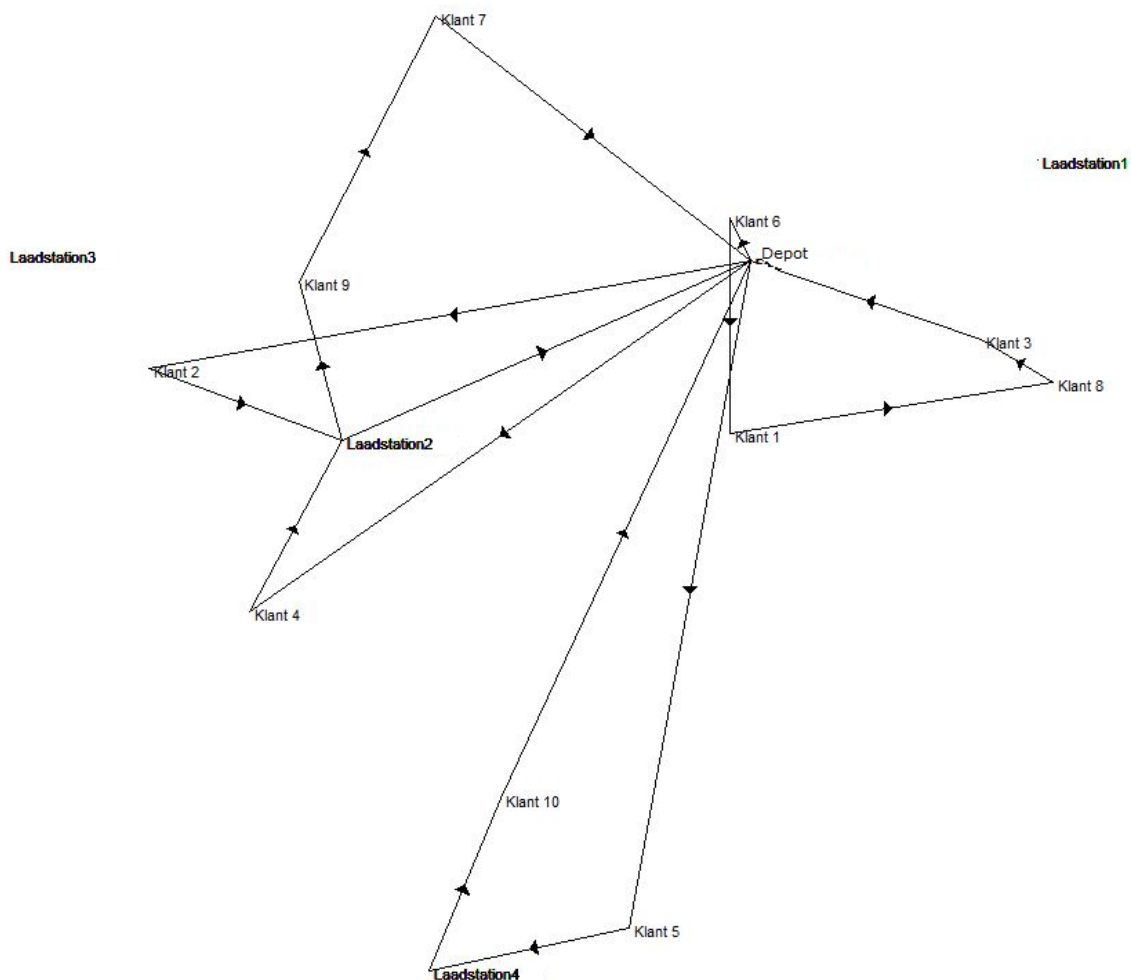
Voor de beperkingen verandert er weinig. Beperking (6) uit sectie 2.1.3 wordt gedupliceerd, namelijk een voor de snellaadstations en een voor de installaties die traag opladen.

$$\begin{aligned} \tau_i + t_{ij}x_{ij} + g_{Snel}(Q - y_i) - (l_0 + g_{Snel}Q)(1 - x_{ij}) &\leq \tau_j \quad \forall i \in F'_{Snel}, \forall j \in V_{n+1}, i \neq j \\ \tau_i + t_{ij}x_{ij} + g_{Traag}(Q - y_i) - (l_0 + g_{Traag}Q)(1 - x_{ij}) &\leq \tau_j \quad \forall i \in F'_{Traag}, \forall j \in V_{n+1}, i \neq j \end{aligned}$$

Het best mogelijke resultaat voor scenario 2.1 en het in sectie 3.5.2 volgende scenario 2.2 is een evenaring van de verkregen afstand onder scenario 1. Voor replicatie 1 wordt een oplossing gevonden van vier ritten met een totale cumulatieve afstand van 768,79 kilometer. Alle individuele ritten zijn terug te vinden in Tabel 13 en weergegeven in Figuur 5. Het aantal gebruikte voertuigen blijft dus identiek aan het scenario met enkel snellaadstations, maar de totale afgelegde afstand neemt wel toe met 59,29 kilometer, een stijging van 8,36 procent.

Scenario 2.1: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Laadstation 2.3 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 6 → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot	127,75
3	Depot → Klant 4 → Laadstation 2.1 → Klant 9 → Klant 7 → Depot	232,74
4	Depot → Klant 5 → Laadstation 4.2 → Klant 10 → Depot	231,94
<b>Totaal</b>		<b>768,79</b>

Tabel 13: Resultaten replicatie 1 scenario 2.1



Figuur 5: Ritten replicatie 1 scenario 2.1

Rit 1 blijft identiek aan die van het eerste scenario. Gezien de hoge vraag van klant 2 zal de samenstelling van deze rit niet snel veranderen. De tweede rit wijzigt enkel door het opnemen van een bijkomende klant – klant 6 – en is slechts 12,52 km langer dan in scenario 1. De twee laatste ritten wijzigen wel aanzienlijk. Zo is rit drie 73,20 km korter en rit vier 119,97 km langer. De lange herlaadtijden in combinatie met de tijdvensters verhinderen dus de vorming van 'zeer lange' ritten zoals rit 3 in het eerste scenario en zullen de haltes meer verdeeld worden over de verschillende ritten.

Vergelijking resultaten scenario 2.1									
Replicaties	50 km/u			65 km/u			80 km/u		
	m	s	$L_{Best}$	m	s	$L_{Best}$	m	s	$L_{Best}$
1	5	5	976,96	4	3	768,79	4	3	764,21
2	4	5	839,50*	4	5	787,25*	4	5	787,25
3	5	3	791,31	5	3	791,31	5	4	806,09
4	5	4	843,55	4	5	786,05	4	5	786,05
5	Geen oplossing gevonden			4	3	755,84*	4	3	755,84
6	4	2	643,44*	4	2	643,44*	4	2	643,44*
7	5	6	792,07	4	4	742,55	4	4	737,07
8	Geen oplossing gevonden			5	4	969,68	4	4	829,96
9	Geen oplossing gevonden			4	3	743,17*	4	3	735,62
10	4	3	529,71	4	3	512,98*	4	3	512,98
<b>Gemiddelde</b>	<b>4,6</b>	<b>4</b>	<b>773,79</b>	<b>4,2</b>	<b>3,5</b>	<b>750,11</b>	<b>4,1</b>	<b>3,6</b>	<b>735,85</b>

Tabel 14: Overzicht resultaten scenario 2.1

Bij eerdere testen van het model is gebleken dat voor een aantal replicaties in scenario 2.1 een 'infeasible' oplossing verkregen werd, meer bepaald voor replicaties 2, 3, 4, 7 en 9. Dit is het gevolg van de langere herlaadtijden van de traaglaadstations en de gehanteerde tijdvensters. In eerste instantie werd getracht deze 'infeasible' oplossingen weg te werken door andere willekeurige getallen voor de tijdvensters te gebruiken, maar na vele tests werd nog geen geldige oplossing gevonden. Een mogelijk alternatief is het herdefiniëren van de tijdvensters zodat deze voor alle klanten altijd zeer ruim zijn, maar hierdoor worden de tijdvensterbeperkingen wel minder bepalend voor de vorming van ritten. In het begin van deze sectie werd bovendien gesteld dat omwille van het behouden van een afstandsminimaliserende doelfunctie, de tijdvensters niet te breed mogen zijn. Om deze reden werd gekozen om de bestaande tijdvensterdefiniëring te behouden en verder te werken met andere willekeurige getallen voor de x en y coördinaten van alle punten in het actieve gebied. Hierdoor worden wel geldige oplossingen verkregen met een beperkt aantal tests. Scenario 1 werd vervolgens ook opnieuw uitgevoerd met de nieuwe willekeurige getallen voor de respectievelijke replicaties. Het gevolg hiervan is dat de gemiddelde afstand in scenario 1 korter is, aangezien de verschillende punten nu dichterbij elkaar liggen. Bij te grote afstanden tussen de verschillende punten wordt de oplossing 'infeasible'. Tabel 14 geeft een overzicht van de verschillende replicaties. In Bijlage 3 worden de ritten van de verschillende replicaties weergegeven.

Voor scenario 2.1 leiden de tien replicaties tot een gemiddelde afstand van 750,11 km. Dit is 48 km meer dan in scenario 1 of een stijging van 6,84 procent. In twee gevallen – replicaties 3 en 8 – wordt het maximum toelaatbaar aantal voertuigen gebruikt en dit bij een afstand van respectievelijk 791,31 km en 969,68 km. Deze vormen de twee langste ritten. Het is mogelijk dat deze afstand lager wordt indien meer dan vijf voertuigen toegelaten worden. Gemiddeld worden tussen de drie en vier tussenstops gemaakt bij een laadstation. Opvallend is dat in geen van de

tien cases gebruikt gemaakt wordt van het snellaadstation op het depot. Dit kan enerzijds verklaard worden door de karakteristieken – coördinaten, resterende batterij, reistijden, ... – van de verschillende replicaties, maar een andere verklaring ligt in het feit dat in dit model de afstand geminimaliseerd wordt en niet de totale tijdsduur. Vanuit afstandsoptisch is het voor de tien replicaties dus niet opportuun om terug te keren naar het depot en daar op te laden, maar wordt een traaglaadstation verkozen dat meer nabij gelegen is. Wanneer de totale tijdsduur geminimaliseerd zou worden, zal mogelijk wel van het snellaadstation op het depot gebruik gemaakt worden.

Wanneer dezelfde replicaties bij een lagere gemiddelde snelheid uitgevoerd worden, blijkt dat in drie gevallen geen oplossing gevonden kan worden binnen de vooropgestelde tijdsduur van twee uur. Een verklaring hiervoor ligt in de langere reistijden in combinatie met de langere oplaadtijden bij traaglaadstations. Hierdoor kunnen de vooropgestelde tijdsvensters niet langer gehaald worden. Een andere verklaring kan de beperking van het aantal te gebruiken voertuigen zijn. Indien dit aantal hoger zou liggen dan vijf trucks, wordt mogelijk wel een oplossing gevonden. Het is natuurlijk niet de bedoeling om de tien klanten met tien trucks te bedienen, maar mogelijk zijn wel oplossingen te vinden met zes of zeven vrachtwagens.

Op basis van de overige zeven geldige oplossingen kan geconcludeerd worden dat bij een lagere gemiddelde snelheid de gemiddelde totale afstand hoger is. In dit geval een stijging van 3,16 procent ten opzichte van het gevonden resultaat bij 65 km/u. Daarnaast liggen ook het gemiddeld aantal gebruikte voertuigen en het aantal tussenstops bij een laadstation hoger. Bij 50 km/u wordt vaker het maximum van vijf voertuigen ingezet om alle klanten te bedienen.

Bij een hogere gemiddelde snelheid, zoals hier bij 80 km/u, kunnen tegengestelde conclusies gemaakt worden. De gemiddelde afgelegde afstand ligt lager, namelijk 735,85 km of een daling van 1,90 procent. Ook zijn alle replicaties in staat de vraag te bedienen met maximaal vier voertuigen. Het aantal tussenstops bij een laadstation blijft ongeveer gelijk. Voor replicatie 3 werd in eerste instantie geen oplossing gevonden binnen de twee uren. Dit is enigszins verrassend gezien bij de twee lagere snelheden – en dus langere reistijden – wel een geldige oplossing gevonden kan worden. Dit was het gevolg van het vroegtijdig – voor de vooropgestelde twee uren – afbreken van de zoektocht naar een oplossing vanwege een geheugentekort. Dit werd verholpen door bij de instellingen van CPLEX 12.5.1 te kiezen voor een zoektocht waarbij minder geheugen gebruikt werd. Dit heeft mogelijk wel gevolgen voor de prestaties van het programma. Met deze nieuwe instelling kon uiteindelijk wel een geldige oplossing gevonden worden.

Ook hier zal nagegaan worden of de verschillen tussen de gemiddelde snelheden significant zijn. Dit zal enkel mogelijk zijn voor het verschil tussen 65 km/u en 80 km/u, aangezien bij 50 km/u niet voor alle replicaties een oplossing gevonden werd. De voorwaarde bij een gepaarde t-test is dat het aantal replicaties identiek is, dus zal enkel volgende hypothese getest worden.

*H<sub>3</sub>: Er is een verschil tussen de gemiddelde afstand bij 65 km/u en de gemiddelde afstand bij 80 km/u*

<b>Hypothesetest scenario 2.1</b>					
<b>Hypothese</b>	$\bar{Z}_{(n)}$	$\widehat{var}(\bar{Z}_{(n)})$	<b>95% Betrouwbaarheidsinterval</b>		<b>Hypothese aanvaarden?</b>
			<b>Ondergrens</b>	<b>Bovengrens</b>	
$H_3$	14,26	1979,57	-17,5707	46,0807	Neen

Tabel 15: Hypothesetest scenario 2.1

Uit Tabel 15 kan afgeleid worden dat hypothese 3 verworpen wordt, namelijk dat er geen significant verschil is tussen het gevonden resultaat voor 65 km/u en het resultaat voor 80 km/u.



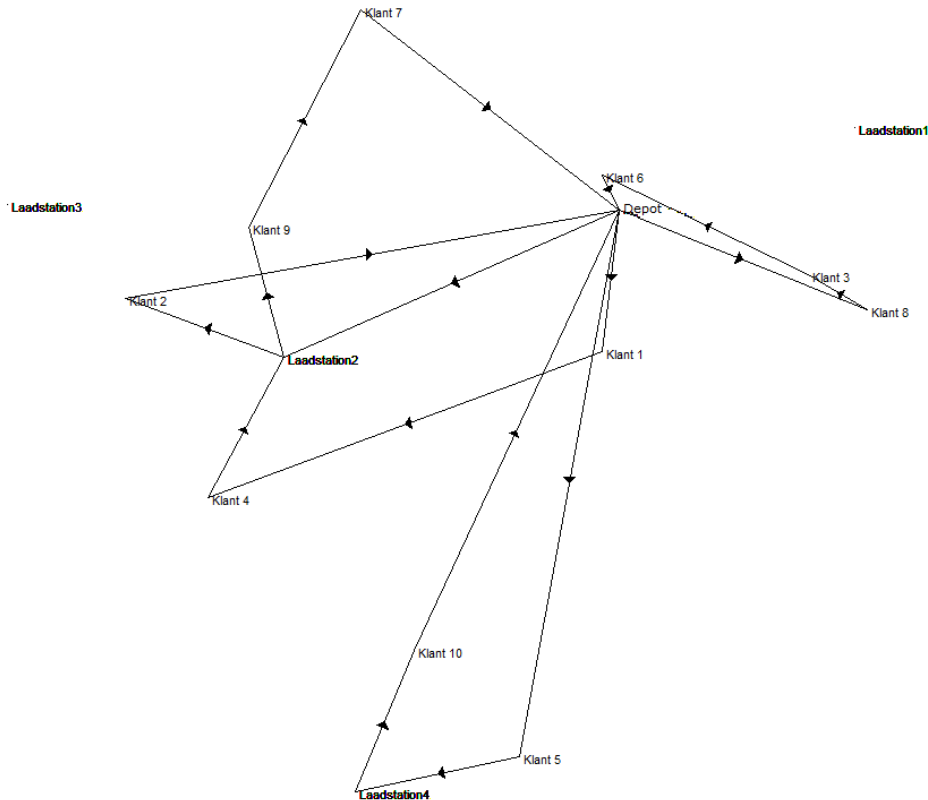
### 3.5.2 Scenario 2.2: Snellaadstation bij centraal gelegen publiek laadstation

De veronderstelling werd gemaakt dat het snellaadstation gelegen was bij het depot, maar uit de oplossing blijkt dat van dit snellaadstation geen gebruik gemaakt wordt. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de karakteristieken – coördinaten, resterende batterij, reistijden, ... – van deze casus en wanneer andere willekeurige cijfers gebruikt worden, zal mogelijk wel van dit snellaadstation gebruik gemaakt worden. Daarenboven wordt de totale afstand geminimaliseerd en niet de totale tijd. Niettemin is het toch interessant om na te gaan hoe de oplossing zou verschillen wanneer de locatie van deze level 3 lader verschilt van die van het depot. Gezien de hoge investeringskost van dergelijke laadstations, is het wenselijk om deze zo centraal mogelijk te plaatsen voor een optimale bereikbaarheid en dus ook dekking van voertuigstromen. Van de vier laadstations buiten het depot is laadstation 2 het meest centraal gelegen – voor replicatie 1 – en daarom wordt geopteerd om het snellaadstation hier te plaatsen en na te gaan hoe de oplossing wijzigt.

Na 8 594 416 iteraties wordt de optimale oplossing gevonden bestaande uit vier ritten en een cumulatieve afstand van 753,89 kilometer. De afzonderlijke ritten zijn weergegeven in Tabel 16 en in Figuur 6. Indien scenario 2.1 en scenario 2.2 met elkaar vergeleken worden, kan geconcludeerd worden dat slechts een zaak wijzigt, namelijk de rit tot waartoe klant 1 behoort. In scenario 2.1 maakte klant 1 nog deel uit van rit 2, maar in dit scenario behoort klant 1 tot rit 3. Deze wijziging leidt ertoe dat de totale afstand met 14,90 km afneemt oftewel daalt met 1,94 procent. Ten opzichte van scenario 1 bedraagt de stijging nu nog maar 44,39 km oftewel 6,26 procent. De verandering van de locatie van het snellaadstation naar een centraal publiek laadpunt zorgt dus voor een verbetering van de minimale afstand.

<b>Scenario 2.2: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 2.3 → Klant 2 → Depot</i>	176,36
2	<i>Depot → Klant 8 → Klant 3 → Klant 6 → Depot</i>	102,59
3	<i>Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 2.8 → Klant 9 → Klant 7 → Depot</i>	242,99
4	<i>Depot → Klant 5 → Laadstation 4.6 → Klant 10 → Depot</i>	231,94
<b>Totaal</b>		<b>753,89*</b>

Tabel 16: Resultaten replicatie 1 scenario 2.2



Figuur 6: Ritten replicatie 1 scenario 2.2

Vergelijking resultaten scenario 2.2									
Replicaties	50 km/u			65 km/u			80 km/u		
	m	s	$L_{Best}$	m	s	$L_{Best}$	m	s	$L_{Best}$
1	4	3	767,55	4	3	753,89*	4	3	723,17*
2	4	5	823,13*	4	5	787,25*	4	5	787,25
3	Geen oplossing gevonden			5	2	784,74	5	2	792,49
4	4	5	787,61	4	4	767,52	4	4	767,52
5	5	5	779,42	4	4	751,67	4	4	751,67
6	4	3	630,15*	4	3	630,15*	4	3	630,15*
7	4	4	736,74	4	4	736,74	4	4	736,74
8	5	4	969,68	4	4	872,85	4	4	829,96
9	4	2	687,61	4	2	687,71	4	2	685,55
10	4	3	514,46	4	3	497,39	4	3	497,39
<b>Gemiddelde</b>	<b>4,2</b>	<b>3,4</b>	<b>744,04</b>	<b>4,1</b>	<b>3,4</b>	<b>726,99</b>	<b>4,1</b>	<b>3,4</b>	<b>720,19</b>

Tabel 17: Overzicht resultaten scenario 2.2

De tien replicaties bij een gemiddelde snelheid van 65 km/u – weergegeven in Tabel 17 en Bijlage 4 – leiden tot een gemiddelde ritafstand van 726,99 kilometer. Dit is een verbetering van 23,12 km of 3,08 procent ten opzichte van scenario 2.1. De grootste wijziging is voor replicatie 8. De afstand daalt daar met 96,83 km of een vermindering van de afstand van 9,99 procent. Deze daling is te verklaren door het feit dat replicatie 8 in dit scenario alle ritten kan voltooien met een

voertuig minder dan in scenario 2.1, namelijk vier trucks in plaats van vijf. Het gemiddeld aantal ritten blijft op vier liggen. Ook het gemiddeld aantal tussenstops bij een laadstation blijft tussen drie en vier liggen. Replicaties 3, 4 en 9 kunnen de ritten nu voltooien met een tussenstop minder. Replicaties 5 en 6 daarentegen kunnen een bijkomende tussenstop maken met bovendien een lagere totaalafstand dan in scenario 2.1.

Wanneer scenario 2.2 met scenario 1 vergeleken wordt, blijkt dat het verschil aanzienlijk kleiner is – in tegenstelling tot de vergelijking tussen scenario 2.1 en scenario 1. De gemiddelde afstand is hier slechts 24,88 km langer dan in scenario 1, een stijging van 3,54 procent. Scenario 2.2 ligt dus veel dichterbij de best haalbare oplossing gegeven verschillende types laadstation dan in scenario 2.1 het geval is. Eenzelfde conclusie kan gemaakt worden bij de twee andere onderzochte snelheden. Zo is het verschil met 65 km/u kleiner dan in scenario 2.1, namelijk een stijging van 2,35 procent bij 50 km/u en een daling van 0,94 procent bij 80 km/u. De verschillen liggen veel dichterbij de afwijkingen die gevonden werden in scenario 1. Bovendien zijn de verschillen in gebruikte voertuigen en haltes bij laadstations in dit scenario ook zeer miniem in vergelijking met scenario 2.1, maar wel meer gelijk aan scenario 1. Daarnaast is er nu bij 50 km/u enkel nog sprake van één oplossing die niet gevonden kon worden binnen de twee uur, in plaats van drie in scenario 2.1. De plaatsing van het snellaadstation op een centrale locatie bevordert dus niet enkel de oplossing zelf, maar leidt ook tot meer oplossingen – gegeven de gehanteerde willekeurige getalen.

Het al dan niet significant zijn van de verschillen tussen 65 km/u en 80 km/u wordt getoetst aan de hand van volgende hypothese en een gepaarde t-test.

$H_4$ : Er is een verschil tussen de gemiddelde afstand bij 65 km/u en de gemiddelde afstand bij 80 km/u

Hypothesetest scenario 2.2					
Hypothese	$\bar{Z}_{(n)}$	$\widehat{var}(\bar{Z}_{(n)})$	95% Betrouwbaarheidsinterval		Hypothese aanvaarden?
			Ondergrens	Bovengrens	
$H_4$	6,80	265,04	-4,84	18,45	Neen

Tabel 18: Hypothesetest scenario 2.2

Uit Tabel 18 blijkt – net zoals bij de voorgaande testen – dat hypothese 4 niet ondersteund kan worden en dat er dus geen significant verschil is tussen het resultaat bij 65 km/u en het resultaat bij 80 km/u.

Op basis van de onderzochte replicaties kan de conclusie dus gemaakt worden dat bij een afstandsminimaliserende doelfunctie het beter is om gebruik te maken van een publiek snellaadstation dat centraal gelegen is. Bedrijven hebben echter weinig inspraak in de allocatie dergelijke faciliteiten zoals eerder aangehaald in sectie 2.1.2 bij de bespreking van de verschillen tussen het VRPSF en het G-VRP. Bedrijven zijn afhankelijk van brandstofleveranciers die dergelijke snellaadstations zullen plaatsen op die locaties waar een maximale dekking van voertuigstromen mogelijk is, zoals reeds aangehaald onder sectie 2.2.

### 3.6 Scenario 3: Invloed vrachtlading op batterijverbruiksniveau

In het E-VRPTW van Schneider et al. (2012) wordt de veronderstelling gemaakt dat het batterijverbruiksniveau per kilometer constant is. In de beschrijving van de gegevens in sectie 3.3 was dit 0,66 procent per km. In realiteit is dit echter geen constante, maar afhankelijk van verschillende factoren zoals de rijnsnelheid, vrachtlading, helling van de weg, enzovoort. Daarom wordt een derde scenario gecreëerd waarbij het batterijverbruik niet langer berekend wordt aan de hand van een constante waarde, maar dat deze waarde afhangt van de hoeveelheid kilogram waarmee een truck geladen is wanneer deze reist van punt  $i$  naar punt  $j$ .

In de literatuur kan een vergelijking teruggevonden worden, opgesteld door Mannering et al. (2008), die rekenschap geeft aan de aanwezige vrachtlading. Deze vergelijking geeft de stroom die verbruikt wordt door een voertuig die tegen een constante snelheid rijdt. Het gaat om volgende vergelijking. De symbolen worden verklaard in Tabel 19.

$$P = \frac{\rho c_D A_f v^3}{2} + f_{rl} W v + G W v$$

Symbolenlijst		
	Definitie	Eenheid
$P$	Verbruikte stroom	Watt
$\rho$	Luchtdichtheid	kg/m <sup>3</sup>
$c_D$	Weerstandscoefficiënt	/
$A_f$	Frontaal oppervlak van het voertuig	m <sup>2</sup>
$f_{rl}$	Coëfficiënt voor de rolweerstand	/
$G$	Helling van de weg	Percentage
$W$	Gewicht van het voertuig	Newton
$v$	Gemiddelde snelheid	m/s

Tabel 19: Symbolenlijst vergelijking Mannering et al (2008)

Deze vergelijking zal ingevuld worden voor een toestand wanneer geen vrachtlading in de truck aanwezig is en voor de situatie wanneer de truck volgeladen is. Op basis van deze twee cijfers zal dan een lineair verband gemaakt worden met het tot nog toe gehanteerde gemiddelde verbruiksniveau van 0,66 procent per km.

Voor de luchtdichtheid  $\rho$  is geweten dat deze op zeeniveau en bij 15°C bij benadering 1,225 kg/m<sup>3</sup> bedraagt (Cavcar, z.d.). De weerstandscoefficiënt is volgens een evaluatierapport van de Smith Newton door het U.S. Department of Energy (2014) voor de periode november 2011 tot en met december 2013 bij benadering 0,5. Voor het frontaal oppervlak van het voertuig wordt gekeken naar de breedte zonder de zijspiegels en de hoogte van het voertuig zonder aanhangwagen. De breedte bedraagt dan 2,15 m en de hoogte 2,39 (Smith Electric Vehicles, 2011). Deze afmetingen resulteren in een oppervlakte van 5,14 m<sup>2</sup>. De gemiddelde snelheid van 65 km/u wordt omgezet naar 18,06 m/s. Met deze gegevens kan de eerste term in de vergelijking berekend worden en

deze is onafhankelijk van de vrachtlading die pas in de tweede en derde term een rol zal spelen. In de tweede term kan de coëfficiënt voor de rolweerstand berekend worden aan de hand van de formule  $f_{rl} = 0,01(1 + \frac{v}{147})$  (Davis & Figliozzi, 2013) die een functie is van de snelheid en bedraagt in dit geval 0,01123. Het gewicht in lege toestand wordt bepaald op basis van de technische beschrijving ((Smith Electric Vehicles, 2011)) en is gelijk aan 4500 kg of 44 145 Newton – hierbij is 1 kg = 9,81 Newton. De maximumcapaciteit van het voertuig werd in sectie 3.3 bepaald op 5000 kg en dus zal een volgeladen truck een totaalgewicht hebben van 9500 kg of 93 195 Newton. In de derde term van de vergelijking van Mannering et al. (2008) wordt tot slot rekenschap gegeven aan de helling van de weg, maar aangezien in deze case geen gegevens bestaan hieromtrent, wordt de veronderstelling gemaakt dat alle routes op een vlakke weg gereden worden en dat  $G = 0\%$ . De derde term valt bijgevolg weg uit de vergelijking.

Wanneer alle gegevens ingevuld worden voor de lege en volgeladen toestand, worden volgende twee verbruiken bekomen.

$$P_{4500kg} = 9272,41 + 8953,22 = 18225,63 W = 18,23 \text{ kiloWatt}$$

$$P_{9500kg} = 9272,41 + 18900,42 = 28172,83 W = 28,17 \text{ kiloWatt}$$

Vervolgens wordt een lineair verband gecreëerd tussen deze twee waarden en het gemiddeld verbruiksniveau van 0,66%/km. Het gemiddelde van 18,23 kW en 28,17 kW bedraagt 23,2 kW en dit is dan het gemiddelde stroomverbruik overeenkomend met de eerder aangehaalde 0,66%/km en rijautonomie van 150 km. Indien we extrapoleren naar 18,23 kW wordt een rijautonomie van 190,89 km verkregen, afgerond naar het dichtstbijzijnde geheel getal is dit 191 km, en een batterijverbruiksniveau van 0,52%/km. Op gelijkaardige wijze wordt voor 28,17 kW een rijautonomie van 124 km verkregen en een verbruiksniveau van 0,81%/km.

Het verschil in lading tussen een lege en volle truck bedraagt 5000 kg en dus kan ook berekend worden met hoeveel het verbruik toeneemt per kilogram. De berekening is als volgt.

$$\frac{0,81 \frac{\%}{km} - 0,52 \frac{\%}{km}}{5000kg} = 0,000 058 \frac{\%}{kg \cdot km}$$

Om de invloed van de vrachtlading in het E-VRPTW te integreren zijn ook enkele aanpassingen aan het model nodig. Zo zullen beperkingen (10) en (11) uit sectie 2.1.3 als volgt aangepast dienen te worden.

$$\begin{aligned} 0 \leq y_j \leq y_i - (r_{Leeg} \cdot d_{ij})x_{ij} - (r_{MeerVerbruik} d_{ij})f_{ij} + Q(1 - x_{ij}) & \quad \forall j \in V_{n+1} \text{ en } i \in I, i \neq j \\ 0 \leq y_j \leq Q - (r_{Leeg} \cdot d_{ij})x_{ij} - (r_{MeerVerbruik} d_{ij})f_{ij} & \quad \forall j \in V_{n+1}, \forall i \in F'_0, i \neq j \end{aligned}$$

Hier stelt de parameter  $r_{Leeg}$  het verbruiksniveau voor wanneer de truck ongeladen is, namelijk  $r_{Leeg} = 0,0052$ . Een tweede parameter wordt toegevoegd aan de twee beperkingen, meer bepaald  $r_{MeerVerbruik} = 0,000 000 58$ . Deze laatste wordt dan vermenigvuldigd met de afstand  $d_{ij}$  en ook met een nieuwe variabele  $f_{ij}$  die de goederenstroom tussen punten  $i$  en  $j$  weergeeft. Deze nieuwe

variabele wordt geformuleerd volgens het 'pollution routing problem' van Bektas & Laporte (2011) en leidt tot drie nieuwe beperkingen die gelden voor  $f_{ij}$ .

$$\sum_{j \in V_{0,n+1}} f_{ji} - \sum_{j \in V_{0,n+1}} f_{ij} = q_i \quad \forall i \in V$$

$$q_j x_{ij} \leq f_{ij} \leq (C - q_i) x_{ij} \quad \forall (i,j) \in V_{0,n+1}$$

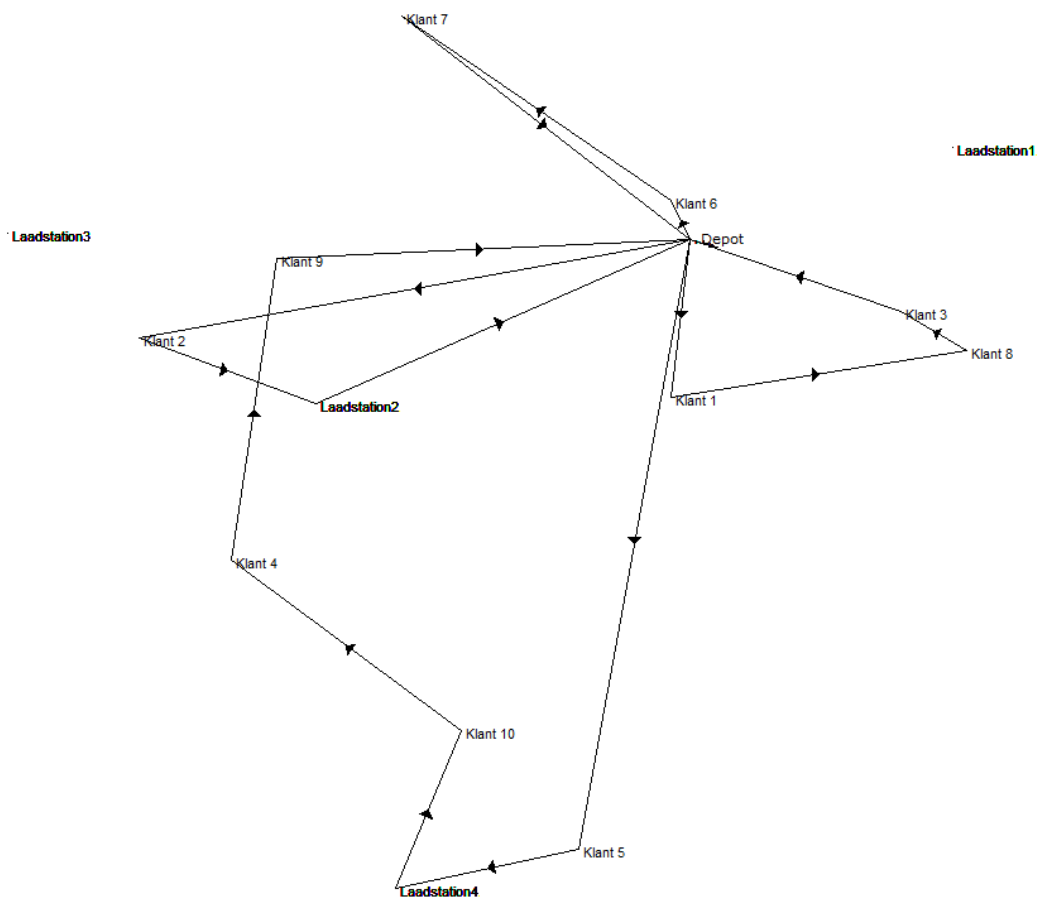
$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in V_{0,n+1}$$

De eerste vergelijking modelleert de goederenstroom als toenemend met de gevraagde hoeveelheid van elke bezochte klant. Vergelijking twee wordt gebruikt om de totale vrachtlading van een voertuig te beperken tot de vrachtcapaciteit. De derde beperking tot slot garandeert dat de goederenstroom een waarde is groter dan nul. Deze nieuwe vergelijkingen maken overigens de beperkingen (8) en (9) van het oorspronkelijk E-VRPTW in sectie 2.1.3 overbodig en dus kunnen deze weggelaten worden.

Alle aanpassingen worden ingevoerd in AIMMS en dit resulteert in een oplossing voor replicatie 1 bestaande uit vier ritten met een totale afstand van 705,93 km. De individuele ritten zijn weergegeven in Tabel 20 en Figuur 7.

<b>Scenario 3.1: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 2 → Laadstation 2.3 → Depot</i>	176,36
2	<i>Depot → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot</i>	115,23
3	<i>Depot → Klant 5 → Laadstation 4.6 → Klant 10 → Klant 4 → Klant 9 → Depot</i>	302,38
4	<i>Depot → Klant 6 → Klant 7 → Depot</i>	111,97
<b>Totaal</b>		<b>705,93</b>

**Tabel 20: Resultaten replicatie 1 scenario 3.1**



**Figuur 7: Ritte replicatie 1 scenario 3.1**

Voor replicatie 1 is de gevonden oplossing van 705,93 km een verbetering van 3,57 km of 0,5 procent ten opzichte van scenario 1. Deze verbetering is bovendien enkel en alleen toe te schrijven aan rit 3. Deze is 3,56 km korter dan in scenario 1 als gevolg van het wegvallen van de halte aan laadstation 2 tussen klant 9 en het depot. Het opnemen van een variabel batterijverbruiksniveau heeft er dus toe geleid dat in scenario 3.1 gemiddeld minder batterij verbruikt wordt dan in scenario 1, meer bepaald gemiddeld 30,33 procent voor scenario 3.1 en gemiddeld 30,58 procent voor scenario 1. In Tabel 21 zijn de verbruiks- en batterijniveau 's weergegeven voor rit 3. Hieruit blijkt dat het verbruik in scenario 3.1 aanvankelijk hoger ligt vanwege de hoge goederenstroom tussen het depot en klant 5, maar bij klant 5 wordt 3103 kg van deze goederenstroom afgeleverd en zal het verbruik – op één punt na – constant lager liggen dan in scenario 1. Dit leidt dus ook tot verschillende resterende batterijniveaus. In scenario 1 heeft het voertuig bij aankomst bij klant 4 nog een batterijniveau van 54,06 procent, maar is 72,33 procent vereist om naar klant 9 en het depot door te reizen. Vandaar dat eerst nog een tussenstop gemaakt wordt bij laadstation 2. In scenario 3.1 heeft het voertuig bij aankomst bij klant 9 nog een batterijniveau van 36,82% en is 32,80 procent nodig om door te reizen naar het depot. Een tussenstop bij een laadstation is hier dus niet meer vereist.

In realiteit zullen trucks waarschijnlijk de batterij niet precies tot 0 procent of een aantal percentages erboven laten dalen, want in een reële situatie kan de verkeerssituatie of het rijgedrag van de chauffeur ertoe leiden dat het verbruik net wat hoger ligt dan berekend zodat het depot net niet bereikt kan worden. Het is aannemelijk dat in werkelijkheid door een bedrijf gesteld zal worden dat wanneer het batterijniveau bijvoorbeeld nog maar 15 procent bedraagt, er dan een tussenstop bij een laadstation ingepland dient te worden.

Vergelijking batterijverbruik Rit 3								
	Depot	K5	L4.6	K10	K4	L2.9	K9	Depot
$f_{ij}$	3795	692	692	664	28	0	0	
Resterende batterij scenario 1	1	0,3760	0,1870	0,8284	0,5406	0,3605	0,8495	
Resterende batterij scenario 3.1	1	0,3003	0,1399	0,8544	0,6109	/	0,3682	
Verbruik scenario 1	0,6240	0,1890	0,1716	0,2878	0,1801	0,1505	0,4163	
Verbruik scenario 3.1	0,6997	0,1604	0,1456	0,2435	0,2427		0,3280	

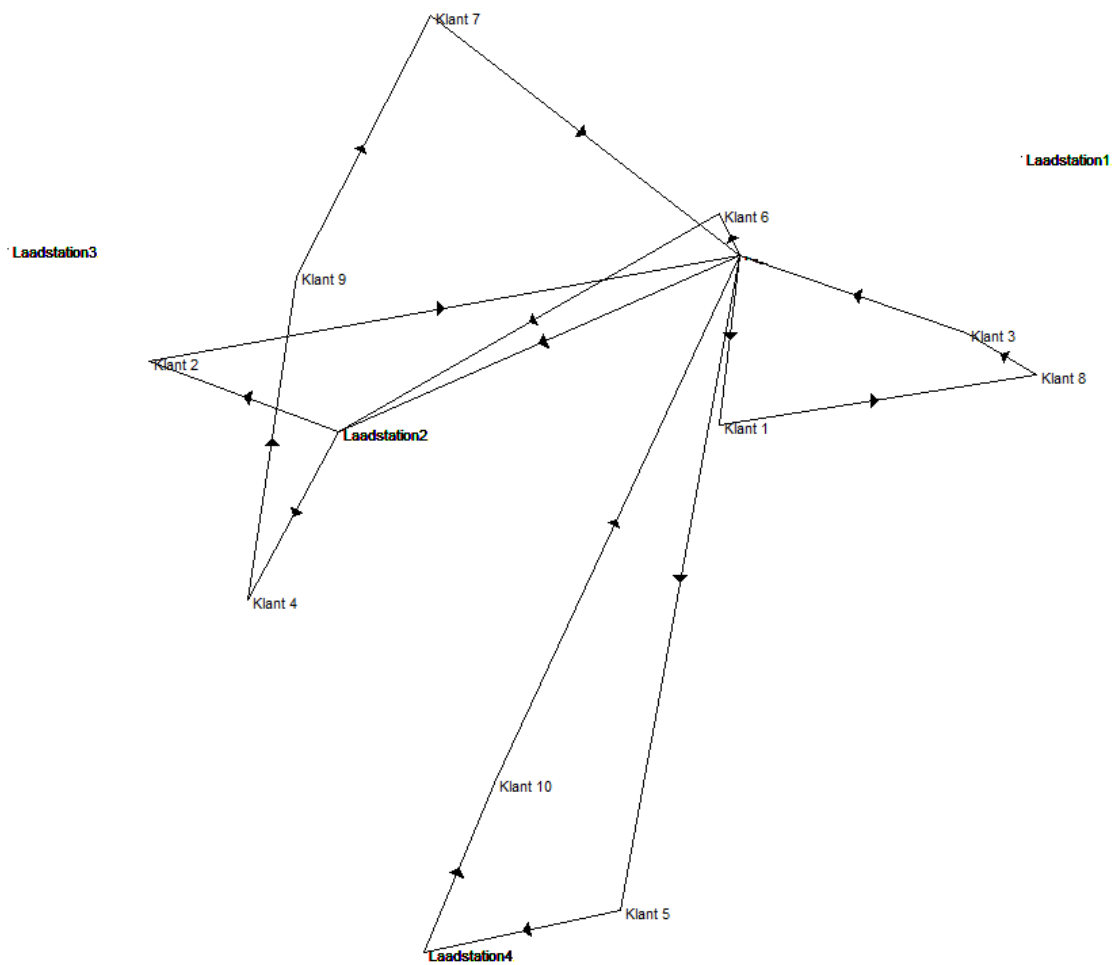
Tabel 21: Vergelijking batterijverbruik scenario 1 versus scenario 3.1

Het aangepaste model met variabel verbruiksniveau wordt ook voor scenario's 2.1 en 2.2 toegepast, resulterend in respectievelijk scenario 3.2 en scenario 3.3. De gevonden oplossing voor scenario 3.2 is 5,26 km korter ofwel een daling van 0,68 procent ten opzichte van scenario 2.1 met het constant verbruiksniveau. In deze oplossing verschuift klant 6 van rit 2 naar rit 3 met als resultaat een cumulatieve totaalafstand van 763,53 km. De oplossing voor scenario 3.3 blijft onveranderd in vergelijking met die van scenario 2.2. Dus heeft in deze specifieke case en voor dit scenario het variabel batterijverbruik geen invloed op de vorming van de verschillende ritten. Alle individuele ritten voor beide scenario's zijn weergegeven in Tabel 22 en Tabel 23. Scenario 3.2 is weergegeven in Figuur 8 en scenario 3.3 in Figuur 9.

Scenario 3.2: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.7 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot	115,23
3	Depot → Klant 6 → Laadstation 2.5 → Klant 4 → Klant 9 → Klant 7 → Depot	240
4	Depot → Klant 5 → Laadstation 4.2 → Klant 10 → Depot	231,94
<b>Totaal</b>		<b>763,53</b>

Tabel 22: Resultaten replicatie 1 scenario 3.2

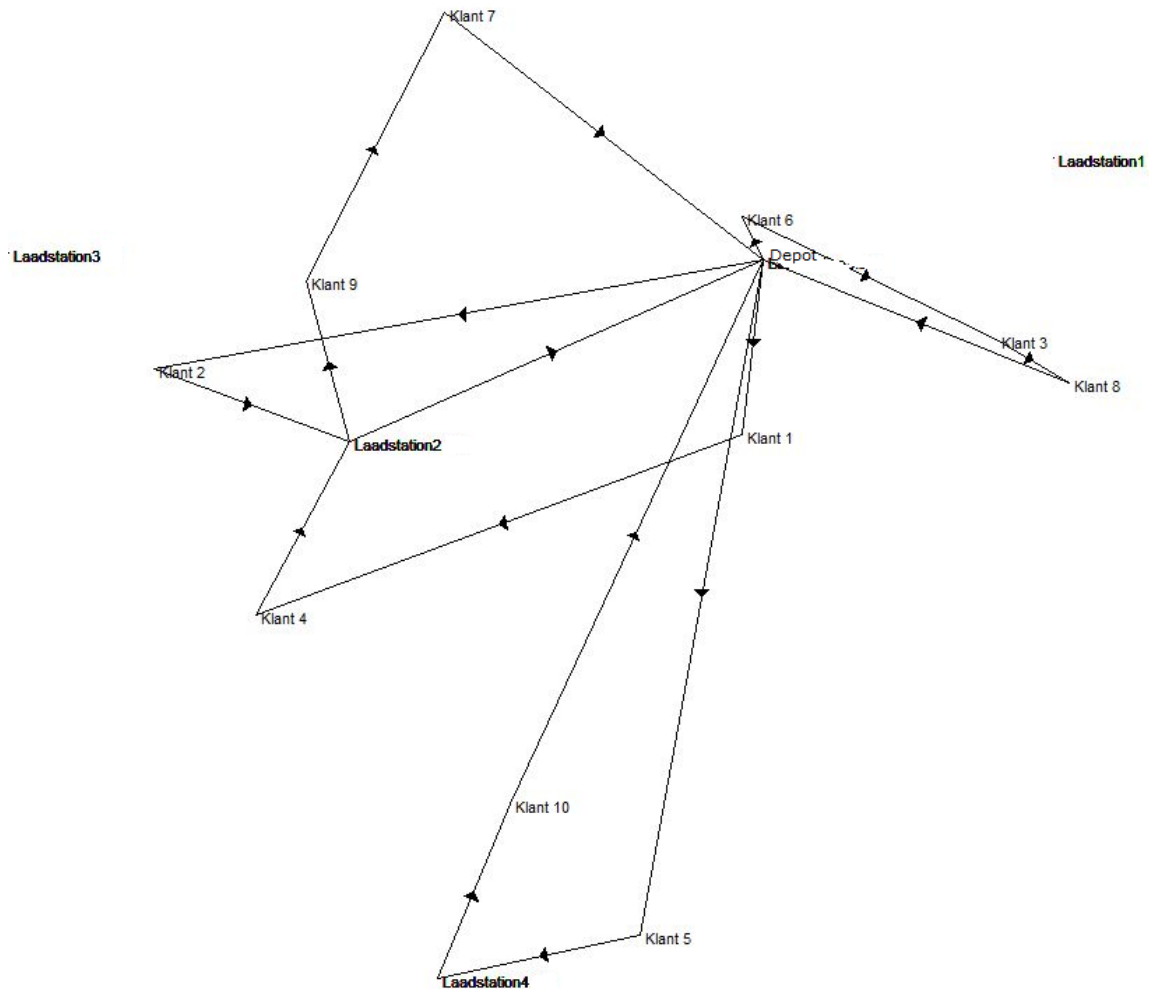




Figuur 8: Ritten replicatie 1 scenario 3.2

Scenario 3.3: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.7 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 8 → Klant 3 → Klant 6 → Depot	102,59
3	Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 2.10 → Klant 9 → Klant 7 → Depot	242,99
4	Depot → Klant 5 → Laadstation 4.1 → Klant 10 → Depot	231,94
<b>Totaal</b>		<b>753,89</b>

Tabel 23: Resultaten replicatie 1 scenario 3.3



**Figuur 9: Ritten replicatie 1 scenario 3.3**

In Tabel 25, Tabel 29 en Tabel 31 worden de verschillende replicaties weergegeven bij de verschillende snelheden. Wanneer de snelheid wijzigt zal ook het stroomverbruik in ongeladen en volgeladen toestand veranderen. Aangezien snelheid deel uitmaakt van de formule voor de berekening van het stroomverbruik, zijn de eerder verkregen waarden dan ook enkel geldig voor een gemiddelde snelheid van 65 km/u. Voor de gemiddelde snelheden 50 km/u en 80 km/u zullen nieuwe waarden berekend dienen te worden waarna een verbruiksniveau in lege toestand en een meerverbruik per kilogramkilometer afgeleid kan worden. Deze zijn terug te vinden in Tabel 24.

<b>Verbruikswaarden</b>			
<b>Snelheid (km/u)</b>	<b>50</b>	<b>65</b>	<b>80</b>
$r_{Leeg}(\%)$	0,49	0,52	0,55
$r_{MeerVerbruik}(\%/kg.km)$	$6,8 \times 10^{-5}$	$5,8 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-5}$

**Tabel 24: Verbruikswaarden bij de verschillende snelheden**

Vergelijking resultaten scenario 3.1									
Replicaties	50 km/u			65 km/u			80 km/u		
	m	s	$L_{Best}$	m	s	$L_{Best}$	m	s	$L_{Best}$
1	4	2	734,39	4	2	705,93	4	3	709,50
2	4	4	788,72*	4	4	771,78*	4	4	771,78*
3	5	2	784,40	4	3	718,79*	4	4	696,96*
4	4	3	773,30	4	3	773,30	4	3	773,30
5	5	2	739,65	4	5	750,63	4	4	745
6	4	2	628,79*	4	2	628,79*	4	3	630,15*
7	4	3	721,82	4	3	721,82	4	3	721,82
8	4	3	785*	4	3	767,70*	4	4	746,90*
9	4	1	657,61	4	3	662,55	4	3	669,17
10	4	2	493,53*	4	2	493,53*	4	2	493,53*
<b>Gemiddelde</b>	<b>4,2</b>	<b>2,4</b>	<b>710,72</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>699,48</b>	<b>4</b>	<b>3,3</b>	<b>695,81</b>

Tabel 25: Overzicht resultaten scenario 3.1

De resultaten voor de verschillende replicaties worden weergegeven in Tabel 25 en Bijlage 5. Voor 65 km/u leiden de tien replicaties tot een gemiddelde totaalafstand van 699,48 km. Ten opzichte van scenario 1 is dit een verbetering van 2,63 km of 0,37 procent. De integratie van een variabel batterijverbruik in het E-VRPTW resulteert in lager gemiddeld aantal tussenstop bij laadpunten, namelijk exact drie haltes. Indien naar de individuele replicaties gekeken wordt, kan niet overall een daling in de afstand waargenomen worden. Replicaties drie en vier moeten als gevolg van het variabele batterijverbruik meer afstand afleggen dan bij een constant verbruiksniveau. Bij replicatie drie is de wijziging toe te schrijven aan een herschikking van de haltes bij rit vier. In scenario 3.1 moet eerder een tussenstop gemaakt worden bij een laadstation – vooraleer klant 6 te bezoeken – terwijl in scenario 1 dit pas na klant 6 gebeurt. Bovendien wordt nu tweemaal een halte gemaakt bij laadstation 3, in tegenstelling tot in scenario 1 waar een halte gemaakt werd bij laadstation 3 en laadstation 2. Bij replicatie vier zijn meerdere veranderingen waar te nemen. Rit twee wordt korter, terwijl ritten drie en vier langer worden. De conclusie die gemaakt kan worden is dat het opnemen van een variabel batterijverbruiksniveau niet altijd tot een vermindering van de totale afgelegde afstand zorgt, maar wel bijdraagt aan een meer optimaal gebruik van de elektrische batterij van BEV's.

Wanneer naar de resultaten van de twee andere gemiddelde snelheden gekeken wordt, kan besloten worden dat ten opzichte van alle vorige scenario's, het verschil met het resultaat bij 65 km/u hier het kleinst is. Bij 50 km/u wordt namelijk een stijging in de gemiddelde afgelegde afstand waargenomen van 1,61 procent, en bij 80 km/u een daling van 0,52 procent. Deze kleinere verschillen kunnen verklaard worden gezien het feit dat in dit scenario de gemiddelde snelheid niet enkel tot uiting komt in de reistijden, maar ook in het variabel batterijverbruiksniveau, zoals weergegeven in Tabel 24. Bij 50 km/u is het verbruiksniveau in lege toestand lager, maar wordt wel een hoger meerverbruik aangerekend per kg.km. Bij 80 km/u is het tegenovergestelde het geval, een hoger verbruik wanneer geen vracht, maar een lager meerverbruik per kg.km. De

significantie van de verschillen wordt nagegaan aan de hand van volgende hypothesen met de betrouwbaarheidsintervallen weergegeven in Tabel 26.

$H_5$ : Er is een verschil tussen de gemiddelde afstand bij 65 km/u en de gemiddelde afstand bij 50 km/u

$H_6$ : Er is een verschil tussen de gemiddelde afstand bij 65 km/u en de gemiddelde afstand bij 80 km/u

Hypothesetesten scenario 3.1					
Hypothese	$\bar{Z}_{(n)}$	$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})$	95% Betrouwbaarheidsinterval		Hypothese aanvaarden?
			Ondergrens	Bovengrens	
$H_5$	-11,24	509,19	-27,38	4,90	Neen
$H_6$	3,67	96,06	-3,34	10,68	Neen

Tabel 26: Hypothesetesten scenario 3.1

De gepaarde t-testen leiden tot de conclusie dat er geen significant verschil is tussen de lagere/hogere gemiddelde snelheid en 65 km/u.

In alle voorgaande scenario's kon uit de resultaten telkens afgeleid worden dat de afstanden bij een lagere gemiddelde snelheid altijd groter of gelijk waren aan de afstanden gevonden bij 65 km/u – op enkele uitzonderingen na. Voor een hogere gemiddelde snelheid goldde het omgekeerde. Hoewel het gemiddelde over alle tien replicaties heen hier tot eenzelfde conclusie leidt, geeft een verdere studie van de individuele replicaties andere inzichten. Replicatie 5 bijvoorbeeld heeft voor zowel de hogere als lagere gemiddelde snelheid een kortere totale ritafstand. Voor 50 km/u kan dit beter resultaat zelfs bekomen worden met een bijkomend vijfde voertuig, terwijl voor 65 km/u slechts gebruik gemaakt wordt van vier voertuigen. Een verdere studie van de verschillende ritten levert de verklaring. Rit 2 is de voornaamste verandering bij de drie verschillende snelheden. In Tabel 27 wordt het batterijverbruik voor rit 2 weergegeven bij de verschillende gemiddelde snelheden indien dezelfde ritsamenstelling behouden werd zoals bij 50 km/u. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat bij de twee hogere snelheden deze rit niet voltooid kan worden wegens te hoog verbruik en dat tenminste één tussenstop bij een laadstation nodig is voor deze rit. Bij hogere snelheden zal deze rit dus langer worden. Dit verklaart waarom replicatie 5 een kortere afstand heeft voor 50 km/u ten opzichte van de overige snelheden.

Batterijverbruik rit 2 van replicatie 5 (ritsamenstelling 50 km/u)					
	Depot	Klant 6	Klant 2	Depot	
Gemiddelde Snelheid	Totaalverbruik				
50 km/u		45,39%	14,26%	39,86%	96,51%
65 km/u		45,07%	14,42%	42,30%	101,79%
80 km/u		44,75%	14,58%	44,74%	104,07%

Tabel 27: Batterijverbruik rit 2 van replicatie 5

De verklaring voor de betere oplossing bij 80 km/u ten opzichte van 65 km/u kan afgeleid worden uit Tabel 28. Hierin wordt rit 2 weergegeven voor de twee hoogste snelheden zonder laadstations en dit bij een totale vrachtlading van 4272 kg bij vertrek aan het depot. Hieruit blijkt dat initieel het verbruik hoger ligt bij 65 km/u, maar hoe verder de rit vordert hoe kleiner dit verschil wordt en uiteindelijk ligt het verbruik hoger bij 80 km/u. Hieruit kan geconcludeerd worden dat zolang de truck voldoende geladen is, het batterijverbruik voordeliger is bij 80 km/u, vanwege het lagere meerverbruik per kg.km. Dit voordeel verdwijnt naarmate klanten bediend worden en dus de vrachtlading afneemt, aangezien het verbruik in lege toestand hoger is voor 80 km/u. Omdat bij 65 km/u het verbruik initieel hoger ligt, is een bijkomende tussenstop aan een laadstation vereist. Dit verklaart waarom de oplossing bij deze snelheid langer is.

<b>Batterijverbruik rit 2 van replicatie 5 (65 km/u)</b>					
	<b>Depot</b>	<b>Klant 6</b>	<b>Klant 2</b>	<b>Klant 3</b>	<b>Depot</b>
<b>Leegverbruik</b>		32,38%	11,49%	35,79	42,32%
<b>Meerverbruik</b>		15,43%	3,90%	2,86%	
<b>Totaalverbruik</b>		47,81%	15,39%	36,69%	
<b>Batterijverbruik rit 2 van replicatie 5 (80 km/u)</b>					
	<b>Depot</b>	<b>Klant 6</b>	<b>Klant 2</b>	<b>Klant 3</b>	<b>Depot</b>
<b>Leegverbruik</b>		34,25%	12,15%	35,79%	44,76%
<b>Meerverbruik</b>		12,77%	3,23%	2,37%	
<b>Totaalverbruik</b>		47,02%	15,38%	38,16%	

Tabel 28: Vergelijking batterijverbruik rit 2 van replicatie 5 bij 65 km/u en 80 km/u

Het gemiddeld aantal gebruikte voertuigen blijft gelijk, maar bij 50 km/u kan wel een aanzienlijke daling waargenomen worden in het gemiddeld aantal tussenstops bij een laadstation. In scenario 1 bleef dit aantal gelijk bij de drie verschillende snelheden. Zoals eerder aangehaald slaagt het variabel batterijverbruiksniveau er dus in het model tot betere oplossingen te laten komen en zorgt voor een meer optimale planning van tussenstops bij laadpunten.

Vergelijking resultaten scenario 3.2									
Replicaties	50 km/u			65 km/u			80 km/u		
	m	s	$L_{Best}$	m	s	$L_{Best}$	m	s	$L_{Best}$
1	4	3	777,19	4	3	763,53	4	3	762,66
2	4	3	818,06*	4	4	771,78*	4	4	771,78*
3	4	2	730,98*	5	2	786,61	4	2	711,62*
4	4	4	795,77*	4	3	787,63	4	5	801,35
5	5	1	743,81	4	3	755,84	4	3	755,84
6	4	2	628,79*	4	2	628,79*	4	2	643,44
7	4	3	722,15	4	3	722,15	4	3	722,15
8	5	3	888,20	5	2	883,63	4	4	829,96
9	4	1	694,21	4	3	739,76	4	3	724,89
10	4	1	507,63*	4	2	510,01*	4	2	510,01
<b>Gemiddelde</b>	<b>4,2</b>	<b>2,3</b>	<b>730,68</b>	<b>4,2</b>	<b>2,7</b>	<b>734,97</b>	<b>4</b>	<b>3,1</b>	<b>723,37</b>

Tabel 29: Overzicht resultaten scenario 3.2

De resultaten voor scenario 3.2 in Tabel 29 en Bijlage 6 tonen een verbetering van 15,14 km of 2,02 procent ten opzichte van scenario 2.1 – voor het resultaat bij 65 km/u. Dit kan grotendeels toegeschreven worden aan het kleiner gemiddeld aantal tussenstops bij een laadstation. Bij scenario 2.1 lag dit nog tussen de drie en vier haltes, terwijl dit hier tussen de twee en drie haltes ligt. Gemiddeld genomen wordt dus een tussenstop minder gemaakt. Het aantal gebruikte voertuigen blijft onveranderd. Net als bij scenario 3.1 blijken ook hier niet alle individuele replicaties een kortere afstand te hebben. Replicatie vier is in dit scenario 1,58 km langer, ondanks twee haltes minder aan een laadstation. De grootste daling in afstand kan dan weer waargenomen worden bij replicatie 8. Deze wordt in scenario 3.2 86,05 km korter en is het gevolg van de vorming van de 'direct shipping' rit naar klant 9. In scenario 2.1 werd voor en na het bezoek aan deze klant een tussenstop gemaakt bij een laadstation. In scenario 3.2 vallen deze twee haltes weg. De verklaring hiervoor ligt in de zeer kleine lading die aan klant 9 geleverd moet worden, namelijk 63 kg. Hierdoor zal het verbruik gedurende de rit naar klant slechts 0,523654%/km bedragen om vervolgens – na levering – terug te dalen naar 0,52%/km voor de terugweg. In scenario 2.1 was het verbruik over de hele rit – heen en terug – 0,66%/km, wat aanzienlijk hoger is. In beide scenario's moet vanuit kostenperspectief wel de vraag gesteld worden of deze rit rendabel is gezien de zeer kleine vrachthoeveelheid. Het is te verantwoorden indien de waarde van de goederen hoog zijn, maar indien dit niet het geval is moet overwogen worden om klant 9 bij een van de overige drie ritten toe te voegen. Dit leidt dan mogelijk tot een stijging van de totale afgelegde afstand, maar levert anderzijds ook een besparing op door een voertuig minder in te zetten en dus ook een chauffeur minder te betalen. Uit de resultaten van scenario 3.3 zal wel blijken dat replicatie 8 mogelijk is met enkel vier ritten en dit ook bij een kortere totale afstand.

Daarnaast kan ook hier de vaststelling gemaakt worden dat geen gebruik gemaakt wordt van het snellaadstation op het depot. De verklaring hiervoor is gelijk aan deze gegeven bij scenario 2.1 in sectie 3.5.1.

Wanneer naar de resultaten van de twee andere gemiddelde snelheden gekeken wordt, kan voor het eerst een betere gemiddelde oplossing vastgesteld bij 50 km/u. Tot nog toe gaf het gemiddelde over alle tien replicaties heen bij 50 km/u de minst goede oplossing. Dit is hier niet langer het geval. In deze oplossing is een daling van 0,58 procent waar te nemen ten opzichte van 65 km/u en dit is het gevolg van aanzienlijke verbeteringen bij een aantal individuele replicaties. Ook voor 80 km/u wordt – zoals voorheen – een gemiddeld betere oplossing gevonden, namelijk een daling 1,58 procent. Op basis van deze replicaties kan dus gesteld worden dat het meer opportuun is om een gemiddelde snelheid aan te houden die hoger of lager is dan 65 km/u, met het beste resultaat voor 80 km/u.

Net zoals bij scenario 3.1 blijken ook hier de onderlinge verschillen tussen de hogere en lagere snelheid en 65 km/u kleiner te zijn dan in scenario 2.1, namelijk -0,58 procent voor 50 km/u en -1,58 procent voor 85 km/u. Daarnaast blijkt ook voor 50 km/u een aanzienlijke daling in het aantal gemiddelde tussenstops bij een laadpunt. Gemiddeld genomen kan een route het stellen met bijna twee haltes minder dan in scenario 2.1. Dit groot verschil is mogelijk wel te wijten aan de drie ontbrekende oplossingen in scenario 2.1 waardoor dit gemiddelde enkel op basis van zeven replicaties berekend werd. Ook bij de andere twee snelheden ligt dit gemiddelde lager. Het aantal gebruikte voertuigen blijft ongeveer gelijk. De significantie van de verschillen wordt ook hier nagegaan via een gepaarde t-test met volgende hypothesen.

$H_7$ : Er is een verschil tussen de gemiddelde afstand bij 65 km/u en de gemiddelde afstand bij 50 km/u

$H_8$ : Er is een verschil tussen de gemiddelde afstand bij 65 km/u en de gemiddelde afstand bij 80 km/u

<b>Hypothesetesten scenario 3.2</b>					
<b>Hypothese</b>	$\bar{Z}_{(n)}$	$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})$	<b>95% Betrouwbaarheidsinterval</b>		<b>Hypothese aanvaarden?</b>
			<b>Ondergrens</b>	<b>Bovengrens</b>	
$H_7$	4,29	839,01	-16,43	25,01	Neen
$H_8$	11,60	864,71	-9,43	32,64	Neen

**Tabel 30: Hypothesetesten scenario 3.2**

De resultaten uit Tabel 30 geven ook hier geen significant verschil aan tussen de resultaten bij de verschillende snelheden.

In een laatste scenario wordt het variabel batterijverbruik gekoppeld aan een laadinfrastructuur met een centraal publiek laadstation. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 31.

Vergelijking resultaten scenario 3.3									
Replicaties	50 km/u			65 km/u			80 km/u		
	m	s	$L_{Best}$	m	s	$L_{Best}$	m	s	$L_{Best}$
1	4	3	767,55	4	3	753,89	4	3	723,17
2	4	4	807,66*	4	4	771,78*	4	4	771,78*
3	4	2	730,98*	5	1	784,55	4	2	711,62
4	4	3	774,24	4	4	778,66	4	5	787,45
5	5	2	739,65	5	4	772,44	4	4	751,68
6	4	2	628,79*	4	2	628,79*	4	3	630,15*
7	4	3	721,82	4	3	721,82	4	3	721,82
8	5	3	911,52	4	5	842,36	4	4	829,96
9	4	1	657,61	4	2	675,94	4	3	670,29
10	4	1	507,63	4	3	497,39*	4	3	497,39*
<b>Gemiddelde</b>	<b>4,2</b>	<b>2,4</b>	<b>724,75</b>	<b>4,2</b>	<b>3,1</b>	<b>722,76</b>	<b>4</b>	<b>3,4</b>	<b>709,53</b>

Tabel 31: Overzicht resultaten scenario 3.3

De berekeningen voor scenario 3.3 – weergegeven in Tabel 31 en Bijlage 7 – komen tot een gemiddelde totaalafstand van 722,76 km voor 65 km/u. Dit is 4,23 km korter dan in scenario 2.2 – een verbetering van 0,58 procent. Ook hier blijft het aantal gebruikte voertuigen onveranderd. De wijziging in het aantal tussenstops bij een laadstation is hier minder groot dan in scenario 3.2, hoewel het gemiddelde hier toch meer naar drie tussenstops neigt, terwijl dit in scenario 2.2 meer tussen drie en vier lag. Wanneer de vergelijking gemaakt wordt met scenario 3.2 kan eveneens een daling in de gemiddelde afstand waargenomen worden, namelijk 12,21 km of 1,66 procent. Net als in scenario 2.2 zorgt de plaatsing van het snellaadstation bij een publiek laadpunt tot een vermindering van de totale afgelegde afstand. In dit scenario leidt het variabel batterijverbruik dan nog eens voor een daling in deze gemiddelde afstand.

De resultaten voor de twee andere snelheden geven eveneens een betere oplossing in vergelijking met scenario 2.2 en scenario 3.2. Ten opzichte van laatstgenoemde scenario ligt het aantal tussenstops bij een laadstation iets hoger. De allocatie van het snellaadstation op een publiek laadpunt maakt het mogelijk om meer haltes te maken en dit bij een kortere totaalafstand. De significantie van de verschillen wordt getest in Tabel 32.

$H_9$ : Er is een verschil tussen de gemiddelde afstand bij 65 km/u en de gemiddelde afstand bij 50 km/u

$H_{10}$ : Er is een verschil tussen de gemiddelde afstand bij 65 km/u en de gemiddelde afstand bij 80 km/u

De hypothesen worden ook hier verworpen en dus is geen sprake van een significant verschil tussen de lagere/hogere snelheid en 65 km/u.



<b>Hypothesetesten scenario 3.3</b>					
<b>Hypothese</b>	$\bar{Z}_{(n)}$	$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})$	<b>95% Betrouwbaarheidsinterval</b>		<b>Hypothese aanvaarden?</b>
			<b>Ondergrens</b>	<b>Bovengrens</b>	
$H_9$	-1,98	1180,34	-26,56	22,59	Neen
$H_{10}$	13,23	578,63	-3,98	30,44	Neen

**Tabel 32: Hypothesetesten scenario 3.3**

Uit de experimenten kan geconcludeerd worden dat alle klanten bediend kunnen worden met ten minste vier voertuigen. Daarnaast blijkt ook dat de keuze voor tien dummy laadstations ruim voldoende gebleken is. Gemiddeld worden drie haltes gemaakt aan een laadstation, maar dit gemiddelde zal mogelijk wel hoger liggen wanneer de klanten een groter oppervlak bestrijken. Dit zal wel enkel mogelijk zijn indien bredere tijdvensters gehanteerd worden, want eerdere testexperimenten hebben aangetoond dat nauwe tijdvensters de bediening van een wijdverspreid klantenbestand verhinderen.

### 3.7 Conclusie

In deze masterproef werd onderzocht hoe de beperkingen van het gebruik van alternatieve brandstoffen geïntegreerd kunnen worden in modellen voor rittenplanning. Eerst zullen de conclusies van het onderzoek besproken worden, gevolgd door de beperkingen van deze studie en aanbevelingen voor verder onderzoek.

#### 3.7.1. Conclusies onderzoek

Als gevolg van onder meer de klimaatproblematiek wordt naar oplossingen gezocht om de hoeveelheid vervuilende emissies die dagelijks in de atmosfeer terecht komen te verminderen. De transportsector is verantwoordelijk voor een groot aandeel van het wereldwijde energieverbruik en dus ook voor de hieraan gerelateerde uitstoot van broeikasgassen. Vandaar dat de sector een belangrijke rol zal spelen in de strijd tegen de klimaatopwarming. Een mogelijke oplossing is overschakelen naar voertuigen die kunnen rijden op alternatieve brandstoffen, maar op dit moment kunnen deze nog niet wedijveren met conventionele benzine- of diesellootvoertuigen. Dergelijke voertuigen zijn vaak beperkt in rijbereik en bovendien ontbreekt vaak een wijdverspreide tankinfrastructuur. Daarnaast vraagt de aankoop van dergelijke voertuigen vaak aanzienlijke investeringen. Dit alles maakt alternatieve brandstoffen minder aantrekkelijk in vergelijking met de conventionele brandstoffen. Desalniettemin wordt in de toekomst een toenemend gebruik verwacht van alternatieve brandstoffen en is het dus ook interessant om onderzoek te verrichten naar hoe deze nieuwe technologieën in bestaande modellen geïntegreerd kunnen worden.

In de literatuur zijn op dit moment slechts twee rittenplanningsmodellen terug te vinden die voertuigen op alternatieve brandstoffen in beschouwing nemen. Erdogan & Miller-Hooks (2012) waren de eersten om een model te ontwikkelen waarbij de mogelijkheid opgenomen wordt om tijdens de route bij te tanken. De auteurs formuleerden hiervoor het 'Green Vehicle Routing Problem' en pasten het toe bij wagenparken op aardgas en biodiesel. Het model is echter ook toepasbaar op andere alternatieve brandstoffen evenals op benzine of diesel. Schneider et al. (2012) hebben hierna verder gebouwd op het 'Green Vehicle Routing Problem' en formuleerden het 'Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations (E-VRPTW)' specifiek voor elektrische voertuigen. In dit model wijken de auteurs af van de vaste tanktijden verondersteld bij Erdogan & Miller-Hooks (2012) en introduceren ook tijdvensters en ladingsbeperkingen.

Het is dit laatste model dat in het praktijkonderzoek onderzocht werd en waarop een aantal experimenten werden uitgevoerd. Zo werd gekeken naar het effect van het gebruik van verschillende types laadstations, want het opladen van een elektrische batterij neemt veel tijd in beslag. Uit de resultaten blijkt dat modellen met traaglaadstations leiden tot de vorming van ritten die gemiddeld langer zijn dan wanneer enkel snellaadstations beschikbaar zijn. Bij het combineren van de twee types blijkt dat de locatie van het snellaadstation een belangrijke rol speelt en is het aangewezen om te kiezen voor een centraal gelegen locatie. Bedrijven hebben echter weinig invloed op de allocatiekeuze van snellaadstations en zijn dus afhankelijk van de infrastructuur zoals de brandstofleverancier deze aangelegd heeft.

Verder werd de invloed van de vrachtlading op het batterijverbruik nagegaan. In het oorspronkelijk E-VRPTW werd een constant verbruiksniveau per kilometer verondersteld. In deze praktijkstudie wordt dit aangepast naar een verbruiksniveau dat afhankelijk is van de resterende vrachtlading in een truck. De experimenten leiden in de meeste gevallen tot een daling in de totale afgelegde afstand, ook wanneer verschillende types laadstations gebruikt worden. Het variabel batterijverbruiksniveau leidt dus tot een meer optimaal gebruik van de beschikbare elektrische voertuigen.

Alle experimenten werden uitgevoerd bij drie verschillende gemiddelde snelheden. Voor de eerste drie scenario's uitte deze snelheid zich enkel in kortere of langere reistijden met als gevolg dat hogere snelheden tot een betere oplossing leiden. Wanneer echter ook een variabel batterijverbruik geïntegreerd wordt in het model zal de snelheid ook rekenschap geven in dit verbruiksniveau. Dit resulteert in routes die niet noodzakelijk korter zijn naarmate de gemiddelde snelheid hoger is, maar – zoals uit de resultaten blijkt – kunnen lagere snelheden eveneens tot betere oplossingen leiden. Een belangrijke bepalende factor hierbij is de hoeveelheid vrachtlading. Het is mogelijk dat bij een voldoende grote vrachtlading het voordeliger is een hogere gemiddelde snelheid aan te houden. Het rijgedrag van chauffeurs zou hier dus op afgestemd kunnen worden, maar andere oncontroleerbare factoren, zoals de verkeerssituatie, kunnen dit optimaal gebruik van de truck belemmeren. Het ontbreken van significante resultaten verhindert echter de veralgemening van deze conclusies en schrijft de gevonden verschillen toe aan het toeval. Mogelijk worden wel significante verschillen gevonden indien gebruik gemaakt wordt van een grotere steekproef, wat in dit geval neerkomt op meer replicaties.

Elektrische voertuigen zijn een milieuvriendelijk alternatief met een beperkte actieradius voor de bediening van klanten. Deze voertuigen zijn dus niet geschikt voor langeafstandsritten, maar kunnen binnen een kleiner werkgebied de consumentenvraag vervullen.

### *3.7.2. Beperkingen en verder onderzoek*

Het moet benadrukt worden dat de resultaten in scenario's 2.1, 2.2, 3.2 en 3.3 onder een afstandsstandsminimaliserende doelfunctie gevonden werden en sterk beïnvloed werden door de tijdvensterbeperkingen. Aangezien de verschillende types laadstation zich onderscheiden in dienstverleningstijd, zou het beter zijn om de totale tijdsduur te minimaliseren in plaats van de afstand. Hierdoor zou een nonlineaire doelfunctie verkregen worden, maar dergelijke aanpassing aan het model ligt buiten het werkveld van deze masterproef. Dit is mogelijk wel een interessante denkpiste voor verder onderzoek.

Daarnaast wordt in dit onderzoek ook aangenomen dat een voertuig altijd zal kunnen opladen aan het ingeplande laadstation, maar wat indien alle beschikbare laders op die locatie reeds door anderen in gebruik zijn? Dit zal leiden tot bijkomende wachttijd en kan problemen geven met de vooropgestelde tijdvensters. Of zal de keuze gemaakt worden om uit te wijken naar een ander laadstation om daar vervolgens op te laden. Die keuze zal in overweging genomen moeten worden, maar kan vanwege de beperkte laadinfrastructuur en het resterende batterijniveau ook onbestaande zijn.

Alle onderzochte experimenten maken gebruik van een constante snelheid. Dit is weinig realistisch, aangezien geen rekening gehouden werd met onder andere het accelereren van voertuigen, 'stop and go' bewegingen, stationair draaien, enzovoort. In scenario's 1, 2.1 en 2.2 komt de snelheid bovendien enkel tot uiting in de reistijd en niet in het brandstofverbruik. In scenario's 3.1, 3.2 en 3.3 wordt de snelheid wel meegenomen bij de berekening van het variabele verbruiksniveau, maar dan wel als een constante waarde. In laatstgenoemde scenario's wordt voor dit verbruiksniveau overigens geen rekenschap gegeven aan de helling van de weg en de veronderstelling gemaakt dat alle ritten op een vlakke weg gebeuren. Dit zal in werkelijkheid ook niet het geval zijn. In deze praktijkstudie werd de keuze gemaakt voor de formule van Mannering et al. (2008) voor de berekening van een variabel batterijverbruiksniveau. Voor verder onderzoek kan het interessant zijn om op te zoek te gaan naar andere formules die dit verbruiksniveau nog realistischer weergeven en bijvoorbeeld gebruik maken van dynamische snelheidswaarden in plaats van een constant gemiddelde.

Daarnaast bestaat de mogelijkheid om na te gaan of het model ook een oplossing kan vinden waarbij de batterij niet volledig wordt opgeladen, maar slechts net voldoende om het vervolg van de route te vervolledigen. Dit zou dan voor kortere oplaadtijden kunnen zorgen.



## Literatuurlijst

---

- Achtnicht, M., Bühler, G., & Hermeling, C. (2012). The impact of fuel availability on demand for alternative-fuel vehicles. *Transportation Research: Part D*, 17, 262-269.
- Anderson, S.T. (2012). The demand for ethanol as a gasoline substitute. *Journal of Environmental Economics and Management*, 63, 151-168.
- Astbury, G.R. (2008). A review of the properties and hazards of some alternative fuels. *Process safety and environment protection*, 86, 397-414.
- Bard, J., Huang, L., Dror, M., & Jaillet, P. (1998). A branch and cut algorithm for the VRP with satellite facilities. *IIE Transactions*, 30, 821-834.
- Battery University. (2010). Battery Chargers and Charging Methods. Opgevraagd op 21 april, 2014, via <http://www.mpoweruk.com/chargers.htm>.
- Bektas, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research: Part B*, 45, 1232-1250.
- Brown, S., Pyke, D., & Steenhof, P. (2010). Electric vehicles: The role and importance of standards in an emerging market. *Energy Policy*, 38, 3797-3806.
- Browne, D., O'Mahony, M., & Caulfield, B. (2012). How should barriers to alternative fuels and vehicles be classified and potential policies to promote innovative technologies be evaluated?. *Journal of Cleaner Production*, 35, 140-151.
- Capar, I., & Kuby, M. (2012). An efficient formulation of the flow refueling location model for alternative-fuel stations. *Institute of Industrial Engineers Transactions* 44, 8, 622-636.
- Cavcar, M. (z.d.). The international standard atmosphere (ISA). Opgevraagd op 23 maart, 2014, via <http://fisicaatmo.at.fcen.uba.ar/practicas/ISAweb.pdf>.
- Corts, K.S. (2010). Building out alternative fuel retail infrastructure: Government fleet spillovers in E85. *Journal of Environmental Economics and Management*, 59, 219-234.
- Davis, B.A., & Figliozzi, M.A. (2013). A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. *Transportation Research Part E*, 49, 8-23.
- Dong, J., Liu, C., & Lin, Z. (2014). Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data. *Transportation Research Part C*, 38, 44-55.
- Erdogan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research: Part E*, 48(1), 100-114.
- Europese Commissie. (2011). *Witboek: Stappenplan voor een interne Europese vervoersruimte – werken aan een concurrerend en zuinig vervoerssysteem*. Opgevraagd op 18 februari, 2013, via <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:NL:PDF>.
- Groom, N. (2013, 21 juni). Electric car maker Tesla unveils 90-second battery pack swap. Reuters. Opgevraagd op 7 maart, 2014, via <http://www.reuters.com/article/2013/06/21/us-tesla-swap-idUSBRE95K07H20130621>.
- Hodgson, M.J. (1990). A flow capturing location-allocation model. *Geographical analysis* 22, 3, 270-279.
- Huang, D., Zhou, H., & Lin, L. (2012). Biodiesel – an alternative to conventional fuel. *Energy Procedia*, 16, 1874-1885.

- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., & Swets, N.B. (2010). *Simulation with Arena*. New York: McGraw-Hill.
- Kuby, M., & Lim, S. (2005). The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles. *Socio-Economic Planning Sciences* 39, 2, 125-145.
- Lim, S., & Kuby, M. (2010). Heuristic algorithms for siting alternative-fuel stations using the Flow-Refueling Location Model. *European Journal of Operational Research*, 204, 51-61.
- Lin, C., Choy, K.L., Ho, G.T.S, Chung, S.H., & Lam, H.Y. (2013). Survey of green vehicle routing problem: past and future trends (article in press, corrected proof). *Expert Systems with applications*, xxx, xxx-xxx
- Lindfeldt, E.G., Magnusson, M., Mohseni, F., & Saxe, M. (2010). Strategies for a road transport system based on renewable resources – The case of an import-independent Sweden in 2025. *Applied Energy*, 87, 1836-1845.
- Liu, J. (2012). Electric vehicle charging infrastructure assignment and power grid impacts on assessment in Beijing. *Energy Policy*, 51, 544-557.
- Lucas, A., Silva, A.S., & Neto, R.C. (2012). Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles. *Energy Policy*, 41, 537-547.
- Mannering, F.L., Washburn, S.S., Kilareski, W.P. (2008). *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*. Wiley.
- Melaina, M., & Bremson, J. (2008). Refueling availability for alternative fuel vehicle markets: sufficient urban station coverage. *Energy Policy*, 36, 3233-3241.
- National Fire Protection Association (NFPA), 2011. The 2011 Edition of National Electrical Code, Article 625.
- National Research Council (NRC), 2013. *Transitions to Alternative Vehicles and Fuels*. The National Academies Press, Washington, DC.
- Nie, Y., & Li, Q. (2013). An eco-routing model considering microscopic vehicle operating conditions. *Transportation Research: Part B*, 55, 154-170.
- Ogden, J., 2005. The transition to hydrogen. Access 27, 10–16.
- Salvi, B.L., Subramanian, K.A., & Panwar, N.L. (2013). Alternative fuels for transportation vehicles: a technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 404-419.
- Shinnar, R. (2003). The hydrogen economy, fuel cells, and electric cars. *Technology in Society*, 25, 455-476.
- Schneider, M., Stenger, A., & Goeke D. (2012). *The Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations*. Technical Report 02/2012, University of Kaiserslautern, Germany.
- Shukla, A., Pekny, J., & Venkatasubramanian, V. (2011). An optimization framework for cost effective design of refueling station infrastructure for alternative fuel vehicles. *Computers and Chemical Engineering*, 35, 1431-1438.
- Smith Electric Vehicles. (2011). *Smith Vehicles – Models and Configurations*. Opgevraagd op 15 februari, 2014, via [http://www.smithelectric.com/wp-content/themes/barebones/pdfs/SmithNewtonSpecSheet\\_OUS\\_2011.pdf](http://www.smithelectric.com/wp-content/themes/barebones/pdfs/SmithNewtonSpecSheet_OUS_2011.pdf)
- Steenberghen, T., & López, E. (2008). Overcoming barriers to the implementation of alternative fuels for road transport in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 16, 577-590.

- Surisetty, V.R., Dalai, A.K., & Kozinski, J. (2011). Alcohols as alternative fuels: An overview. *Applied Catalysis A: General*, 404, 1-11.
- U.S. Department of Energy. (2014). Smith Newton vehicle performance evaluation – cumulative. Opgevraagd op 22 maart, 2014, via <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/fleetttest/pdfs/61238.pdf>.
- van Rijnsoever, F.J., Hagen, P., & Willems, M. (2013). Preferences for alternative fuel vehicles by Dutch local governments. *Transportation Research Part D*, 20, 15-20.
- van Vliet, O., Brouwer, A.S., Kuramochi, T., van den Broek, M., & Faaij, A. (2011). Energy use, cost and CO2 emissions of electric cars. *Journal of Power Sources*, 196, 2298-2310.
- Wang, Y.-W. (2011). Locating flow-recharging stations at tourist destinations to serve recreational travelers. *International Journal of Sustainable Transportation*, 5, 153-171.
- Wang, Y.-W., & Lin, C.-C. (2009). Locating road-vehicle refueling stations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46, 791-801.
- Wang, Y., & Lin, C. (2013). Locating multiple types of recharging stations for battery-powered electric vehicle transport. *Transportation research Part E*, 58, 76-87.
- Xi, X., Sioshansi, R., & Marano, V. (2013). Simulation-optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D*, 22, 60-69.
- Yang, S., Yao, J., Kang, T., & Zhu, X. (2014). Dynamic operation model of the battery swapping station for EV (electric vehicle) in electricity market. *Energy*, 65, 544-549
- Yeh, S. (2007). An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles. *Energy Policy*, 35, 5865-5875.





## Bijlagen

### **Bijlage 1: Euclidische afstandsmatrix en reistijdmatrix replicatie 1**

Depot	Depot	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	F1	F2	F3	F4
Depot	0	24,19	85,33	33,84	85,45	94,54	6,71	55,61	45,31	63,07	82,76	42,38	62,24	104,00	108,75
K1		0	81,50	37,34	71,51	70,41	30,00	71,03	45,54	63,57	60,21	57,38	54,01	104,05	85,96
K2			0	116,07	36,77	102,83	83,68	63,25	126,02	24,19	77,47	127,35	28,79	25,61	92,61
K3				0	108,85	95,52	38,91	88,32	11,66	95,34	92,66	26,25	90,09	136,53	116,93
K4					0	68,88	86,68	86,98	116,48	46,53	43,60	126,76	27,29	60,46	55,90
K5						0	99,98	129,84	96,21	101,07	25,46	121,24	78,89	128,08	28,64
K6							0	49,65	50,54	60,67	87,09	43,74	62,27	101,12	113,09
K7								0	99,98	41,59	109,37	86,35	60,42	68,48	133,00
K8									0	105,93	96,40	31,06	99,32	147,11	119,55
K9										0	77,25	104,39	22,80	41,19	97,67
K10											0	116,39	54,63	102,65	26,00
F1												0	104,55	144,59	141,40
F2													0	53,71	74,97
F3														0	116,11
F4															0

Tabel 33: Euclidische afstandsmatrix replicatie 1

Depot	0	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	F1	F2	F3	F4
Depot	0	22,33	78,77	31,23	78,87	87,27	6,19	51,33	41,82	58,22	76,40	39,12	57,45	96,00	100,38
K1		0	75,23	34,46	66,01	64,99	27,69	65,56	42,04	58,68	55,58	52,97	49,85	96,04	79,35
K2			0	107,14	33,94	94,92	77,24	58,39	116,32	22,33	71,51	117,55	26,58	23,64	85,49
K3				0	100,48	88,18	35,92	81,53	10,76	88,00	85,53	24,23	83,16	126,03	107,94
K4					0	63,59	80,02	80,29	107,52	42,95	40,25	117,01	25,20	55,81	51,60
K5						0	92,29	119,85	88,81	93,30	23,50	111,91	72,82	118,23	26,43
K6							0	45,83	46,65	56,00	80,39	40,37	57,48	93,34	104,39
K7								0	92,29	38,39	100,96	79,71	55,77	63,21	122,77
K8									0	97,78	88,98	28,67	91,68	135,79	110,36
K9										0	71,31	96,36	21,05	38,03	90,16
K10											0	107,43	50,42	94,75	24,00
F1												0	96,50	133,46	130,52
F2													0	49,58	69,20
F3														0	107,18
F4															0

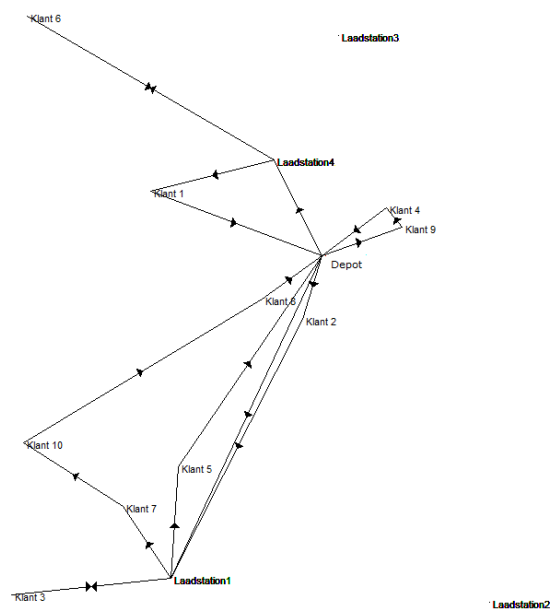
Tabel 34: Reistijden replicatie 1 (65 km/u)

## Bijlage 2: Gegevens replicaties scenario 1

Gemiddelde snelheid 65 km/u

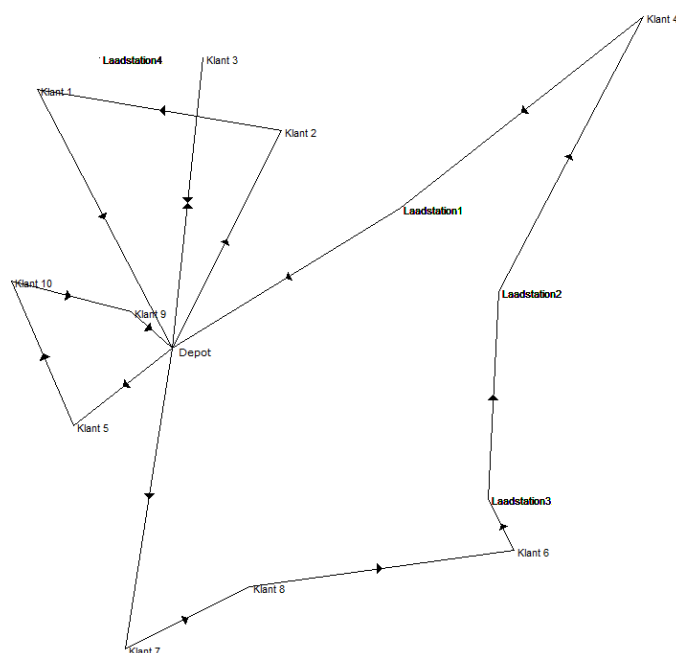
Replicatie 2	$(x, y)$	Tijdvenster $[e_i, l_i]$	Vraag $q_i$	Dienstverleningstijd $s_i$ (in min)
Depot	(99,90)	[08.00; 19.00]		
<b>Klanten</b>				
I <sub>1</sub>	(56,106)	[15.45; 17.00]	2245	30
I <sub>2</sub>	(94,74)	[09.25; 11.05]	2121	30
I <sub>3</sub>	(21,5)	[08.45; 13.45]	3363	30
I <sub>4</sub>	(115,102)	[13.55; 15.10]	1479	30
I <sub>5</sub>	(63,37)	[15.30; 17.00]	1520	30
I <sub>6</sub>	(25,150)	[10.35; 12.30]	1442	30
I <sub>7</sub>	(49,27)	[14.05; 16.30]	413	30
I <sub>8</sub>	(84,79)	[15.05; 16.40]	59	30
I <sub>9</sub>	(119,97)	[10.20; 15.05]	154	30
I <sub>10</sub>	(24,43)	[11.40; 16.25]	2204	30
<b>Laadstations</b>				
F <sub>1</sub>	(61,9)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>2</sub>	(141,3)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>3</sub>	(103,145)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>4</sub>	(87,114)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>5</sub> (d.i. het depot)	(99,90)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij

Scenario 1 - Replicatie 2: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.9 → Klant 3 → Laadstation 1.2 → Klant 5 → Depot	262,01
2	Depot → Laadstation 4.6 → Klant 6 → Laadstation 4.7 → Klant 1 → Depot	248,11
3	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.7 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot	229,54
4	Depot → Klant 9 → Klant 4 → Depot	47,59
<b>Totaal</b>		<b>787,25*</b>



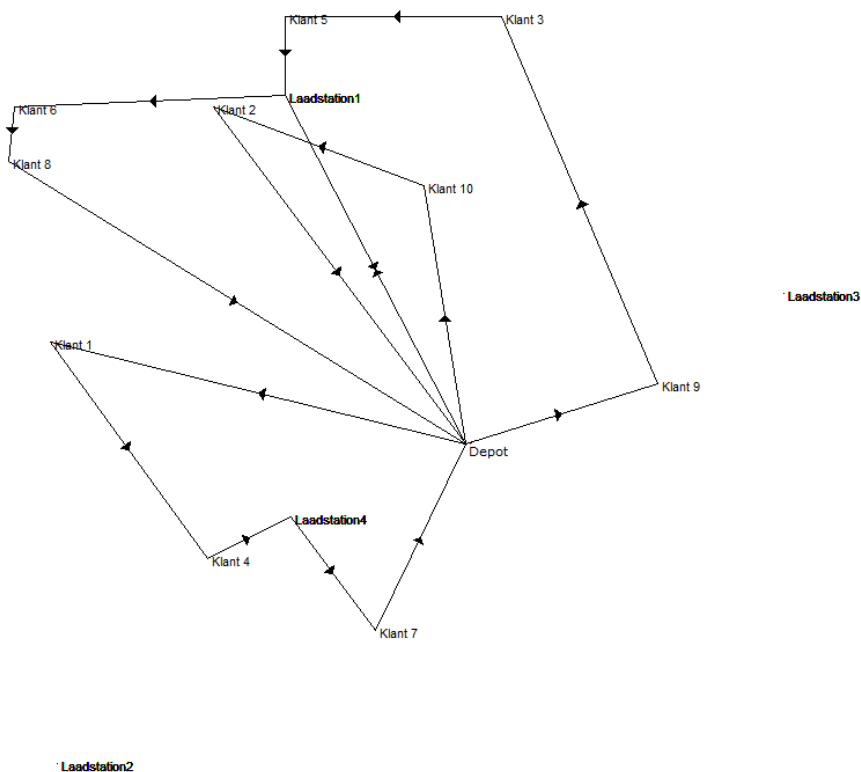
Replicatie 3				
	$(x, y)$	Tijdvenster $[e_i, l_i]$	Vraag $q_i$	Dienstverleningstijd $s_i$ (in min)
Depot	(52,78)	[08.00; 19.00]		
<b>Klanten</b>				
I <sub>1</sub>	(26,128)	[15.10; 16.15]	276	30
I <sub>2</sub>	(73,120)	[08.00; 16.50]	3798	30
I <sub>3</sub>	(58,134)	[10.25; 15.50]	4932	30
I <sub>4</sub>	(143,142)	[13.55; 15.10]	2652	30
I <sub>5</sub>	(33,63)	[10.50; 13.05]	1448	30
I <sub>6</sub>	(118,39)	[11.40; 14.05]	725	30
I <sub>7</sub>	(43,20)	[09.30; 11.00]	799	30
I <sub>8</sub>	(67,32)	[11.15; 13.30]	15	30
I <sub>9</sub>	(44,85)	[11.10; 15.00]	254	30
I <sub>10</sub>	(21,91)	[13.50; 15.40]	101	30
<b>Laadstations</b>				
F <sub>1</sub>	(96,105)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>2</sub>	(115,89)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>3</sub>	(113,49)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>4</sub>	(38,134)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>5</sub> (d.i. het depot)	(52,78)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij

Scenario 1 - Replicatie 3: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Klant 1 → Depot	151
2	Depot → Klant 3 → Depot	112,64
3	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 9 → Depot	89,07
4	Depot → Klant 7 → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 3.9 → Laadstation 2.7 → Klant 4 → Laadstation 1.10 → Depot	359,61
<b>Totaal</b>		<b>712,32</b>



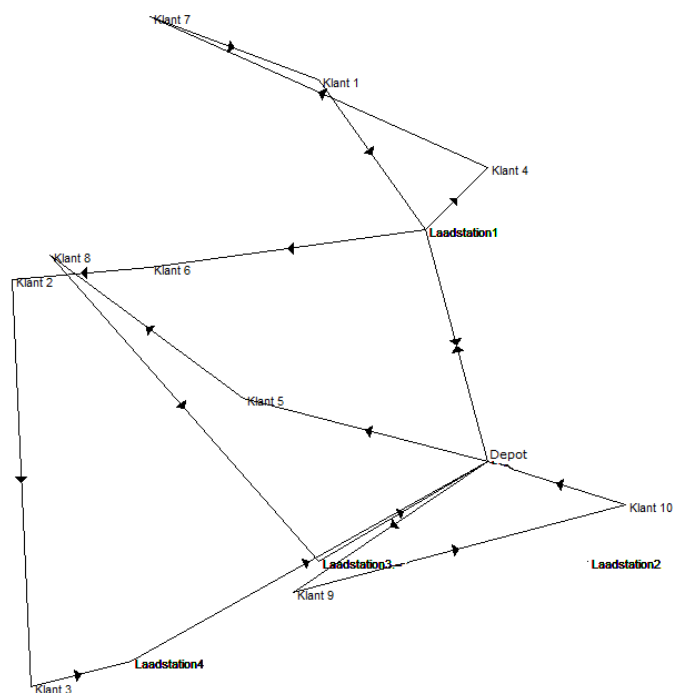
Replicatie 4				
	$(x, y)$	Tijdvenster $[e_i, l_i]$	Vraag $q_i$	Dienstverleningstijd $s_i$ (in min)
Depot	(91,58)	[08.00; 19.00]		
<b>Klanten</b>				
I <sub>1</sub>	(22,75)	[09.00; 14.00]	4298	30
I <sub>2</sub>	(49,114)	[14.35; 17.00]	2557	30
I <sub>3</sub>	(97,129)	[09.40; 15.00]	2127	30
I <sub>4</sub>	(48,39)	[12.10; 14.10]	626	30
I <sub>5</sub>	(61,129)	[14.45; 16.10]	2559	30
I <sub>6</sub>	(16,114)	[09.10; 13.05]	681	30
I <sub>7</sub>	(76,27)	[14.05; 16.20]	12	30
I <sub>8</sub>	(15,105)	[10.55; 13.10]	1763	30
I <sub>9</sub>	(123,68)	[10.10; 16.40]	166	30
I <sub>10</sub>	(84,101)	[08.05; 11.35]	211	30
<b>Laadstations</b>				
F <sub>1</sub>	(61,116)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>2</sub>	(23,5)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>3</sub>	(144,83)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>4</sub>	(62,46)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>5</sub> (d.i. het depot)	(91,58)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij

Scenario 1 - Replicatie 4: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.9 → Klant 7 → Depot	189,16
2	Depot → Klant 10 → Klant 2 → Depot	150,91
3	Depot → Laadstation 1.9 → Klant 6 → Klant 8 → Depot	208,76
4	Depot → Klant 9 → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.5 → Depot	214,14
<b>Totaal</b>		<b>762,97</b>



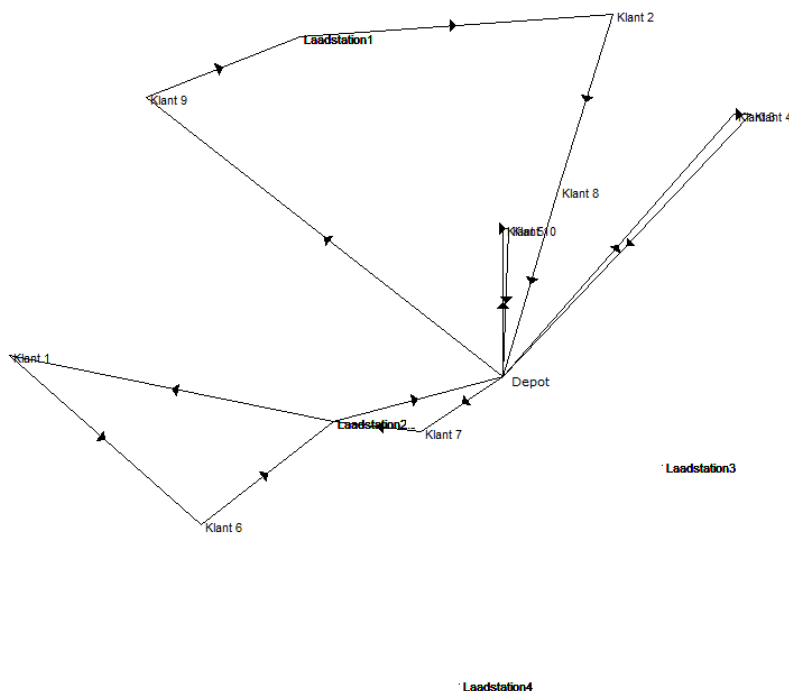
Replicatie 5				
	(x, y)	Tijdvenster $[e_i, l_i]$	Vraag $q_i$	Dienstverleningstijd $s_i$ (in min)
Depot	(88,41)	[08.00; 19.00]		
<b>Klanten</b>				
I <sub>1</sub>	(61,102)	[14.55; 16.35]	2009	30
I <sub>2</sub>	(12,70)	[14.30; 15.30]	2289	30
I <sub>3</sub>	(15,5)	[15.45; 16.50]	758	30
I <sub>4</sub>	(88,88)	[08.45; 11.00]	332	30
I <sub>5</sub>	(49,51)	[14.05; 15.40]	1148	30
I <sub>6</sub>	(34,72)	[11.25; 13.40]	1225	30
I <sub>7</sub>	(34,112)	[13.50; 15.05]	1795	30
I <sub>8</sub>	(18,74)	[09.15; 17.00]	3552	30
I <sub>9</sub>	(57,20)	[11.05; 15.10]	1401	30
I <sub>10</sub>	(110,34)	[14.05; 16.20]	491	30
<b>Laadstations</b>				
F <sub>1</sub>	(78,78)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>2</sub>	(104,25)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>3</sub>	(61,25)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>4</sub>	(31,9)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>5</sub> (d.i. het depot)	(88,41)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij

Scenario 1 - Replicatie 5: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 6 → Klant 2 → Klant 3 → Laadstation 4.9 → Depot	251,76
2	Depot → Laadstation 1.10 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.1 → Depot	208,09
3	Depot → Klant 5 → Klant 8 → Laadstation 3.3 → Depot	175,43
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot	115,35
<b>Totaal</b>		<b>750,63</b>



Replicatie 6				
	$(x, y)$	Tijdvenster $[e_i, l_i]$	Vraag $q_i$	Dienstverleningstijd $s_i$ (in min)
Depot	(97,67)	[08.00; 19.00]		
<b>Klanten</b>				
I <sub>1</sub>	(7,71)	[10.35; 15.15]	729	30
I <sub>2</sub>	(117,133)	[12.45; 16.00]	1410	30
I <sub>3</sub>	(139,115)	[12.25; 14.20]	2234	30
I <sub>4</sub>	(142,115)	[14.50; 16.05]	1440	30
I <sub>5</sub>	(97,94)	[11.00; 15.05]	1763	30
I <sub>6</sub>	(42,40)	[15.25; 16.40]	1370	30
I <sub>7</sub>	(82,57)	[12.05; 16.15]	2121	30
I <sub>8</sub>	(107,101)	[08.50; 17.00]	479	30
I <sub>9</sub>	(32,18)	[08.00; 12.55]	3037	30
I <sub>10</sub>	(98,94)	[09.50; 16.30]	417	30
<b>Laadstations</b>				
F <sub>1</sub>	(60,129)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>2</sub>	(66,59)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>3</sub>	(126,51)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>4</sub>	(89,11)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>5</sub> (d.i. het depot)	(97,67)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij

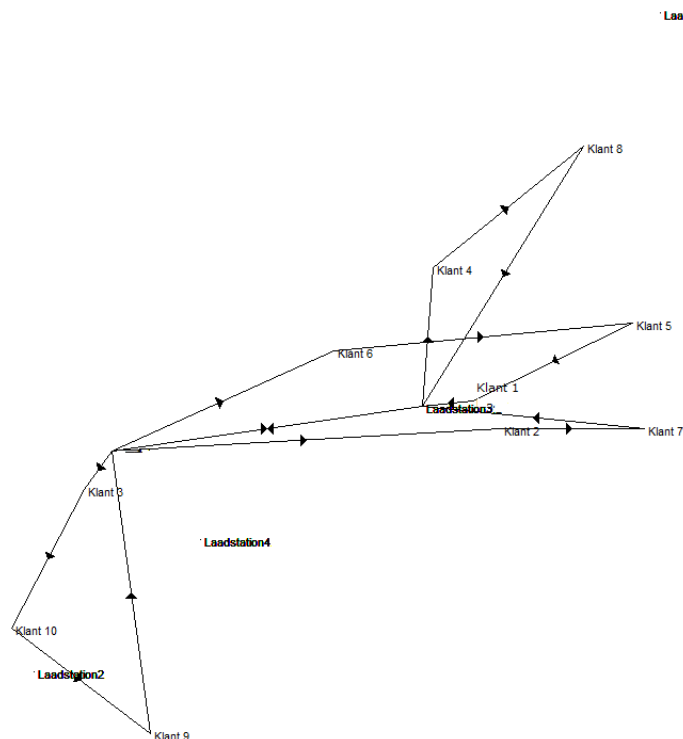
Scenario 1 - Replicatie 6: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
2	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Depot	55,02
3	Depot → Klant 7 → Laadstation 2.8 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 2.3 → Depot	203,74
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.3 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	238,81
<b>Totaal</b>		<b>630,15*</b>





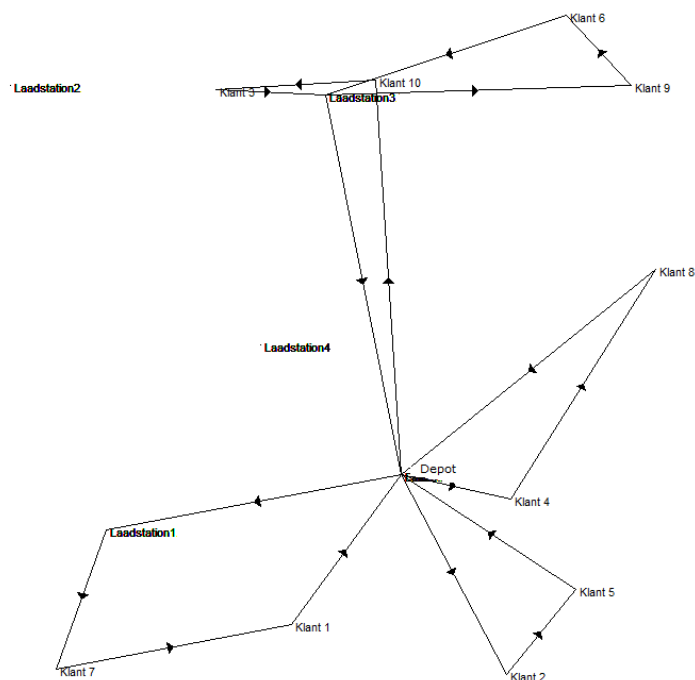
Replicatie 7				
	$(x, y)$	Tijdvenster $[e_i, l_i]$	Vraag $q_i$	Dienstverleningstijd $s_i$ (in min)
Depot	(38,51)	[08.00; 19.00]		
<b>Klanten</b>				
I <sub>1</sub>	(103,60)	[12.50; 16.40]	761	30
I <sub>2</sub>	(108,55)	[11.55; 13.00]	1688	30
I <sub>3</sub>	(33,44)	[12.55; 13.55]	930	30
I <sub>4</sub>	(96,84)	[11.00; 15.10]	19	30
I <sub>5</sub>	(132,74)	[13.10; 15.15]	2496	30
I <sub>6</sub>	(78,69)	[11.45; 15.35]	1181	30
I <sub>7</sub>	(134,55)	[15.40; 16.45]	2861	30
I <sub>8</sub>	(123,106)	[11.25; 16.55]	4485	30
I <sub>9</sub>	(45,0)	[09.15; 15.30]	371	30
I <sub>10</sub>	(20,19)	[12.30; 15.20]	208	30
<b>Laadstations</b>				
F <sub>1</sub>	(137,130)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>2</sub>	(24,11)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>3</sub>	(94,59)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>4</sub>	(54,35)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>5</sub> (d.i. het depot)	(38,51)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij

Scenario 1 - Replicatie 7: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.8 → Klant 4 → Klant 8 → Laadstation 3.6 → Depot	228,28
2	Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.10 → Depot	192,88
3	Depot → Klant 6 → Klant 5 → Klant 1 → Laadstation 3.2 → Depot	195,92
4	Depot → Klant 3 → Klant 10 → Klant 9 → Depot	119,66
<b>Totaal</b>		<b>736,74</b>



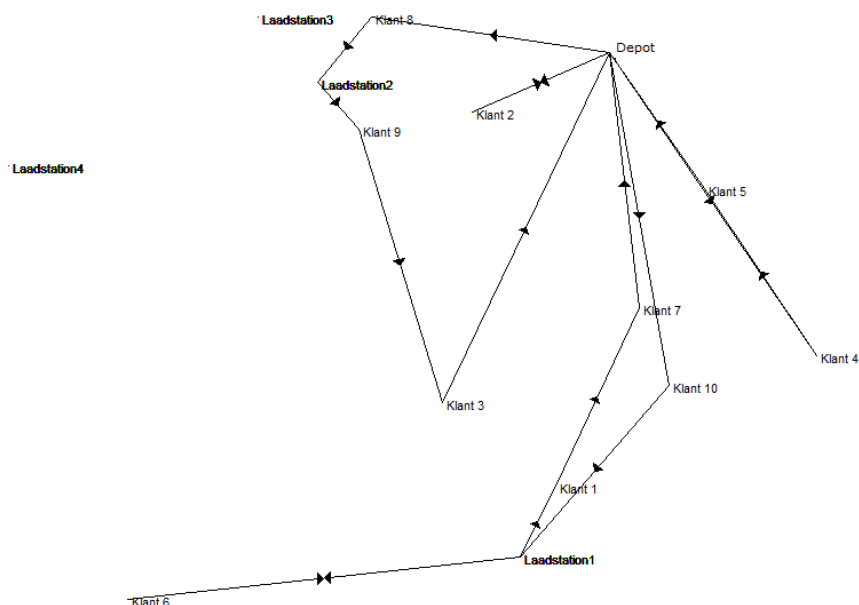
Replicatie 8				
	$(x, y)$	Tijdvenster $[e_i, l_i]$	Vraag $q_i$	Dienstverleningstijd $s_i$ (in min)
Depot	(87,42)	[08.00; 19.00]		
<b>Klanten</b>				
I <sub>1</sub>	(65,12)	[14.40; 16.50]	815	30
I <sub>2</sub>	(108,2)	[14.40; 16.15]	1008	30
I <sub>3</sub>	(50,119)	[10.15; 12.05]	892	30
I <sub>4</sub>	(109,37)	[13.00; 14.50]	1008	30
I <sub>5</sub>	(122,19)	[15.30; 16.40]	2296	30
I <sub>6</sub>	(120,134)	[13.05; 16.30]	2415	30
I <sub>7</sub>	(18,3)	[09.55; 12.30]	3375	30
I <sub>8</sub>	(138,83)	[13.35; 15.35]	3031	30
I <sub>9</sub>	(133,120)	[09.35; 12.45]	63	30
I <sub>10</sub>	(82,121)	[09.10; 13.00]	97	30
<b>Laadstations</b>				
F <sub>1</sub>	(28,31)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>2</sub>	(9,120)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>3</sub>	(72,118)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>4</sub>	(59,68)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>5</sub> (d.i. het depot)	(87,42)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij

Scenario 1 - Replicatie 8: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.10 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Klant 2 → Klant 5 → Depot	109,08
3	Depot → Klant 4 → Klant 8 → Depot	142,38
4	Depot → Klant 10 → Klant 3 → Laadstation 3.1 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.10 → Depot	341,44
<b>Totaal</b>		<b>767,70*</b>



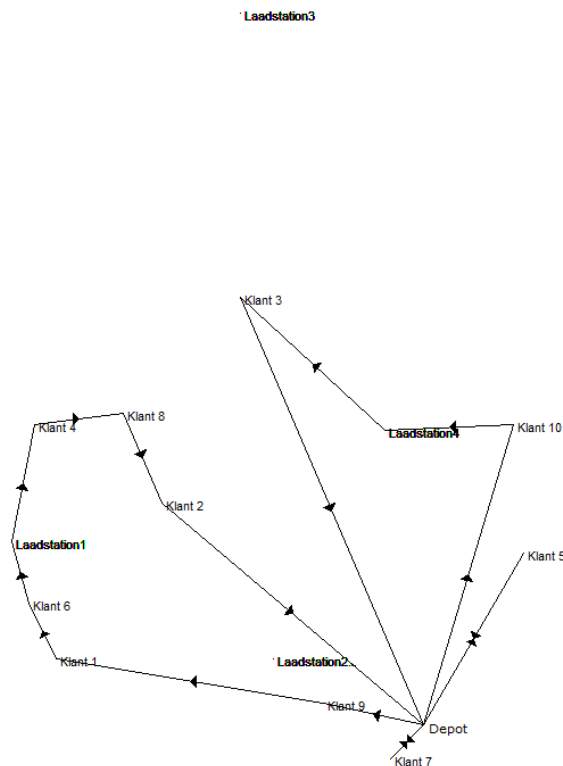
Replicatie 9				
	$(x, y)$	Tijdvenster $[e_i, l_i]$	Vraag $q_i$	Dienstverleningstijd $s_i$ (in min)
Depot	(105,101)	[08.00; 19.00]		
<b>Klanten</b>				
I <sub>1</sub>	(96,28)	[12.10; 15.35]	773	30
I <sub>2</sub>	(82,91)	[10.30; 16.45]	2378	30
I <sub>3</sub>	(77,42)	[11.00; 16.10]	3240	30
I <sub>4</sub>	(140,50)	[12.40; 15.20]	2318	30
I <sub>5</sub>	(121,78)	[14.45; 16.05]	1043	30
I <sub>6</sub>	(24,9)	[08.05; 15.40]	1577	30
I <sub>7</sub>	(110,58)	[14.10; 15.50]	1589	30
I <sub>8</sub>	(65,107)	[12.35; 14.20]	421	30
I <sub>9</sub>	(63,88)	[13.25; 16.40]	759	30
I <sub>10</sub>	(115,45)	[09.40; 15.40]	902	30
<b>Laadstations</b>				
F <sub>1</sub>	(90,16)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>2</sub>	(56,96)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>3</sub>	(46,107)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>4</sub>	(4,82)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>5</sub> (d.i. het depot)	(105,101)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij

Scenario 1 - Replicatie 9: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Depot	50,16
2	Depot → Klant 4 → Klant 5 → Depot	123,71
3	Depot → Klant 8 → Laadstation 2.4 → Klant 9 → Klant 3 → Depot	178,69
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 1.2 → Klant 6 → Laadstation 1.4 → Klant 1 → Klant 7 → Depot	317,74
<b>Totaal</b>		<b>670,30</b>



Replicatie 10				
	$(x, y)$	Tijdvenster $[e_i, l_i]$	Vraag $q_i$	Dienstverleningstijd $s_i$ (in min)
Depot	(131,21)	[08.00; 19.00]		
<b>Klanten</b>				
I <sub>1</sub>	(65,33)	[12.20; 15.40]	297	30
I <sub>2</sub>	(84,61)	[15.40; 16.50]	1129	30
I <sub>3</sub>	(98,98)	[10.10; 16.35]	3134	30
I <sub>4</sub>	(61,75)	[15.05; 16.30]	96	30
I <sub>5</sub>	(149,52)	[09.50; 13.35]	2540	30
I <sub>6</sub>	(60,43)	[10.30; 15.20]	1071	30
I <sub>7</sub>	(125,15)	[08.55; 12.20]	4082	30
I <sub>8</sub>	(77,77)	[15.30; 16.40]	207	30
I <sub>9</sub>	(113,25)	[08.05; 12.35]	1056	30
I <sub>10</sub>	(147,75)	[08.10; 13.00]	1388	30
<b>Laadstations</b>				
F <sub>1</sub>	(57,54)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>2</sub>	(104,33)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>3</sub>	(98,149)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>4</sub>	(124,74)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij
F <sub>5</sub> (d.i. het depot)	(131,21)	[08.00; 19.00]		Afhankelijk van resterende batterij

Scenario 1 - Replicatie 10: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
2	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
3	Depot → Klant 9 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 1.2 → Klant 4 → Klant 8 → Klant 2 → Depot	206,36
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.1 → Klant 3 → Depot	198,49
<b>Totaal</b>		<b>493,53*</b>



Gemiddelde snelheid 50 km/u

Scenario 1 - Replicatie 1: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.4 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot	115,23
3	Depot → Klant 5 → Laadstation 4.5 → Klant 10 → Klant 4 → Laadstation 2.8 → Klant 9 → Depot	305,94
4	Depot → Klant 6 → Klant 7 → Depot	111,97
<b>Totaal</b>		<b>709,50</b>

Scenario 1 - Replicatie 2: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.10 → Klant 3 → Laadstation 1.8 → Klant 5 → Depot	262,01
2	Depot → Laadstation 4.3 → Klant 6 → Laadstation 4.2 → Klant 1 → Depot	248,11
3	Depot → Klant 2 → Klant 10 → Laadstation 1.6 → Klant 7 → Klant 8 → Depot	246,48
4	Depot → Klant 9 → Klant 4 → Depot	47,59
<b>Totaal</b>		<b>804,19*</b>

Scenario 1 - Replicatie 3: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 6 → Laadstation 2.6 → Klant 4 → Laadstation 1.1 → Depot	298,13
2	Depot → Klant 3 → Depot	112,64
3	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 9 → Depot	89,07
4	Depot → Klant 7 → Klant 8 → Laadstation 5.8 → Klant 2 → Klant 1 → Depot	284,90
<b>Totaal</b>		<b>784,74</b>

Scenario 1 - Replicatie 4: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.3 → Klant 7 → Depot	189,16
2	Depot → Klant 10 → Klant 2 → Depot	150,91
3	Depot → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 1.4 → Depot	208,76
4	Depot → Klant 9 → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.3 → Depot	214,14
<b>Totaal</b>		<b>762,97</b>

Scenario 1 - Replicatie 5: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 6 → Klant 8 → Laadstation 3.1 → Depot	174,96
2	Depot → Laadstation 1.1 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.9 → Depot	208,09
3	Depot → Klant 5 → Klant 2 → Laadstation 3.9 → Depot	179,76
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 4.10 → Klant 3 → Depot	163,55
5	Depot → Klant 10 → Depot	46,18
<b>Totaal</b>		<b>772,54</b>

Scenario 1 - Replicatie 6: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
2	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Depot	55,02
3	Depot → Klant 7 → Laadstation 2.5 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 2.4 → Depot	203,74
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.9 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	238,81
<b>Totaal</b>		<b>630,15*</b>

Scenario 1 - Replicatie 7: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.10 → Klant 4 → Klant 8 → Laadstation 3.9 → Depot	228,28
2	Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.2 → Depot	192,88
3	Depot → Klant 6 → Klant 5 → Klant 1 → Laadstation 3.1 → Depot	195,92
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot	119,66
<b>Totaal</b>		<b>736,74</b>

Scenario 1 - Replicatie 8: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Klant 3 → Laadstation 3.7 → Klant 8 → Depot	247,60
3	Depot → Klant 4 → Klant 2 → Klant 5 → Depot	121,47
4	Depot → Laadstation 3.5 → Klant 10 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.10 → Depot	286,09
<b>Totaal</b>		<b>829,96*</b>

Scenario 1 - Replicatie 9: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Klant 9 → Klant 8 → Depot	103,87
2	Depot → Klant 4 → Klant 5 → Depot	123,71
3	Depot → Klant 7 → Klant 3 → Depot	145,27
4	Depot → Klant 10 → Klant 1 → Laadstation 1.2 → Klant 6 → Laadstation 1.10 → Depot	314,86
<b>Totaal</b>		<b>687,71</b>

Scenario 1 - Replicatie 10: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
2	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
3	Depot → Klant 9 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 1.3 → Klant 4 → Klant 8 → Klant 2 → Depot	206,36
4	Depot → Klant 3 → Laadstation 4.1 → Klant 10 → Depot	198,49
<b>Totaal</b>		<b>493,53</b>

Gemiddelde snelheid 80 km/u

Scenario 1 - Replicatie 1: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.7 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 3 → Klant 8 → Depot	90,81
3	Depot → Klant 1 → Klant 5 → Laadstation 4.3 → Klant 10 → Klant 4 → Klant 9 → Laadstation 2.3 → Depot	324,41
4	Depot → Klant 6 → Klant 7 → Depot	111,97
<b>Totaal</b>		<b>703,55*</b>

Scenario 1 - Replicatie 2: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.6 → Klant 3 → Laadstation 1.2 → Klant 5 → Depot	262,01
2	Depot → Laadstation 4.2 → Klant 6 → Laadstation 4.5 → Klant 1 → Depot	248,11
3	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.10 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot	229,54
4	Depot → Klant 4 → Klant 9 → Depot	47,59
<b>Totaal</b>		<b>787,25*</b>

Scenario 1 - Replicatie 3: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 1 → Laadstation 4.3 → Klant 2 → Depot	169,82
2	Depot → Klant 3 → Depot	112,64
3	Depot → Klant 5 → Depot	48,42
4	Depot → Klant 7 → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 3.3 → Laadstation 2.6 → Klant 4 → Laadstation 1.10 → Depot	359,61
<b>Totaal</b>		<b>690,49</b>

Scenario 1 - Replicatie 4: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.5 → Klant 7 → Depot	189,16
2	Depot → Klant 2 → Depot	140
3	Depot → Klant 10 → Laadstation 1.4 → Klant 6 → Klant 8 → Depot	214,49
4	Depot → Klant 9 → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.6 → Depot	214,14
<b>Totaal</b>		<b>757,79</b>

Scenario 1 - Replicatie 5: enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 6 → Klant 2 → Laadstation 4.1 → Klant 3 → Depot	246,13
2	Depot → Laadstation 1.9 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.8 → Depot	208,09
3	Depot → Klant 5 → Klant 8 → Laadstation 3.6 → Depot	175,43
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot	115,35
<b>Totaal</b>		<b>745</b>

<b>Scenario 1 - Replicatie 6: enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot</i>	132,58
2	<i>Depot → Klant 5 → Klant 10 → Depot</i>	55,02
3	<i>Depot → Klant 7 → Laadstation 2.1 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 2.4 → Depot</i>	203,74
4	<i>Depot → Klant 9 → Laadstation 1.3 → Klant 2 → Klant 8 → Depot</i>	238,81
<b>Totaal</b>		<b>630,15*</b>

<b>Scenario 1 - Replicatie 7: enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 3.9 → Klant 4 → Klant 8 → Laadstation 3.4 → Depot</i>	228,28
2	<i>Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.10 → Depot</i>	192,88
3	<i>Depot → Klant 6 → Klant 5 → Klant 1 → Laadstation 3.7 → Depot</i>	195,92
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot</i>	119,66
<b>Totaal</b>		<b>736,74</b>

<b>Scenario 1 - Replicatie 8: enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.10 → Klant 7 → Klant 1 → Depot</i>	174,80
2	<i>Depot → Klant 2 → Klant 5 → Depot</i>	109,08
3	<i>Depot → Klant 8 → Klant 4 → Depot</i>	142,38
4	<i>Depot → Laadstation 4.1 → Klant 3 → Laadstation 3.9 → Klant 10 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.2 → Depot</i>	320,64
<b>Totaal</b>		<b>746,90*</b>

<b>Scenario 1 - Replicatie 9: enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 2 → Klant 9 → Klant 8 → Depot</i>	103,87
2	<i>Depot → Klant 4 → Klant 5 → Depot</i>	123,71
3	<i>Depot → Klant 3 → Depot</i>	130,62
4	<i>Depot → Laadstation 1.2 → Klant 6 → Laadstation 1.5 → Klant 1 → Klant 10 → Klant 7 → Depot</i>	315,19
<b>Totaal</b>		<b>673,39</b>

<b>Scenario 1 - Replicatie 10: enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 5 → Depot</i>	71,70
2	<i>Depot → Klant 7 → Depot</i>	16,98
3	<i>Depot → Klant 9 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 1.5 → Klant 4 → Klant 8 → Klant 2 → Depot</i>	206,36
4	<i>Depot → Klant 3 → Laadstation 4.4 → Klant 10 → Depot</i>	198,49
<b>Totaal</b>		<b>493,53</b>



### **Bijlage 3: Gegevens replicaties scenario 2.1**

Gemiddelde snelheid 65 km/u

<b>Scenario 2.1 - Replicatie 2: twee types laadstation met snellaadstation op het depot</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.10 → Klant 3 → Laadstation 1.3 → Klant 5 → Depot</i>	262,01
2	<i>Depot → Laadstation 4.6 → Klant 6 → Laadstation 4.10 → Klant 1 → Depot</i>	248,11
3	<i>Depot → Klant 2 → Laadstation 1.6 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot</i>	229,54
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 4 → Depot</i>	47,59
<b>Totaal</b>		<b>787,25*</b>

<b>Scenario 2.1 - Replicatie 3: twee types laadstation met snellaadstation op het depot</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.2 → Klant 4 → Laadstation 1.5 → Depot</i>	222,88
2	<i>Depot → Klant 1 → Klant 2 → Depot</i>	151
3	<i>Depot → Klant 3 → Depot</i>	112,64
4	<i>Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 9 → Depot</i>	89,07
5	<i>Depot → Klant 7 → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 3.10 → Depot</i>	215,72
<b>Totaal</b>		<b>791,31</b>

<b>Scenario 2.1 - Replicatie 4: twee types laadstation met snellaadstation op het depot</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.3 → Klant 6 → Klant 8 → Depot</i>	208,76
2	<i>Depot → Laadstation 4.5 → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.10 → Klant 7 → Depot</i>	198,89
3	<i>Depot → Klant 9 → Klant 3 → Laadstation 1.7 → Klant 2 → Depot</i>	220,29
4	<i>Depot → Klant 10 → Klant 5 → Laadstation 1.1 → Depot</i>	158,11
<b>Totaal</b>		<b>786,05</b>

<b>Scenario 2.1 - Replicatie 5: twee types laadstation met snellaadstation op het depot</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.3 → Klant 6 → Klant 2 → Klant 5 → Depot</i>	186,68
2	<i>Depot → Klant 4 → Laadstation 1.2 → Klant 7 → Klant 1 → Depot</i>	212,25
3	<i>Depot → Klant 8 → Laadstation 4.10 → Klant 3 → Depot</i>	241,56
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot</i>	115,35
<b>Totaal</b>		<b>755,84*</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 6: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.10 → Klant 1 → Klant 9 → Laadstation 1.2 → Depot	247,75
2	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
3	Depot → Klant 7 → Klant 6 → Depot	122,76
4	Depot → Klant 8 → Klant 2 → Klant 10 → Klant 5 → Depot	140,35
<b>Totaal</b>		<b>643,44*</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 7: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.8 → Klant 2 → Klant 7 → Depot	193,21
2	Depot → Laadstation 3.10 → Klant 8 → Klant 4 → Laadstation 3.2 → Depot	228,28
3	Depot → Klant 3 → Klant 10 → Klant 9 → Depot	119,66
4	Depot → Klant 6 → Laadstation 3.5 → Klant 5 → Klant 1 → Depot	201,40
<b>Totaal</b>		<b>742,55</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 8: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Laadstation 3.9 → Klant 9 → Laadstation 4.1 → Depot	267,15
3	Depot → Klant 2 → Klant 5 → Depot	109,08
4	Depot → Klant 3 → Klant 10 → Laadstation 3.10 → Klant 6 → Depot	276,27
5	Depot → Klant 4 → Klant 8 → Depot	142,38
<b>Totaal</b>		<b>969,68</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 9: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.5 → Klant 6 → Laadstation 1.4 → Depot	305,36
2	Depot → Klant 4 → Klant 7 → Klant 5 → Depot	143,75
3	Depot → Klant 8 → Klant 9 → Klant 2 → Depot	103,87
4	Depot → Klant 10 → Klant 1 → Laadstation 1.1 → Klant 3 → Depot	190,19
<b>Totaal</b>		<b>743,17*</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 10: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
2	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
3	Depot → Klant 9 → Laadstation 2.6 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 1.1 → Klant 4 → Klant 2 → Depot	202,09
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.9 → Klant 3 → Klant 8 → Depot	222,21
<b>Totaal</b>		<b>512,98*</b>

Gemiddelde snelheid 50 km/u

Scenario 2.1 – Replicatie 1: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.8 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 6 → Klant 3 → Klant 8 → Depot	102,59
3	Depot → Laadstation 2.10 → Klant 4 → Klant 10 → Laadstation 4.4 → Depot	267,88
4	Depot → Klant 1 → Laadstation 2.2 → Klant 9 → Klant 7 → Depot	198,20
5	Depot → Klant 5 → Laadstation 4.8 → Depot	231,93
<b>Totaal</b>		<b>976,96</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 2: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.10 → Klant 3 → Laadstation 1.6 → Klant 5 → Depot	262,01
2	Depot → Laadstation 4.3 → Klant 6 → Laadstation 4.4 → Depot	197,04
3	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.1 → Klant 7 → Klant 10 → Depot	229,48
4	Depot → Klant 9 → Klant 4 → Klant 8 → Klant 1 → Depot	150,97
<b>Totaal</b>		<b>839,50*</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 3: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 4 → Laadstation 1.1 → Depot	222,88
2	Depot → Klant 2 → Klant 1 → Depot	151
3	Depot → Klant 3 → Depot	112,64
4	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 9 → Depot	89,07
5	Depot → Klant 7 → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 3.3 → Depot	215,72
<b>Totaal</b>		<b>791,31</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 4: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 6 → Klant 8 → Laadstation 1.3 → Depot	215,26
2	Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.1 → Depot	162,50
3	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.2 → Klant 2 → Depot	194,11
4	Depot → Klant 10 → Klant 3 → Laadstation 1.8 → Klant 5 → Depot	202,80
5	Depot → Klant 7 → Depot	68,88
<b>Totaal</b>		<b>843,55</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 5: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
	Geen oplossing gevonden	
<b>Totaal</b>		

Scenario 2.1 - Replicatie 6: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.7 → Klant 1 → Klant 9 → Laadstation 1.4 → Depot	247,75
2	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
3	Depot → Klant 7 → Klant 6 → Depot	122,76
4	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	140,35
<b>Totaal</b>		<b>643,44*</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 7: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.10 → Klant 2 → Klant 5 → Depot	198,51
2	Depot → Laadstation 3.4 → Klant 8 → Klant 4 → Laadstation 3.9 → Depot	228,28
3	Depot → Laadstation 2.1 → Klant 9 → Klant 10 → Laadstation 2.2 → Depot	148,81
4	Depot → Klant 6 → Laadstation 3.7 → Klant 1 → Klant 7 → Depot	199,27
5	Depot → Klant 3 → Depot	17,20
<b>Totaal</b>		<b>792,07</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 8: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
	<i>Geen oplossing gevonden</i>	
<b>Totaal</b>		

Scenario 2.1 - Replicatie 9: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
	<i>Geen oplossing gevonden</i>	
<b>Totaal</b>		

Scenario 2.1 - Replicatie 10: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Depot	115,26
2	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
3	Depot → Klant 9 → Laadstation 2.1 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 1.9 → Klant 4 → Klant 8 → Depot	207,35
4	Depot → Laadstation 4.3 → Klant 3 → Klant 2 → Depot	190,12
<b>Totaal</b>		<b>529,71</b>

Gemiddelde snelheid 80 km/u

Scenario 2.1 – Replicatie 1: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Laadstation 2.6 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot	115,23
3	Depot → Klant 6 → Klant 4 → Laadstation 2.8 → Klant 9 → Klant 7 → Depot	240,68
4	Depot → Klant 5 → Laadstation 4.6 → Klant 10 → Depot	231,94
<b>Totaal</b>		<b>764,21</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 2: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 3 → Laadstation 1.6 → Klant 5 → Depot	262,01
2	Depot → Laadstation 4.8 → Klant 6 → Laadstation 4.1 → Klant 1 → Depot	248,11
3	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.5 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot	229,54
4	Depot → Klant 9 → Klant 4 → Depot	47,59
<b>Totaal</b>		<b>787,25</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 3: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.2 → Klant 4 → Laadstation 1.8 → Depot	222,88
2	Depot → Laadstation 4.6 → Klant 1 → Klant 2 → Depot	165,78
3	Depot → Klant 3 → Depot	112,64
4	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 9 → Depot	89,07
5	Depot → Klant 7 → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 3.10 → Depot	215,72
<b>Totaal</b>		<b>806,09</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 4: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.4 → Klant 6 → Klant 8 → Depot	208,76
2	Depot → Laadstation 4.6 → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.9 → Klant 7 → Depot	198,89
3	Depot → Klant 9 → Klant 3 → Laadstation 1.3 → Klant 2 → Depot	220,29
4	Depot → Klant 10 → Klant 5 → Laadstation 1.2 → Depot	158,11
<b>Totaal</b>		<b>786,05</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 5: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.7 → Klant 6 → Klant 2 → Klant 5 → Depot	186,68
2	Depot → Klant 4 → Laadstation 1.3 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	212,25
3	Depot → Klant 8 → Laadstation 4.6 → Klant 3 → Depot	241,56
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot	115,35
<b>Totaal</b>		<b>755,84</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 6: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.10 → Klant 1 → Klant 9 → Laadstation 1.1 → Depot	247,75
2	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
3	Depot → Klant 7 → Klant 6 → Depot	122,76
4	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	140,35
<b>Totaal</b>		<b>643,44*</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 7: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.5 → Klant 2 → Klant 7 → Depot	193,21
2	Depot → Laadstation 3.2 → Klant 4 → Klant 8 → Laadstation 3.7 → Depot	228,28
3	Depot → Klant 3 → Klant 10 → Klant 9 → Depot	119,66
4	Depot → Laadstation 3.4 → Klant 1 → Klant 5 → Klant 6 → Depot	195,92
<b>Totaal</b>		<b>737,07</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 8: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.8 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Laadstation 3.1 → Klant 10 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.6 → Depot	286,09
3	Depot → Klant 4 → Klant 2 → Klant 5 → Depot	121,47
4	Depot → Klant 3 → Laadstation 3.8 → Klant 8 → Depot	247,60
<b>Totaal</b>		<b>829,96</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 9: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.5 → Klant 6 → Laadstation 1.1 → Depot	305,36
2	Depot → Klant 7 → Klant 4 → Klant 5 → Depot	136,20
3	Depot → Klant 8 → Klant 9 → Klant 2 → Depot	103,87
4	Depot → Klant 10 → Klant 1 → Laadstation 1.4 → Klant 3 → Depot	190,19
<b>Totaal</b>		<b>735,62</b>

Scenario 2.1 - Replicatie 10: twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
2	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
3	Depot → Klant 9 → Laadstation 2.5 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 1.9 → Klant 4 → Klant 2 → Depot	202,09
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.1 → Klant 3 → Klant 8 → Depot	222,21
<b>Totaal</b>		<b>512,98</b>

#### **Bijlage 4: Gegevens replicaties scenario 2.2**

Gemiddelde snelheid 65 km/u

<b>Scenario 2.2 - Replicatie 2: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.4 → Klant 3 → Laadstation 1.10 → Klant 5 → Depot</i>	262,01
2	<i>Depot → Laadstation 4.6 → Klant 6 → Laadstation 4.1 → Klant 1 → Depot</i>	248,11
3	<i>Depot → Klant 2 → Laadstation 1.2 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot</i>	229,54
4	<i>Depot → Klant 4 → Klant 9 → Depot</i>	47,59
<b>Totaal</b>		<b>787,25*</b>

<b>Scenario 2.2 - Replicatie 3: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.9 → Klant 4 → Laadstation 2.10 → Klant 6 → Depot</i>	298,13
2	<i>Depot → Klant 2 → Klant 1 → Depot</i>	151
3	<i>Depot → Klant 3 → Depot</i>	112,64
4	<i>Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 9 → Depot</i>	89,07
5	<i>Depot → Klant 7 → Klant 8 → Depot</i>	133,90
<b>Totaal</b>		<b>784,74</b>

<b>Scenario 2.2 - Replicatie 4: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 4.6 → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.5 → Klant 7 → Depot</i>	198,89
2	<i>Depot → Klant 2 → Depot</i>	140
3	<i>Depot → Klant 9 → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.8 → Depot</i>	214,14
4	<i>Depot → Klant 10 → Laadstation 1.7 → Klant 6 → Klant 8 → Depot</i>	214,49
<b>Totaal</b>		<b>767,52</b>

<b>Scenario 2.2 - Replicatie 5: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.4 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.7 → Depot</i>	208,09
2	<i>Depot → Laadstation 1.9 → Klant 6 → Klant 2 → Klant 5 → Depot</i>	186,67
3	<i>Depot → Klant 8 → Laadstation 4.10 → Klant 3 → Depot</i>	241,56
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot</i>	115,35
<b>Totaal</b>		<b>751,67</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 6: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
2	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Depot	55,02
3	Depot → Klant 7 → Laadstation 2.3 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 2.7 → Depot	203,74
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.1 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	238,81
<b>Totaal</b>		<b>630,15*</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 7: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 3		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.2 → Klant 1 → Klant 5 → Klant 6 → Depot	195,92
2	Depot → Laadstation 3.4 → Klant 8 → Klant 4 → Laadstation 3.5 → Depot	228,28
3	Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.3 → Depot	192,88
4	Depot → Klant 3 → Klant 10 → Klant 9 → Depot	119,66
<b>Totaal</b>		<b>736,74</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 8: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Laadstation 3.1 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.3 → Depot	285,67
3	Depot → Klant 3 → Klant 10 → Laadstation 3.10 → Klant 8 → Depot	268,11
4	Depot → Klant 5 → Klant 4 → Klant 2 → Depot	144,27
<b>Totaal</b>		<b>872,85</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 9: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Klant 9 → Klant 8 → Depot	103,87
2	Depot → Klant 4 → Klant 5 → Depot	123,71
3	Depot → Klant 7 → Klant 3 → Depot	145,27
4	Depot → Klant 10 → Klant 1 → Laadstation 1.3 → Klant 6 → Laadstation 1.4 → Depot	314,86
<b>Totaal</b>		<b>687,71</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 10: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
2	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
3	Depot → Klant 9 → Laadstation 2.5 → Klant 1 → Klant 6 → Klant 4 → Klant 8 → Klant 2 → Laadstation 2.9 → Depot	210,22
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.9 → Klant 3 → Depot	198,49
<b>Totaal</b>		<b>497,39</b>



Gemiddelde snelheid 50 km/u

Scenario 2.2 Replicatie 1: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.4 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 6 → Klant 3 → Klant 8 → Depot	102,59
3	Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 2.3 → Klant 9 → Klant 7 → Depot	242,99
4	Depot → Laadstation 4.5 → Klant 5 → Klant 10 → Depot	245,61
<b>Totaal</b>		<b>767,55</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 2: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 3 → Laadstation 1.6 → Klant 5 → Depot	262,01
2	Depot → Laadstation 4.7 → Klant 6 → Laadstation 4.10 → Klant 4 → Klant 9 → Depot	228,26
3	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.10 → Klant 7 → Klant 10 → Depot	229,48
4	Depot → Klant 8 → Klant 1 → Depot	103,38
<b>Totaal</b>		<b>823,13*</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 3: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
<i>Geen oplossing gevonden</i>		
<b>Totaal</b>		

Scenario 2.2 - Replicatie 4: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 4 → Klant 7 → Depot	111,91
2	Depot → Laadstation 1.7 → Klant 6 → Klant 1 → Laadstation 4.5 → Depot	230,59
3	Depot → Klant 9 → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.9 → Depot	214,14
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 1.2 → Klant 8 → Klant 2 → Laadstation 1.4 → Depot	230,97
<b>Totaal</b>		<b>787,61</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 5: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.7 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.5 → Depot	208,09
2	Depot → Laadstation 1.6 → Klant 6 → Klant 2 → Depot	186,17
3	Depot → Laadstation 3.2 → Klant 8 → Klant 5 → Depot	175,43
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 4.1 → Klant 3 → Depot	163,55
5	Depot → Klant 10 → Depot	46,18
<b>Totaal</b>		<b>779,42</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 6: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
2	Depot → Klant 10 → Klant 5 → Depot	55,02
3	Depot → Klant 7 → Laadstation 2.9 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 2.4 → Depot	203,74
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.1 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	238,81
<b>Totaal</b>		<b>630,15*</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 7: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 3		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 6 → Klant 5 → Klant 1 → Laadstation 3.7 → Depot	195,92
2	Depot → Laadstation 3.3 → Klant 8 → Klant 4 → Laadstation 3.1 → Depot	228,28
3	Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.9 → Depot	192,88
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot	119,66
<b>Totaal</b>		<b>736,74</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 8: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.2 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Laadstation 4.4 → Klant 9 → Laadstation 3.2 → Depot	267,15
3	Depot → Klant 3 → Klant 10 → Laadstation 3.6 → Klant 6 → Depot	276,27
4	Depot → Klant 4 → Klant 8 → Depot	142,38
5	Depot → Klant 2 → Klant 5 → Depot	109,08
<b>Totaal</b>		<b>969,68</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 9: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Klant 9 → Klant 8 → Depot	103,87
2	Depot → Klant 10 → Klant 4 → Klant 5 → Depot	144,25
3	Depot → Klant 3 → Depot	130,62
4	Depot → Laadstation 1.5 → Klant 6 → Laadstation 1.4 → Klant 1 → Klant 7 → Depot	308,87
<b>Totaal</b>		<b>687,61</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 10: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
2	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
3	Depot → Klant 9 → Laadstation 2.2 → Klant 1 → Klant 6 → Klant 4 → Klant 2 → Laadstation 2.5 → Depot	203,57
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.4 → Klant 3 → Klant 8 → Depot	222,21
<b>Totaal</b>		<b>514,46</b>

Gemiddelde snelheid 80 km/u

Scenario 2.2 – Replicatie 1: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.1 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot	115,23
3	Depot → Klant 6 → Klant 7 → Depot	111,97
4	Depot → Laadstation 4.3 → Klant 5 → Klant 10 → Klant 4 → Laadstation 2.8 → Klant 9 → Depot	319,61
<b>Totaal</b>		<b>723,17*</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 2: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.8 → Klant 3 → Laadstation 1.3 → Klant 5 → Depot	262,01
2	Depot → Laadstation 4.7 → Klant 6 → Laadstation 4.9 → Klant 1 → Depot	248,11
3	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.2 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot	229,54
4	Depot → Klant 9 → Klant 4 → Depot	47,59
<b>Totaal</b>		<b>787,25</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 3: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 2.7 → Klant 4 → Laadstation 2.4 → Depot	333,78
2	Depot → Klant 1 → Klant 2 → Depot	151
3	Depot → Klant 3 → Depot	112,64
4	Depot → Klant 10 → Klant 9 → Depot	68,02
5	Depot → Klant 7 → Klant 5 → Depot	127,05
<b>Totaal</b>		<b>792,49</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 4: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 4.1 → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.9 → Klant 7 → Depot	198,89
2	Depot → Klant 2 → Depot	140
3	Depot → Klant 9 → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.3 → Depot	214,14
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 1.4 → Klant 6 → Klant 8 → Depot	214,49
<b>Totaal</b>		<b>767,52</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 5: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.5 → Depot	208,09
2	Depot → Laadstation 1.1 → Klant 6 → Klant 2 → Klant 5 → Depot	186,67
3	Depot → Klant 8 → Laadstation 4.4 → Klant 3 → Depot	241,56
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot	115,35
<b>Totaal</b>		<b>751,67</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 6: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
2	Depot → Klant 10 → Klant 5 → Depot	55,02
3	Depot → Klant 7 → Laadstation 2.7 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 2.4 → Depot	203,74
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.6 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	238,81
<b>Totaal</b>		<b>630,15*</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 7: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 3		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 6 → Klant 5 → Klant 1 → Laadstation 3.2 → Depot	195,92
2	Depot → Laadstation 3.7 → Klant 4 → Klant 8 → Laadstation 3.8 → Depot	228,28
3	Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.3 → Depot	192,88
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot	119,66
<b>Totaal</b>		<b>736,74</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 8: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.8 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Laadstation 3.1 → Klant 10 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.2 → Depot	286,09
3	Depot → Klant 3 → Laadstation 3.10 → Klant 8 → Depot	247,60
4	Depot → Klant 4 → Klant 2 → Klant 5 → Depot	121,47
<b>Totaal</b>		<b>829,96</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 9: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Klant 9 → Klant 8 → Depot	103,87
2	Depot → Klant 7 → Klant 4 → Klant 5 → Depot	136,20
3	Depot → Klant 3 → Depot	130,62
4	Depot → Laadstation 1.9 → Klant 6 → Laadstation 1.8 → Klant 1 → Klant 10 → Depot	314,86
<b>Totaal</b>		<b>685,55</b>

Scenario 2.2 - Replicatie 10: twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
2	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
3	Depot → Klant 9 → Laadstation 2.8 → Klant 1 → Klant 6 → Klant 4 → Klant 8 → Klant 2 → Laadstation 2.6 → Depot	210,22
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.4 → Klant 3 → Depot	198,49
<b>Totaal</b>		<b>497,39</b>

## **Bijlage 5: Gegevens replicaties scenario 3.1**

Gemiddelde snelheid 65 km/u

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 2: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.1 → Klant 3 → Klant 5 → Depot</i>	246,54
2	<i>Depot → Laadstation 4.1 → Klant 6 → Laadstation 4.5 → Klant 1 → Depot</i>	248,11
3	<i>Depot → Klant 2 → Laadstation 1.10 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot</i>	229,54
4	<i>Depot → Klant 4 → Klant 9 → Depot</i>	47,59
<b>Totaal</b>		<b>771,78*</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 3: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 2 → Klant 1 → Depot</i>	151
2	<i>Depot → Klant 3 → Depot</i>	112,64
3	<i>Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 9 → Depot</i>	89,07
4	<i>Depot → Klant 7 → Klant 8 → Laadstation 3.4 → Klant 6 → Laadstation 3.2 → Klant 4 → Laadstation 1.4 → Depot</i>	366,08
<b>Totaal</b>		<b>718,79*</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 4: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.9 → Klant 7 → Depot</i>	189,16
2	<i>Depot → Klant 2 → Depot</i>	140
3	<i>Depot → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 1.6 → Klant 9 → Depot</i>	255,40
4	<i>Depot → Klant 10 → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.8 → Depot</i>	188,74
<b>Totaal</b>		<b>773,30</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 5: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.5 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.3 → Depot</i>	208,09
2	<i>Depot → Laadstation 1.10 → Klant 6 → Klant 2 → Klant 3 → Laadstation 4.2 → Depot</i>	251,76
3	<i>Depot → Klant 5 → Klant 8 → Laadstation 3.9 → Depot</i>	175,43
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot</i>	115,35
<b>Totaal</b>		<b>750,63</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 6: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot</i>	132,58
2	<i>Depot → Klant 5 → Klant 10 → Depot</i>	55,02
3	<i>Depot → Klant 7 → Laadstation 2.1 → Klant 1 → Klant 6 → Depot</i>	202,38
4	<i>Depot → Klant 9 → Laadstation 1.4 → Klant 2 → Klant 8 → Depot</i>	238,81
<b>Totaal</b>		<b>628,79*</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 7: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 3.8 → Klant 8 → Klant 4 → Depot</i>	213,36
2	<i>Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.10 → Depot</i>	192,88
3	<i>Depot → Klant 6 → Klant 5 → Klant 1 → Laadstation 3.6 → Depot</i>	195,92
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot</i>	119,66
<b>Totaal</b>		<b>721,82</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 8: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.10 → Klant 7 → Klant 1 → Depot</i>	174,80
2	<i>Depot → Klant 2 → Klant 5 → Depot</i>	109,08
3	<i>Depot → Klant 4 → Klant 8 → Depot</i>	142,38
4	<i>Depot → Klant 10 → Klant 3 → Laadstation 3.1 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.4 → Depot</i>	341,44
<b>Totaal</b>		<b>767,70*</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 9: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 2 → Laadstation 1.8 → Klant 1 → Klant 7 → Laadstation 2.7 → Depot</i>	295,35
2	<i>Depot → Klant 3 → Depot</i>	50,16
3	<i>Depot → Klant 6 → Klant 5 → Depot</i>	123,71
4	<i>Depot → Klant 8 → Klant 4 → Klant 10 → Laadstation 2.2 → Klant 9 → Depot</i>	193,33
<b>Totaal</b>		<b>662,55</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 10: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 3 → Laadstation 4.2 → Klant 10 → Depot</i>	198,49
2	<i>Depot → Klant 5 → Depot</i>	71,70
3	<i>Depot → Klant 7 → Depot</i>	16,98
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 1.10 → Klant 4 → Klant 8 → Klant → Depot</i>	206,36
<b>Totaal</b>		<b>493,53*</b>

Gemiddelde snelheid 50 km/u

Scenario 3.1 – Replicatie 1: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.9 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot	115,23
3	Depot → Klant 5 → Laadstation 4.4 → Klant 10 → Klant 4 → Klant 9 → Depot	302,38
4	Depot → Klant 6 → Klant 7 → Depot	111,97
<b>Totaal</b>		<b>705,93*</b>

Scenario 3.1 - Replicatie 2: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.1 → Klant 3 → Klant 5 → Depot	246,54
2	Depot → Laadstation 4.4 → Klant 6 → Laadstation 4.2 → Klant 1 → Depot	248,11
3	Depot → Klant 2 → Klant 10 → Laadstation 1.5 → Klant 7 → Klant 8 → Depot	246,48
4	Depot → Klant 4 → Klant 9 → Depot	47,59
<b>Totaal</b>		<b>788,72*</b>

Scenario 3.1 - Replicatie 3: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Klant 1 → Depot	151
2	Depot → Klant 3 → Depot	112,64
3	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot	68,02
4	Depot → Laadstation 1.5 → Klant 4 → Laadstation 3.2 → Klant 6 → Depot	297
5	Depot → Klant 7 → Klant 8 → Klant 5 → Depot	155,74
<b>Totaal</b>		<b>784,40</b>

Scenario 3.1 - Replicatie 4: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.1 → Klant 7 → Depot	189,16
2	Depot → Klant 2 → Depot	140
3	Depot → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 1.8 → Klant 9 → Depot	255,40
4	Depot → Klant 10 → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.9 → Depot	188,74
<b>Totaal</b>		<b>773,30</b>

Scenario 3.1 - Replicatie 5: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.4 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.3 → Depot	208,09
2	Depot → Klant 6 → Klant 2 → Depot	165,70
3	Depot → Klant 5 → Klant 8 → Depot	156,25
4	Depot → Klant 9 → Klant 3 → Depot	163,43
5	Depot → Klant 10 → Depot	46,18
<b>Totaal</b>		<b>739,65</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 6: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot</i>	132,58
2	<i>Depot → Klant 5 → Klant 10 → Depot</i>	55,02
3	<i>Depot → Klant 7 → Laadstation 2.5 → Klant 1 → Klant 6 → Depot</i>	202,38
4	<i>Depot → Klant 9 → Laadstation 1.8 → Klant 2 → Klant 8 → Depot</i>	238,81
<b>Totaal</b>		<b>628,79*</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 7: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 3.6 → Klant 8 → Klant 4 → Depot</i>	213,36
2	<i>Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.9 → Depot</i>	192,88
3	<i>Depot → Laadstation 3.8 → Klant 1 → Klant 5 → Klant 6 → Depot</i>	195,92
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot</i>	119,66
<b>Totaal</b>		<b>721,82</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 8: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.3 → Klant 7 → Klant 1 → Depot</i>	174,80
2	<i>Depot → Klant 4 → Klant 2 → Klant 5 → Depot</i>	121,47
3	<i>Depot → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.1 → Depot</i>	237,72
4	<i>Depot → Klant 3 → Laadstation 3.6 → Klant 10 → Klant 8 → Depot</i>	251,01
<b>Totaal</b>		<b>785*</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 9: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 2 → Klant 9 → Klant 8 → Depot</i>	103,87
2	<i>Depot → Klant 7 → Klant 3 → Depot</i>	145,27
3	<i>Depot → Klant 4 → Klant 5 → Depot</i>	123,71
4	<i>Depot → Klant 10 → Klant 1 → Laadstation 1.5 → Klant 6 → Depot</i>	284,76
<b>Totaal</b>		<b>657,61</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 10: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 3 → Laadstation 4.2 → Klant 10 → Depot</i>	198,49
2	<i>Depot → Klant 5 → Depot</i>	71,70
3	<i>Depot → Klant 7 → Depot</i>	16,98
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 1.10 → Klant 4 → Klant 8 → Klant → Depot</i>	206,36
<b>Totaal</b>		<b>493,53*</b>



Gemiddelde snelheid 80 km/u

Scenario 3.1 – Replicatie 1: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.3 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot	115,23
3	Depot → Klant 5 → Laadstation 4.10 → Klant 10 → Klant 4 → Laadstation 2.8 → Klant 9 → Depot	305,94
4	Depot → Klant 6 → Klant 7 → Depot	111,97
<b>Totaal</b>		<b>709,50</b>

Scenario 3.1 - Replicatie 2: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.1 → Klant 3 → Klant 5 → Depot	246,54
2	Depot → Laadstation 4.3 → Klant 6 → Laadstation 4.2 → Klant 1 → Depot	248,11
3	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.2 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot	229,54
4	Depot → Klant 9 → Klant 4 → Depot	47,59
<b>Totaal</b>		<b>771,78*</b>

Scenario 3.1 - Replicatie 3: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Depot	112,64
2	Depot → Klant 5 → Depot	48,42
3	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 1 → Laadstation 4.4 → Klant 2 → Depot	169,82
4	Depot → Klant 7 → Klant 8 → Laadstation 3.7 → Klant 6 → Laadstation 3.4 → Klant 4 → Laadstation 1.4 → Depot	366,08
<b>Totaal</b>		<b>696,96*</b>

Scenario 3.1 - Replicatie 4: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.6 → Klant 7 → Depot	189,16
2	Depot → Klant 2 → Depot	140
3	Depot → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 1.1 → Klant 9 → Depot	255,40
4	Depot → Klant 10 → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.2 → Depot	188,74
<b>Totaal</b>		<b>773,30</b>

Scenario 3.1 - Replicatie 5: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.10 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.1 → Depot	208,09
2	Depot → Klant 6 → Klant 2 → Laadstation 4.6 → Klant 3 → Depot	246,13
3	Depot → Klant 5 → Klant 8 → Laadstation 3.7 → Depot	175,43
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot	115,35
<b>Totaal</b>		<b>745</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 6: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot</i>	132,58
2	<i>Depot → Klant 10 → Klant 5 → Depot</i>	55,02
3	<i>Depot → Klant 7 → Laadstation 2.10 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 2.8 → Depot</i>	203,74
4	<i>Depot → Klant 9 → Laadstation 1.9 → Klant 2 → Klant 8 → Depot</i>	238,81
<b>Totaal</b>		<b>630,15*</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 7: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 3.3 → Klant 8 → Klant 4 → Depot</i>	213,36
2	<i>Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.8 → Depot</i>	192,88
3	<i>Depot → Laadstation 3.4 → Klant 1 → Klant 5 → Klant 6 → Depot</i>	195,92
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot</i>	119,66
<b>Totaal</b>		<b>721,82</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 8: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.8 → Klant 7 → Klant 1 → Depot</i>	174,80
2	<i>Depot → Klant 2 → Klant 5 → Depot</i>	109,08
3	<i>Depot → Klant 4 → Klant 8 → Depot</i>	142,38
4	<i>Depot → Laadstation 4.4 → Klant 3 → Laadstation 3.2 → Klant 10 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.5 → Depot</i>	320,64
<b>Totaal</b>		<b>746,90*</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 9: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 10 → Klant 1 → Laadstation 1.8 → Klant 6 → Laadstation 2.3 → Depot</i>	304,13
2	<i>Depot → Klant 2 → Depot</i>	50,16
3	<i>Depot → Klant 7 → Klant 4 → Klant 5 → Depot</i>	136,20
4	<i>Depot → Klant 8 → Laadstation 2.2 → Klant 9 → Klant 3 → Depot</i>	178,68
<b>Totaal</b>		<b>669,17</b>

<b>Scenario 3.1 - Replicatie 10: Variabel batterijverbruiksniveau indien enkel snellaadstations</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 10 → Laadstation 4.4 → Klant 3 → Depot</i>	198,49
2	<i>Depot → Klant 5 → Depot</i>	71,70
3	<i>Depot → Klant 7 → Depot</i>	16,98
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 1.7 → Klant 4 → Klant 8 → Klant 2 → Depot</i>	206,36
<b>Totaal</b>		<b>493,53*</b>

## **Bijlage 6: Gegevens replicaties scenario 3.2**

Gemiddelde snelheid 65 km/u

<b>Scenario 3.2 - Replicatie 2: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.1 → Klant 3 → Klant 5 → Depot</i>	246,54
2	<i>Depot → Laadstation 4.8 → Klant 6 → Laadstation 4.5 → Klant 1 → Depot</i>	248,11
3	<i>Depot → Klant 2 → Laadstation 1.2 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot</i>	229,54
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 4 → Depot</i>	47,59
<b>Totaal</b>		<b>771,78*</b>

<b>Scenario 3.2 - Replicatie 3: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 3.9 → Klant 6 → Laadstation 2.4 → Klant 4 → Depot</i>	300
2	<i>Depot → Klant 2 → Klant 1 → Depot</i>	151
3	<i>Depot → Klant 3 → Depot</i>	112,64
4	<i>Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 9 → Depot</i>	89,07
5	<i>Depot → Klant 7 → Klant 8 → Depot</i>	133,9
<b>Totaal</b>		<b>786,61</b>

<b>Scenario 3.2 - Replicatie 4: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 4.6 → Klant 1 → Klant 4 → Klant 7 → Depot</i>	190,10
2	<i>Depot → Klant 2 → Depot</i>	140
3	<i>Depot → Klant 3 → Laadstation 1.4 → Klant 5 → Klant 9 → Depot</i>	243,04
4	<i>Depot → Klant 10 → Laadstation 1.2 → Klant 6 → Klant 8 → Depot</i>	214,49
<b>Totaal</b>		<b>787,63</b>

<b>Scenario 3.2 - Replicatie 5: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 4 → Laadstation 1.9 → Klant 7 → Klant 1 → Depot</i>	212,25
2	<i>Depot → Laadstation 1.10 → Klant 6 → Klant 2 → Klant 5 → Depot</i>	186,68
3	<i>Depot → Klant 8 → Laadstation 4.6 → Klant 3 → Depot</i>	241,56
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot</i>	115,35
<b>Totaal</b>		<b>755,84</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 6: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
2	Depot → Klant 10 → Klant 5 → Depot	55,02
3	Depot → Klant 7 → Laadstation 2.2 → Klant 1 → Klant 6 → Depot	202,38
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.2 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	238,81
<b>Totaal</b>		<b>628,79*</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 7: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.2 → Klant 8 → Klant 4 → Depot	213,36
2	Depot → Laadstation 3.8 → Klant 2 → Klant 7 → Depot	193,21
3	Depot → Laadstation 3.6 → Klant 1 → Klant 5 → Klant 6 → Depot	195,92
4	Depot → Klant 3 → Klant 10 → Klant 9 → Depot	119,66
<b>Totaal</b>		<b>722,15</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 8: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.5 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Klant 2 → Klant 5 → Depot	109,08
3	Depot → Klant 4 → Klant 8 → Depot	142,38
4	Depot → Klant 3 → Klant 10 → Laadstation 3.8 → Klant 6 → Depot	276,27
5	Depot → Klant 9 → Depot	181,10
<b>Totaal</b>		<b>883,63</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 9: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 6 → Laadstation 2.3 → Depot	294,63
2	Depot → Klant 4 → Klant 7 → Klant 5 → Depot	143,75
3	Depot → Klant 8 → Klant 9 → Klant 2 → Depot	103,87
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 1.2 → Klant 1 → Klant 3 → Depot	197,51
<b>Totaal</b>		<b>739,76</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 10: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.1 → Klant 3 → Klant 8 → Klant 4 → Depot	248,95
2	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
3	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 2.8 → Klant 1 → Klant 6 → Klant 2 → Depot	172,38
<b>Totaal</b>		<b>510,01*</b>

Gemiddelde snelheid 50 km/u

Scenario 3.2 – Replicatie 1: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 2 → Laadstation 2.1 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot	115,23
3	Depot → Klant 6 → Laadstation 2.4 → Klant 4 → Klant 9 → Klant 7 → Depot	240
4	Depot → Laadstation 4.5 → Klant 5 → Klant 10 → Depot	245,60
<b>Totaal</b>		<b>777,19</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 2: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.2 → Klant 3 → Klant 5 → Depot	246,54
2	Depot → Laadstation 4.8 → Klant 6 → Klant 8 → Depot	209,43
3	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.5 → Klant 7 → Klant 10 → Depot	229,48
4	Depot → Klant 9 → Klant 4 → Klant 1 → Depot	132,61
<b>Totaal</b>		<b>818,06*</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 3: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.10 → Klant 6 → Klant 8 → Klant 7 → Depot	215,72
2	Depot → Klant 2 → Klant 1 → Depot	151
3	Depot → Klant 3 → Laadstation 1.1 → Klant 4 → Depot	275,19
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 5 → Depot	89,07
<b>Totaal</b>		<b>730,98*</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 4: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 4.4 → Klant 1 → Klant 4 → Klant 7 → Depot	190,10
2	Depot → Klant 10 → Klant 3 → Laadstation 1.7 → Klant 2 → Depot	194,89
3	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.6 → Klant 5 → Depot	202,02
4	Depot → Laadstation 1.9 → Klant 6 → Klant 8 → Depot	208,76
<b>Totaal</b>		<b>795,77</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 5: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 4 → Laadstation 1.7 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	212,25
2	Depot → Klant 6 → Klant 2 → Depot	165,70
3	Depot → Klant 5 → Klant 8 → Depot	156,25
4	Depot → Klant 9 → Klant 3 → Depot	163,43
5	Depot → Klant 10 → Depot	46,18
<b>Totaal</b>		<b>743,81</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 6: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
2	Depot → Klant 10 → Klant 5 → Depot	55,02
3	Depot → Klant 7 → Laadstation 2.9 → Klant 1 → Klant 6 → Depot	202,38
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.1 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	238,81
<b>Totaal</b>		<b>628,79*</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 7: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.8 → Klant 8 → Klant 4 → Depot	213,36
2	Depot → Laadstation 3.5 → Klant 2 → Klant 7 → Depot	193,21
3	Depot → Laadstation 3.9 → Klant 1 → Klant 5 → Klant 6 → Depot	195,92
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot	119,66
<b>Totaal</b>		<b>722,15</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 8: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.7 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Klant 2 → Klant 5 → Depot	109,08
3	Depot → Klant 4 → Klant 8 → Depot	142,38
4	Depot → Laadstation 4.9 → Klant 3 → Klant 10 → Laadstation 3.6 → Klant 6 → Depot	280,84
5	Depot → Klant 9 → Depot	181,10
<b>Totaal</b>		<b>888,20</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 9: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 1 → Depot	162,46
2	Depot → Klant 4 → Klant 7 → Klant 5 → Depot	143,75
3	Depot → Klant 2 → Klant 9 → Klant 8 → Depot	103,87
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 1.3 → Klant 6 → Depot	284,13
<b>Totaal</b>		<b>694,21</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 10: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.8 → Klant 3 → Klant 8 → Klant 4 → Depot	248,95
2	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
3	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
4	Depot → Klant 9 → Klant 1 → Klant 6 → Klant 2 → Depot	170
<b>Totaal</b>		<b>507,63*</b>

Gemiddelde snelheid 80 km/u

Scenario 3.2 – Replicatie 1: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.4 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 1 → Klant 5 → Klant 10 → Laadstation 4.10 → Depot	254,81
3	Depot → Klant 6 → Klant 4 → Laadstation 2.1 → Klant 9 → Klant 7 → Depot	240,68
4	Depot → Klant 8 → Klant 3 → Depot	90,81
<b>Totaal</b>		<b>762,66</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 2: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 3 → Klant 5 → Depot	246,54
2	Depot → Laadstation 4.9 → Klant 6 → Laadstation 4.10 → Klant 1 → Depot	248,11
3	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.4 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot	229,54
4	Depot → Klant 9 → Klant 4 → Depot	47,59
<b>Totaal</b>		<b>771,78*</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 3: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.10 → Klant 6 → Klant 8 → Klant 7 → Klant 5 → Depot	225,39
2	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.3 → Klant 4 → Depot	245,49
3	Depot → Klant 3 → Depot	112,64
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 1 → Depot	128,10
<b>Totaal</b>		<b>711,62*</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 4: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 4.6 → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.10 → Klant 7 → Depot	198,89
2	Depot → Klant 10 → Klant 3 → Laadstation 1.5 → Klant 2 → Depot	194,89
3	Depot → Laadstation 1.10 → Klant 5 → Klant 9 → Depot	198,81
4	Depot → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 1.6 → Depot	208,76
<b>Totaal</b>		<b>801,35</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 5: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 4 → Laadstation 1.6 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	212,25
2	Depot → Laadstation 1.3 → Klant 6 → Klant 2 → Klant 5 → Depot	186,68
3	Depot → Klant 8 → Laadstation 4.5 → Klant 3 → Depot	241,56
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot	115,35
<b>Totaal</b>		<b>755,84</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 6: Variabel verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
2	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	140,35
3	Depot → Klant 7 → Klant 6 → Depot	122,76
4	Depot → Laadstation 1.7 → Klant 9 → Klant 1 → Laadstation 2.10 → Depot	247,75
<b>Totaal</b>		<b>643,44</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 7: Variabel verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.8 → Klant 8 → Klant 4 → Depot	213,36
2	Depot → Laadstation 3.2 → Klant 2 → Klant 7 → Depot	193,21
3	Depot → Laadstation 3.3 → Klant 1 → Klant 5 → Klant 6 → Depot	195,92
4	Depot → Klant 3 → Klant 10 → Klant 9 → Depot	119,66
<b>Totaal</b>		<b>722,15</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 8: Variabel verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.2 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Klant 3 → Laadstation 3.2 → Klant 8 → Depot	247,60
3	Depot → Klant 4 → Klant 2 → Klant 5 → Depot	121,47
4	Depot → Laadstation 3.1 → Klant 10 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.3 → Depot	286,09
<b>Totaal</b>		<b>829,96</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 9: Variabel verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.2 → Klant 6 → Laadstation 1.4 → Depot	294,63
2	Depot → Klant 7 → Klant 4 → Klant 5 → Depot	136,20
3	Depot → Klant 8 → Klant 9 → Klant 2 → Depot	103,87
4	Depot → Klant 10 → Klant 1 → Laadstation 1.1 → Klant 3 → Depot	190,19
<b>Totaal</b>		<b>724,89</b>

Scenario 3.2 - Replicatie 10: Variabel verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op het depot		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.7 → Klant 3 → Klant 8 → Klant 4 → Depot	248,95
2	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
3	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 2.9 → Klant 1 → Klant 6 → Klant 2 → Depot	172,38
<b>Totaal</b>		<b>510,01</b>



### **Bijlage 7: Gegevens replicaties scenario 3.3**

Gemiddelde snelheid 65 km/u

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 2: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.4 → Klant 3 → Klant 5 → Depot</i>	246,54
2	<i>Depot → Laadstation 4.6 → Klant 6 → Laadstation 4.1 → Klant 1 → Depot</i>	248,11
3	<i>Depot → Klant 2 → Laadstation 1.8 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot</i>	229,54
4	<i>Depot → Klant 4 → Klant 9 → Depot</i>	47,59
<b>Totaal</b>		<b>771,78*</b>

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 3: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 2 → Klant 1 → Depot</i>	151
2	<i>Depot → Klant 3 → Depot</i>	112,64
3	<i>Depot → Klant 5 → Klant 10 → Klant 9 → Depot</i>	89,07
4	<i>Depot → Klant 7 → Klant 8 → Depot</i>	133,9
5	<i>Depot → Klant 6 → Laadstation 2.9 → Klant 4 → Depot</i>	297,94
<b>Totaal</b>		<b>784,55</b>

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 4: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 4.1 → Klant 1 → Klant 4 → Klant 7 → Depot</i>	190,10
2	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Laadstation 1.3 → Klant 2 → Depot</i>	194,25
3	<i>Depot → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 1.1 → Depot</i>	208,76
4	<i>Depot → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.9 → Depot</i>	185,55
<b>Totaal</b>		<b>778,66</b>

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 5: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.6 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.4 → Depot</i>	208,09
2	<i>Depot → Laadstation 3.3 → Klant 8 → Klant 6 → Depot</i>	174,96
3	<i>Depot → Klant 9 → Klant 3 → Depot</i>	163,43
4	<i>Depot → Klant 10 → Depot</i>	46,18
5	<i>Depot → Laadstation 3.6 → Klant 2 → Klant 5 → Depot</i>	179,76
<b>Totaal</b>		<b>772,44</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 6: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
2	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Depot	55,02
3	Depot → Klant 7 → Laadstation 2.5 → Klant 1 → Klant 6 → Depot	202,38
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.5 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	238,81
<b>Totaal</b>		<b>628,79*</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 7: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 3		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.7 → Klant 8 → Klant 4 → Depot	213,36
2	Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.6 → Depot	192,88
3	Depot → Klant 6 → Klant 5 → Klant 1 → Laadstation 3.2 → Depot	195,92
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot	119,66
<b>Totaal</b>		<b>721,82</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 8: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.9 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Klant 3 → Laadstation 3.6 → Klant 8 → Depot	247,60
3	Depot → Klant 4 → Klant 2 → Klant 5 → Depot	121,47
4	Depot → Laadstation 4.8 → Laadstation 3.10 → Klant 10 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.8 → Depot	298,49
<b>Totaal</b>		<b>842,36</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 9: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 10 → Laadstation 1.2 → Klant 6 → Laadstation 1.9 → Klant 1 → Klant 7 → Depot	317,74
2	Depot → Klant 3 → Depot	130,62
3	Depot → Klant 4 → Klant 5 → Depot	123,71
4	Depot → Klant 8 → Klant 9 → Klant 2 → Depot	103,87
<b>Totaal</b>		<b>675,94</b>

Scenario 3.3-Replicatie 10: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
2	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
3	Depot → Klant 9 → Laadstation 2.1 → Klant 1 → Klant 6 → Klant 4 → Klant 8 → Klant 2 → Laadstation 2.10 → Depot	210,22
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.10 → Klant 3 → Depot	198,49
<b>Totaal</b>		<b>497,39*</b>

Gemiddelde snelheid 50 km/u

Scenario 3.3 – Replicatie 1: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 2.3 → Klant 2 → Depot	176,36
2	Depot → Klant 6 → Klant 3 → Klant 8 → Depot	102,59
3	Depot → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 2.6 → Klant 9 → Klant 7 → Depot	242,99
4	Depot → Laadstation 4.2 → Klant 5 → Klant 10 → Depot	245,61
<b>Totaal</b>		<b>767,55</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 2: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.2 → Klant 3 → Klant 5 → Depot	246,54
2	Depot → Laadstation 4.7 → Klant 6 → Laadstation 4.10 → Klant 4 → Klant 9 → Depot	228,26
3	Depot → Klant 2 → Laadstation 1.3 → Klant 7 → Klant 10 → Depot	229,48
4	Depot → Klant 8 → Klant 1 → Depot	103,38
<b>Totaal</b>		<b>807,66*</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 3: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.8 → Klant 6 → Klant 8 → Klant 7 → Depot	215,72
2	Depot → Klant 2 → Klant 1 → Depot	151
3	Depot → Klant 3 → Laadstation 1.1 → Klant 4 → Depot	275,19
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 5 → Depot	89,07
<b>Totaal</b>		<b>730,98*</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 4: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 4.9 → Klant 1 → Klant 4 → Klant 7 → Depot	190,10
2	Depot → Klant 2 → Depot	140
3	Depot → Klant 8 → Klant 6 → Laadstation 1.3 → Klant 9 → Depot	255,40
4	Depot → Klant 10 → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.7 → Depot	188,74
<b>Totaal</b>		<b>774,24</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 5: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.4 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.8 → Depot	208,09
2	Depot → Klant 5 → Klant 8 → Depot	156,25
3	Depot → Klant 9 → Klant 3 → Depot	163,43
4	Depot → Klant 10 → Depot	46,18
5	Depot → Klant 6 → Klant 2 → Depot	165,70
<b>Totaal</b>		<b>739,65</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 6: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot	132,58
2	Depot → Klant 5 → Klant 10 → Depot	55,02
3	Depot → Klant 7 → Laadstation 2.5 → Klant 1 → Klant 6 → Depot	202,38
4	Depot → Klant 9 → Laadstation 1.7 → Klant 2 → Klant 8 → Depot	238,81
<b>Totaal</b>		<b>628,79*</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 7: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 3		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 3.8 → Klant 8 → Klant 4 → Depot	213,36
2	Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.9 → Depot	192,88
3	Depot → Laadstation 3.10 → Klant 1 → Klant 5 → Klant 6 → Depot	195,92
4	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot	119,66
<b>Totaal</b>		<b>721,82</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 8: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Laadstation 1.4 → Klant 7 → Klant 1 → Depot	174,80
2	Depot → Klant 3 → Laadstation 3.3 → Klant 6 → Depot	255,79
3	Depot → Klant 2 → Klant 5 → Depot	109,08
4	Depot → Klant 4 → Klant 8 → Depot	142,38
5	Depot → Klant 9 → Klant 10 → Laadstation 3.1 → Depot	229,47
<b>Totaal</b>		<b>911,52</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 9: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 10 → Klant 1 → Laadstation 1.7 → Klant 6 → Depot	284,76
2	Depot → Klant 3 → Klant 7 → Depot	145,27
3	Depot → Klant 4 → Klant 5 → Depot	123,71
4	Depot → Klant 2 → Klant 9 → Klant 8 → Depot	103,87
<b>Totaal</b>		<b>657,61</b>

Scenario 3.3 - Replicatie 10: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2		
Rit	Route	Afstand (km)
1	Depot → Klant 5 → Depot	71,70
2	Depot → Klant 7 → Depot	16,98
3	Depot → Klant 9 → Klant 1 → Klant 6 → Klant 2 → Depot	170
4	Depot → Klant 10 → Laadstation 4.9 → Klant 3 → Klant 8 → Klant 4 → Depot	248,95
<b>Totaal</b>		<b>507,63</b>

Gemiddelde snelheid 80 km/u

<b>Scenario 3.3: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 2.1 → Klant 2 → Depot</i>	176,36
2	<i>Depot → Klant 1 → Klant 8 → Klant 3 → Depot</i>	115,23
3	<i>Depot → Klant 6 → Klant 7 → Depot</i>	111,97
4	<i>Depot → Laadstation 4.5 → Klant 5 → Klant 10 → Klant 4 → Laadstation 2.9 → Klant 9 → Depot</i>	319,61
<b>Totaal</b>		<b>723,17</b>

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 2: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.1 → Klant 3 → Klant 5 → Depot</i>	246,54
2	<i>Depot → Laadstation 4.3 → Klant 6 → Laadstation 4.10 → Klant 1 → Depot</i>	248,11
3	<i>Depot → Klant 2 → Laadstation 1.3 → Klant 7 → Klant 10 → Klant 8 → Depot</i>	229,54
4	<i>Depot → Klant 4 → Klant 9 → Depot</i>	47,59
<b>Totaal</b>		<b>771,78*</b>

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 3: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 3.10 → Klant 6 → Klant 8 → Klant 7 → Klant 5 → Depot</i>	225,39
2	<i>Depot → Klant 2 → Laadstation 1.2 → Klant 4 → Depot</i>	245,49
3	<i>Depot → Klant 3 → Depot</i>	112,64
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 1 → Depot</i>	128,10
<b>Totaal</b>		<b>711,62</b>

<b>Scenario 3.2 - Replicatie 4: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 4.10 → Klant 1 → Klant 4 → Laadstation 4.9 → Klant 7 → Depot</i>	198,89
2	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Laadstation 1.1 → Klant 2 → Depot</i>	194,25
3	<i>Depot → Klant 3 → Klant 5 → Laadstation 1.7 → Depot</i>	185,55
4	<i>Depot → Laadstation 1.3 → Klant 6 → Klant 8 → Depot</i>	208,76
<b>Totaal</b>		<b>787,45</b>

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 5: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.3 → Klant 4 → Klant 7 → Klant 1 → Laadstation 1.1 → Depot</i>	208,09
2	<i>Depot → Klant 8 → Laadstation 4.2 → Klant 3 → Depot</i>	241,56
3	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Depot</i>	115,35
4	<i>Depot → Laadstation 1.9 → Klant 6 → Klant 2 → Klant 5 → Depot</i>	186,68
<b>Totaal</b>		<b>751,68</b>

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 6: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 3 → Klant 4 → Depot</i>	132,58
2	<i>Depot → Klant 5 → Klant 10 → Depot</i>	55,02
3	<i>Depot → Klant 7 → Laadstation 2.8 → Klant 1 → Klant 6 → Laadstation 2.2 → Depot</i>	203,74
4	<i>Depot → Klant 9 → Laadstation 1.5 → Klant 2 → Klant 8 → Depot</i>	238,81
<b>Totaal</b>		<b>630,15*</b>

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 7: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 3</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 3.4 → Klant 8 → Klant 4 → Depot</i>	213,36
2	<i>Depot → Klant 2 → Klant 7 → Laadstation 3.3 → Depot</i>	192,88
3	<i>Depot → Klant 6 → Klant 5 → Klant 1 → Laadstation 3.5 → Depot</i>	195,92
4	<i>Depot → Klant 9 → Klant 10 → Klant 3 → Depot</i>	119,66
<b>Totaal</b>		<b>721,82</b>

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 8: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 4</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Laadstation 1.3 → Klant 7 → Klant 1 → Depot</i>	174,80
2	<i>Depot → Klant 3 → Laadstation 3.6 → Klant 8 → Depot</i>	247,60
3	<i>Depot → Klant 4 → Klant 2 → Klant 5 → Depot</i>	121,47
4	<i>Depot → Laadstation 3.3 → Klant 10 → Klant 9 → Klant 6 → Laadstation 3.1 → Depot</i>	286,09
<b>Totaal</b>		<b>829,96</b>

<b>Scenario 3.3 - Replicatie 9: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 1</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 10 → Laadstation 1.6 → Klant 6 → Laadstation 1.3 → Klant 1 → Klant 7 → Depot</i>	317,74
2	<i>Depot → Klant 2 → Depot</i>	50,15
3	<i>Depot → Klant 4 → Klant 5 → Depot</i>	123,71
4	<i>Depot → Klant 8 → Laadstation 2.10 → Klant 9 → Klant 3 → Depot</i>	178,69
<b>Totaal</b>		<b>670,29</b>

<b>Scenario 3.3-Replicatie 10: Variabele verbruiksniveau, twee types laadstation met snellaadstation op laadstation 2</b>		
<b>Rit</b>	<b>Route</b>	<b>Afstand (km)</b>
1	<i>Depot → Klant 5 → Depot</i>	71,70
2	<i>Depot → Klant 7 → Depot</i>	16,98
3	<i>Depot → Klant 9 → Laadstation 2.2 → Klant 1 → Klant 6 → Klant 4 → Klant 8 → Klant 2 → Laadstation 2.7 → Depot</i>	210,22
4	<i>Depot → Klant 10 → Laadstation 4.6 → Klant 3 → Depot</i>	198,49
<b>Totaal</b>		<b>497,39*</b>

## Auteursrechtelijke overeenkomst

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

**Rittenplanning voor voertuigen met alternatieve brandstoffen**

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

Jaar: **2014**

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,

**Corstjens, Jeroen**

Datum: **27/05/2014**