

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

2010
2011

Masterproef

Congestievermijdende transportplanning

Promotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Copromotor :
dr. An CARIS

Kristof Liesens

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

universiteit
▶▶ hasselt

UNIVERSITEIT VAN DE TOEKOMST

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

universiteit
▶▶ hasselt

UNIVERSITEIT VAN DE TOEKOMST

2 0 1 0
2 0 1 1

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

Masterproef

Congestievermijdende transportplanning

Promotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Copromotor :
dr. An CARIS

Kristof Liesens

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

Voorwoord

Deze eindverhandeling vormt het sluitstuk van mijn opleiding tot Handelsingenieur in de Bedrijfseconomische Wetenschappen, afstudeerrichting Operationeel Management en Logistiek met optie Marketing, aan de Universiteit van Hasselt.

Alvorens over te gaan tot de uiteenzetting van mijn eindverhandeling, zou ik graag enkele woorden van dank willen uitspreken voor de personen die mij geholpen hebben bij de verwezenlijking ervan.

Eerst en vooral wil ik mijn dank betuigen aan Dr. An Caris voor haar deskundige raadgevingen en begeleiding van deze eindverhandeling. Daarnaast wil ik ook mijn vrienden bedanken voor de constante steun tijdens het schrijven van deze thesis. Dan wil ik mijn oprechte dank betuigen aan mijn vriendin, die regelmatig deze eindverhandeling heeft nagelezen.

Tot slot wil ik mijn ouders bedanken voor de kans die ze mij gegeven hebben om deze studie van Handelsingenieur in de Bedrijfseconomische Wetenschappen succesvol te doorlopen.

Samenvatting

Dit eindwerk behandelt het onderwerp "Congestievermijdende transportplanning". De essentie van een transportplanning waarin zowel ophaling als levering mogelijk is, bestaat uit het opmaken van een verzameling van routes, zodat transportverzoeken, bestaande uit een ophaling en/of levering, naar tevredenheid van de klanten kan worden afgehandeld.

Het eerste hoofdstuk van deze eindverhandeling bevat een inleiding over de materie, waarin ook de onderwerpkeuze wordt gemotiveerd en het onderzoeksopzet kort wordt uitgelegd.

Met hoofdstuk twee begint de uitwerking van de literatuurstudie. Het woord "congestie" wordt hier uitgelegd en ook de implicaties van dit fenomeen passeren de revue. Eerst wordt kort besproken wat congestie precies is, vervolgens wordt gekeken naar de oorzaken en effecten die congestie heeft op verschillende gebieden, zoals de mens en het milieu. Ten slotte wordt de impact die congestie heeft op bedrijfsactiviteiten besproken.

Het derde hoofdstuk gaat dieper in op de mogelijke oplossingen voor het congestieprobleem. In de literatuur worden vier oplossingen vaak aangehaald om het probleem te verminderen of weg te werken. Vooral de eerste oplossing, rekeningrijden, komt vaak terug in de literatuur. Rekeningrijden is het betalen van tol om tot een bepaalde weg of gebied toegelaten te worden. De andere oplossingen zijn parkeerpolitiek, nachtritten en ramp metering. Bij elke oplossing zullen de voor- en nadelen besproken worden, net als implementaties van de oplossing.

In het vierde hoofdstuk wordt een specifiek aspect van de logistieke sector besproken, namelijk stadsdistributie. Eerst wordt een definitie van dit aspect gegeven, waarna het belang en de problemen aan bod komen. Het laatste deel van dit hoofdstuk is de bespreking van de oplossingen van stadsdistributie. Enkel de in het derde hoofdstuk aangehaalde oplossingen zullen worden besproken.

Het vijfde hoofdstuk behandelt het werkelijke doel van deze thesis, namelijk de modellering van congestie in de rittenplanning. Allereerst komt een literatuurstudie van het

rittenplanningsprobleem aan bod. Hier worden de vier klassieke rittenplanningsproblemen behandeld. De aandacht gaat vooral uit naar het rondritplanningsprobleem of 'Vehicle Routing Problem'. Dit onderwerp wordt uitgebreid besproken met een opdeling van exacte algoritmes, lokale zoekmethoden en metaheuristieken als mogelijkheden om het VRP op te lossen. Dan worden de drie andere rittenplanningsproblemen kort besproken. Vervolgens wordt de bemerking gemaakt dat deze klassieke problemen allemaal hetzelfde probleem hebben, namelijk dat reistijden tijdsonafhankelijk en proportioneel aan de reisafstanden zijn. Een specifieke sectie wordt dan besteed aan het rittenplanningsprobleem dat wel rekening houdt met congestie, namelijk Time Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP). Eerst wordt het probleem besproken, daarna de mogelijke oplossingen. Dit zijn vaak dezelfde oplossingen als voor het VRP, maar dan aangepast aan congestie.

Hoofdstuk zes vormt het praktische gedeelte van deze eindverhandeling. Eerst wordt het probleem geformuleerd dat als voorbeeld zal dienen doorheen dit hoofdstuk. Het probleem is een TDVRP met tijdsintervallen waarin de tijden tussen twee locaties kunnen verschillen. Vervolgens wordt een heuristische oplossingsprocedure voorgesteld, waarna deze procedure geïllustreerd wordt met het voorbeeld. Dan worden een aantal lokale zoekmethoden voorgesteld, die toegepast zullen worden op deze initiële oplossing om zo tot een betere oplossing te komen. Hieruit blijkt een combinatie van verscheidene heuristieken beter te werken dan één heuristiek. Ten slotte volgen de conclusie en een aantal bemerkingen met het oog op verder onderzoek.

Inhoudopgave

VOORWOORD	3
SAMENVATTING	5
HOOFDSTUK 1. INLEIDING	11
1.1. MOTIVERING ONDERWERP	11
1.2. ONDERZOEKSOPZET	12
HOOFDSTUK 2. CONGESTIE	15
2.1. OORZAKEN VAN CONGESTIE	16
2.1.1. <i>Welvaart</i>	16
2.1.2. <i>Misperceptie van alternatieven</i>	16
2.2. NEGATIEVE IMPACT VAN CONGESTIE	18
2.2.1. <i>Impact op de mens</i>	18
2.2.2. <i>Impact op het milieu</i>	18
2.2.3. <i>Impact op de bedrijfsactiviteiten</i>	19
2.2.4. <i>Impact op de logistieke sector</i>	21
HOOFDSTUK 3. OPLOSSINGEN VOOR CONGESTIE	25
3.1. REKENINGRIJDEN	25
3.1.1. <i>Toepassingen van rekeningrijden</i>	27
3.1.2. <i>Impact van rekeningrijden</i>	28
3.1.3. <i>Voor- en nadelen van rekeningrijden</i>	30
3.1.4. <i>Conclusie</i>	34
3.2. PARKEERPOLITIEK	34
3.3. NACHTRITTEN	36
3.3.1. <i>Implementatie nachtlevering</i>	36
3.3.2. <i>Voor- en nadelen nachtleveringen</i>	37
3.4. RAMP METERING	38
3.4.1. <i>Implementatie ramp metering</i>	39
3.4.3. <i>Voor- en nadelen ramp metering</i>	40

HOOFDSTUK 4. STADSDISTRIBUTIE	43
4.1. DEFINITIE.....	43
4.2. BELANG STADSDISTRIBUTIE	44
4.3. PROBLEMEN ROND STADSDISTRIBUTIE.....	45
4.4. OPLOSSINGEN VAN STADSDISTRIBUTIE.....	46
HOOFDSTUK 5. MODELLEREN VAN CONGESTIE IN RITTENPLANNING.....	51
5.1. INLEIDING	51
5.2. VEHICLE ROUTING PROBLEM (VRP)	52
5.2.1. Algemeen	52
5.2.2. Oplossingsmethoden van VRP: exacte methoden.....	52
5.2.3. Oplossingsmethoden van VRP: heuristieken.....	55
5.2.4. Oplossingsmethoden van VRP: metaheuristieken.....	57
5.3. VARIANTEN VAN VRP.....	59
5.3.1. Capacitated Vehicle Routing Problem	59
5.3.2. Vehicle Routing Problem with Time Windows	59
5.3.3. Pickup and Delivery Problem.....	63
5.4. TIME DEPENDENT VEHICLE ROUTING PROBLEM (TDVRP).....	64
5.4.1. Algemeen	64
5.4.2. Oplossingsmethoden.....	65
5.4.3. Conclusie.....	71
HOOFDSTUK 6. PRAKTIJKSTUDIE	73
6.1. BESCHRIJVING NETWERK	73
6.2. TIME DEPENDENT NEAREST-NEIGHBOR HEURISTIEK.....	77
6.3. LOKALE ZOEKMETHODEN.....	80
6.3.1. Or-opt operator	81
6.3.2. Relocate operator.....	84
6.3.3. Exchange operator	91
6.3.4. Verschuiving startuur.....	98
6.3.5. Combinatie van operatoren: relocate operator, exchange operator en verschuiving van het startuur	100

6.4. CONCLUSIE	102
6.5. BEMERKINGEN.....	103
LIJST DER GERAADPLEEGDE WERKEN	105
BIJLAGEN	115
BIJLAGE 1: LIJST DER GEBRUIKTE FIGUREN	115
BIJLAGE 2: LIJST DER GEBRUIKTE TABELLEN	115

Hoofdstuk 1. Inleiding

1.1. Motivering onderwerp

In het kader van het schrijven van mijn eindverhandeling, tot het behalen van de graad handelsingenieur, koos ik voor het onderwerp "Congestievermijdende transportplanning". De keuze voor dit onderwerp komt voort uit mijn persoonlijke interesse voor logistiek en vanuit mijn gegroeide interesse voor de planning. Bij rittenplanning wordt een set van routes, één per vrachtwagen, geconstrueerd zodat transportverzoeken naar tevredenheid van de klanten worden afgehandeld. Het is economisch gezien belangrijk dat deze set van routes zo weinig mogelijk kosten voor het bedrijf.

Het eerste woord van dit onderwerp sprak mij vooral aan bij de keuze voor dit onderwerp. Aan het woord congestie wordt de laatste tijd veel aandacht aan besteed in de pers. Vertraagd verkeer, files en verkeershinder zijn in de westerse welvaartsmaatschappij een dagelijks probleem met niet te onderschatten gevolgen. Sinds de jaren '60 is het aantal auto's op de baan continu blijven stijgen – tegenwoordig heeft één op de twee personen in de Europese Unie een auto en worden tachtig tot negentig procent van al onze passagierskilometers met de wagen afgelegd. De Verenigde Staten scoren nog hoger dan Europa, dus het ligt voor de hand dat ook bij ons het aantal auto's op de wegen zal blijven stijgen. In landen die zich nog aan het ontwikkelen zijn, is het hebben van een auto vooral een teken van rijkdom en sociale status. In de meeste West-Europese landen is het bezit van een eigen wagen vanzelfsprekend geworden. Dat zorgt weer voor een groeiend aantal auto's, met als bekende gevolg de toenemende verkeersproblemen. De verstopping van de verkeersinfrastructuur door een overmaat aan gemotoriseerd verkeer wordt aangeduid als "congestie". (Kingham et al., 2001; van Exel en Rietveld, 2009; Goh, 2002)

Naargelang de plaats kunnen twee soorten verkeerscongestie worden onderscheiden: congestie in grote steden ("stadsdistributie") en congestie op autosnelwegen. Vooral rond het tweede type wordt veel onderzoek gedaan met het oog op mogelijke oplossingen. Filevorming op de autostrades doet zich vooral voor tijdens de zogenaamde piekuren, waarop zeer veel mensen van en naar hun werk pendelen. Deze piekuren zijn doorheen de jaren zowel in tijdsduur als intensiteit toegenomen. (van Exel en Rietveld, 2009)

Transport is natuurlijk een belangrijk onderdeel van het huidige verkeer en zeker vrachtvervoer wat deze thesis behandelt. De omzet van goederenvervoer in Europa wordt geschat op ongeveer 168 miljard dollar per jaar. In Groot-Brittannië vertegenwoordigt transport bijvoorbeeld ongeveer 15% van de nationale uitgaven. Bijna de helft van de totale logistieke kosten worden vertegenwoordigd door distributiekosten en in sommige industrieën loopt dit zelfs nog meer op. (Bräysy en Gendreau, 2005a)

Het belang van een efficiënte rittenplanning kan niet genoeg benadrukt worden, want transport heeft tevens een effect op het milieu door de uitstoot van uitlaatgassen. Dit heeft de laatste tijd ook aandacht gekregen in de pers en heeft zelfs geleid tot de ontwikkeling van milieuvriendelijke wagens. De impact die congestie heeft op het milieu mag zeker niet onderschat worden, want door het herhaardelijk optrekken en stoppen wordt in een file veel meer uitgestoten. (Reckien et al, 2007; Chin, 1996)

1.2. Onderzoeksopzet

In het eerste deel van deze eindverhandeling wordt aan de hand van een literatuurstudie een verkennend onderzoek uitgevoerd naar de term congestie en de impact van congestie op de maatschappij. Daarna wordt dieper ingegaan op de verschillende soorten rittenplanningsproblemen. Vanuit deze literatuurstudie wordt geopteerd om één specifiek soort van rittenplanningsprobleem verder uit te werken in een praktijkstudie.

In samenspraak met Dr. An Caris werd geopteerd om het Time Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows nader te bestuderen. Vanuit de beschrijving van dat probleem wordt overgegaan op de bespreking van eenzelfde type probleem uitgebreid met tijdsintervallen. Eerst wordt nagegaan welke heuristiek op dit probleem kan worden toegepast om een initiële oplossing te vinden. Daarna wordt gezocht naar lokale heuristieken die deze oplossing kunnen verbeteren. De heuristieken die in samenspraak met Dr. An Caris gekozen worden kunnen teruggevonden worden in Bräysy en Gendreau (2005a).

Er werd geopteerd om niet te werken met veel en/of grote experimenten zodat het trekken van algemene conclusies in deze eindverhandeling geen mogelijkheid vormt. De voorbeelden dienen enkel ter ondersteuning van de beschreven en ontwikkelde procedures en tonen hoe deze technieken in praktijk worden toegepast.

Hoofdstuk 2. Congestie

Allereerst is een korte uitleg bij het begrip congestie aan de orde. De definitie die in deze thesis gehanteerd zal worden, luidt als volgt: verkeerscongestie is de toestand van verkeersvertraging (waarbij de stroom van voertuigen vertraagd wordt onder redelijke snelheden) die ontstaat omdat het aantal voertuigen dat gebruik wil maken van de wegen groter is dan de capaciteit van het wegennetwerk. (Weisbrod et al., 2001)

Congestie heeft een aantal belangrijke dimensies van variatie. Ten eerste is er het ruimtelijke patroon dat gebiedsgewijs of locatiespecifiek kan zijn. In de winter kan bijvoorbeeld door ijsvorming een file ontstaan doorheen heel het land, wat een vorm is van gebiedsgewijze congestie. Bij een ongeluk daarentegen ontstaat filevorming op een specifieke locatie. Ten tweede kan ook het tijdelijk patroon van verkeerscongestie variëren: congestie op regelmatige basis volgens voorspelbare tijden, zoals ochtend- en avondspits, staat tegenover incidentele congestie, bijvoorbeeld wanneer ergens een auto-ongeval heeft plaatsgevonden. (Balseiro et al., 2011; Weisbrod et al., 2001)

Vroeger werd congestie niet gezien als een groot probleem. Vertragingen bij goederenleveringen werden bijvoorbeeld vaker geweten aan een technisch probleem met de wagen, aan menselijke fouten of de weersomstandigheden, dan aan verkeershinder. Congestie is lang een zwaar onderschat probleem geweest. (McKinnon, 1999; McKinnon et al., 2009)

Ten gevolge van die onderschatting ondernamen bedrijven weinig om congestie tegen te gaan. Bovendien waren de vertragingen die ze door files opliepen relatief klein ten opzichte van de procestijden van de te leveren goederen, waardoor ze voor die congestie een adequate buffer hadden. Wanneer nodig maakte een bedrijf kleine aanpassingen om de vertragingen op te vangen, dan moesten bijvoorbeeld de werknemers overuren maken. De graad van flexibiliteit van het bedrijf was in ieder geval te groot om een herverdeling van bronnen te overwegen: door te goochelen met de werkuren en werkdruk van de werknemers kon de invloed van vertraging door congestie op de voorraadkosten steeds minimaal gehouden worden. Dat is later echter moeilijker en moeilijker gebleken, omdat ook

de omvang van het congestieprobleem alsmar toenam. Er is voor het probleem door de jaren heen dan ook steeds meer aandacht gekomen. (McKinnon, 1999; van Exel en Rietveld, 2009)

In onderstaande paragrafen worden zowel de oorzaken als de gevolgen van congestie aangehaald.

2.1. Oorzaken van congestie

2.1.1. Welvaart

Zoals eerder aangehaald is er een stijgend aantal auto's opgemerkt op de Europese wegen. Eén op de twee personen heeft tegenwoordig een wagen en er wordt maar liefst tussen de 80 en 90 percent van alle afgelegde kilometers met de auto afgelegd. Tevens wordt een auto gezien als een teken van rijkdom en sociale status in ontwikkelende landen. In West-Europa is het gebruik van een auto vooral een gewoonte geworden. Men gebruikt er de auto vaker dan strikt noodzakelijk, waardoor het aantal auto's op de wegen radicaal gestegen is. Deze trends hebben gezorgd voor het toenemend probleem dat als congestie bestempeld wordt. Een andere oorzaak van congestie kan gevonden worden is de misperceptie van de alternatieven, die in volgende paragraaf wordt besproken. (Kingham et al., 2001; van Exel en Rietveld, 2009, Goh, 2002)

2.1.2. Misperceptie van alternatieven

In wat volgt zal de frequente onderwaardering van alternatieven zoals het openbaar vervoer besproken worden, als congestie-stimulerend fenomeen.

Zodra iemand kiest voor een bepaald vervoersmiddel om op al dan niet regelmatige basis bepaalde bestemmingen te bereiken, zal hij niet langer uitkijken naar mogelijke alternatieven, zelfs wanneer die alternatieven voordeliger zijn dan de gekozen transportmodus (van Exel en Rietveld, 2009; Liu et al., 2010). Die mispercepties zorgen niet enkel voor een barrière voor de keuze van de transportmodus, maar hebben ook tot gevolg dat men zich niet langer informeert over alternatieve transportmodi, meer bepaald met

betrekking tot kosten, reisduur, comfort en eventuele andere voordelen. Wanneer die zaken niet in rekenschap worden gebracht, zal vaak een transportmodus gekozen worden die niet de beste is. (Liu et al., 2010; Kenyon en Lyons, 2003)

Mispercepties ontstaan wanneer mensen een subjectieve keuzeset van alternatieven hebben waaruit ze hun beslissingen maken, een keuzeset die niet alle beschikbare transportmogelijkheden omvat. Er is een groot verschil tussen een objectieve en een subjectieve keuzeset: de objectieve keuzeset of opportunitenset van een persoon wordt bepaald door de bestemming, de alternatieve vervoersmiddelen en het vermogen van de persoon in kwestie om bepaalde vervoersmiddelen te gebruiken, terwijl de subjectieve set slechts bestaat uit de alternatieven waarvan de persoon zich bewust is en die hij zelf acceptabel en realiseerbaar vindt. Uit deze keuzeset, die maar een selectief deel van de totale keuzeset uitmaakt, wordt de uiteindelijke transportmodus gekozen. Hoeveel alternatieven er in de subjectieve keuzeset worden opgenomen verschilt van persoon tot persoon (van Exel en Rietveld, 2009; Mokhtarian en Salomon, 1997; Wardman en Tyler, 2000).

Een belangrijk kenmerk van mispercepties is het gebrek aan evaluaties van de verscheidene alternatieven. Vaak wordt het vervoersmiddel slechts geëvalueerd wanneer de persoon in kwestie een belangrijke gebeurtenis meemaakt in zijn leven, zoals een verhuizing of verandering van werkplaats. Wanneer mensen een misvatting hebben van de reistijden van alternatieve transportmodi – de reistijden van het openbaar vervoer worden dikwijls overschat – zal die misvatting vaak lang aanslepen, juist omdat de verschillende vervoersmiddelen niet vaak genoeg vergeleken en geëvalueerd worden (van Exel en Rietveld, 2009; Kingman, 2001). Vooral het openbaar vervoer wordt daardoor doorgaans het meest benadeeld: bussen, treinen en trams worden standaard beschouwd als onbetrouwbaar, inefficiënt en lastig om te gebruiken. (Goh, 2002)

2.2. Negatieve impact van congestie

Verkeerscongestie heeft een negatieve impact op verschillende gebieden, die hier gegroepeerd zullen worden in vier kapitels: de mens, het milieu, bedrijfsactiviteiten en logistiek.

2.2.1. Impact op de mens

De mens is de eerste logische gevolgdrager van congestie. Vrijwel alle mensen ondervinden er last van. Congestie kost tijd, tijd die men liever in nuttigere zaken zou investeren. Er gaat door congestie dus in feite een deel van de kwaliteit van het leven verloren. (Weisbrod et al., 2001)

Een ander gevolg van files is stress. Stress zorgt ervoor dat in het menselijk lichaam stoffen zoals cortisol en adrenaline geproduceerd worden. Hierdoor verhogen de bloeddruk en het hartritme. Een bijkomend negatief effect van cortisol is trouwens de remming van het immuunsysteem. Als iemand uren per dag wordt blootgesteld aan stress en dus een verhoogde bloeddruk en hoger ritme ervaart, zorgt dat voor een verhoogd risico op vaatbeschadiging en hartproblemen. Onder stress wordt men sneller ziek en is de kans op een infectie groter. Dat heeft te maken met de hierboven al vermelde immunosuppressie. Net als tijdverlies heeft stress dus een duidelijke negatieve impact op de kwaliteit van het dagelijks leven. (Golob en Regan, 2000; Boron en Boulpaep, 2003)

Ten slotte veroorzaken verkeersvertragingen een verhoogde agressiviteit bij veel chauffeurs. Het gevolg daarvan is onder andere een hogere snelheid op banen die wél vrij zijn van congestie. Dat is niet bepaald bevorderlijk voor de veiligheid van de bestuurder en van andere weggebruikers. (Mesken et al., 2007)

2.2.2. Impact op het milieu

De invloed van pollutie door gemotoriseerd verkeer op het milieu en de menselijke gezondheid is een veel onderzocht concept. De voornaamste schadelijke stoffen die uit

auto's komen, zijn lood (Pb), PM's, koolstofmonoxide (CO), sulfaatdioxide (SO₂), stikstofoxides (NO_x), waterstofkoolstoffen (HC), ozon en toxische substanties. (Chin, 1996)

Het verkeer heeft een onvermijdelijke impact op het milieu en vooral op de luchtkwaliteit, die door de verhoogde emissies van de voertuigen alsmaar verslechtert. Een studie in Berlijn (Reckien et al., 2007) heeft aangetoond dat er een duidelijk verband bestaat tussen de hoeveelheid CO₂ die de lucht op een bepaalde plaats bevat, en de gemiddelde drukte van het gemotoriseerd verkeer op die plaats. De CO₂-emissie van auto's heeft dus duidelijk een negatieve impact op het milieu. In Singapore was in 1994 al 65 percent van alle pollutie van automobilisten afkomstig. Ongeveer 80 percent van alle broeikasgassen in de lucht zijn afkomstig van gemotoriseerd wegverkeer. Dat een vermindering van het verkeer zeer bevorderlijk zou zijn voor het milieu, mag met recht een understatement worden genoemd. (Chin, 1996; Jayaratne et al., 2010; Reckien et al., 2007; Ockwell, 2002)

Congestie maakt de zaken er niet beter op. Bij filevorming komen motorvoertuigen herhaaldelijk tot stilstand, om vervolgens weer te moeten accelereren, wat veel meer uitstoot teweegbrengt dan wanneer een constante snelheid aangehouden wordt. (Jayaratne et al., 2010)

Onderzoek naar de CO₂-uitstoot van bussen heeft eveneens aangetoond dat er veel meer uitstoot ontstaat bij bussen die rijden in een stad waar veel congestie is, omdat die regelmatig moeten stoppen en vertrekken. Verder speelt het een rol of de bus met benzine of met diesel rijdt: benzine is minder vervuilend dan diesel. Wat geldt voor bussen geldt uiteraard eveneens voor andere voertuigen – ook bij vrachtwagens en gewone personenwagens ligt dus de uitstoot allicht hoger bij filevorming dan in vlot verkeer. (Goh, 2002; Jayaratne et al., 2010; Reckien et al., 2007)

2.2.3. Impact op de bedrijfsactiviteiten

Naast de hierboven beschreven gevolgen van congestie voor mens en milieu is er ook nog de negatieve impact op bedrijfsactiviteiten, die van alle gevolgen voor deze thesis het meest

relevant is. Bedrijfsactiviteiten worden door congestie beïnvloed vanwege additionele kosten en verminderde capaciteit. (Weisbrod et al., 2001)

De additionele kosten variëren voor elk type bedrijf en kunnen dus niet aan de hand van traditionele methodes worden onderzocht. Bovendien worden de bedrijven die het zwaarst lijden onder de toenemende congestieproblemen doorgaans uit de markt weggeconcurrerd, zodat hen achteraf niet meer gevraagd kan worden welke de belangrijkste additionele kosten waren die congestie met zich meebracht. Ook berekenen veel bedrijven congestiekosten niet langer apart: om voorspelbare congestieproblemen een stap voor te zijn, incorporeren ze die op voorhand in hun algemene kostenplaatje. Dat maakt het moeilijk om nog te achterhalen welke kosten met congestie te maken hebben. Om bovenstaande problemen op te lossen, heeft men een aantal modellen ontwikkeld waardoor er een onderscheid gemaakt kan worden tussen verschillende bedrijven, bijvoorbeeld door gebruik te maken van congestie-indexen. (Weisbrod et al., 2001; McKinnon et al., 2009; McKinnon, 1999)

Hoe kunnen de additionele kosten nu opgedeeld worden? Er zijn al veel artikels verschenen die een antwoord leveren op die vraag, maar telkens vanuit een andere visie (Figliozzi, 2010; Weisbrod et al., 2001; McKinnon, 1999). Algemeen wordt aangenomen dat er twee grote groepen van congestie-kosten zijn: een groep directe en een groep indirecte kosten. Onder directe kosten verstaat men bijvoorbeeld de daling van de kosten van productie wanneer de congestie vermindert. Door die vermindering kan men sneller en dus ook goedkoper op een bepaalde bestemming geraken, waardoor de kosten lager liggen. Tot de indirecte kosten behoort bijvoorbeeld het verlies van efficiëntie in productie- en/of distributieoperaties, veroorzaakt door de moeilijk in te schatten timing van de levering. Bedrijven hebben lange tijd niet met deze indirecte kosten rekening gehouden. De directe kosten hadden al in 1996 een waarde van £1,2 biljoen (of €1,52 biljoen), wat neerkwam op 3,8 percent van alle transportkosten. Door de jaren heen is het probleem enkel erger geworden, zodat logischerwijs ook de kosten vandaag de dag nog hoger liggen. (Weisbrod et al., 2001; McKinnon, 1999; Van Exel en Rietveld, 2009)

2.2.4. Impact op de logistieke sector

Na bovenstaande toelichting bij de impact van congestie op bedrijfsactiviteiten, zullen nu nog specifiek de additionele kosten voor de logistieke sector besproken worden. Het is de taak van een logistieke manager van een bedrijf om rekening te houden met een aantal beperkingen en vereisten, zoals de capaciteit en het type van de voertuigen ter beschikking, de werkuren van de chauffeurs, etc. (Bodin, 2003; Kok, 2010). Ook verkeerscongestie zal dus duidelijk een grote impact hebben op de planning van de logistieke manager. In wat volgt zullen de belangrijkste gevolgen van congestie voor de logistiek de revue passeren.

Om te beginnen oefent verkeerscongestie een invloed uit op de gemiddelde reistijd van chauffeurs¹. Die reistijd kan worden opgesplitst in twee delen: de tijd die een chauffeur nodig heeft om van de ene stopplaats naar de andere te rijden en de tijd die hij of zij gebruikt om goederen te laden en te lossen. Dat laatste deel van de reistijd kan worden gezien als een constante en wordt dus niet beïnvloed door congestie. De tijd die nodig is om afstanden tussen stopplaatsen af te leggen zal daarentegen bij verkeerscongestie langer worden. Bijgevolg zullen meer voertuigen, chauffeurs of werkuren moeten worden betaald om bepaalde deadlines te halen. Als alternatief zouden de deadlines zelf kunnen worden aangepast, maar dat ligt meestal moeilijker, vanwege vereisten en beperkingen waaraan elke planning moet voldoen. (Figliozzi, 2010; Golob en Regan, 2000)

Er zijn bij filevorming ook additionele kosten door de onzekerheid van de reistijd: vaak is het in files niet duidelijk hoelang het zal duren om van stopplaats A naar stopplaats B te gaan. Bij opgelopen vertraging in files zijn een aantal reacties mogelijk, maar hogere kosten en een lagere winst zijn in ieder geval onvermijdelijk. Een bedrijf kan bijvoorbeeld een langere reistijd inschatten dan nodig, om te garanderen dat alle goederen op tijd geleverd worden, ook in geval van verkeerscongestie. Ook kan het bedrijf nieuwe voertuigen aankopen om de onzekerheid te verminderen, al is dat niet de meest populaire oplossing. (Figliozzi, 2010; McKinnon et al., 2009)

¹ Er zal in deze thesis steeds vanuit de hypothetische situatie vertrokken worden waarin het bedrijf in kwestie een depot ter beschikking heeft, en de chauffeurs tijdens hun shift meerdere tussenstops moeten maken.

Wanneer bedrijven hun planning en metingen aanpassen om op voorhand het effect van congestie op hun voertuigen tegen te gaan, wordt het moeilijker voor onderzoekers om de additionele kosten van de verschillende leveranciers te kwantificeren. De impact die congestie heeft op deze leveranciers is erg afhankelijk van de ligging van het depot. Ook de route van de chauffeurs is relevant, meer bepaald het aantal stops en de afstand tussen elke stop. Ten slotte zijn ook de karakteristieken van de klantendienst van groot belang, voornamelijk zijn tijdsvensters. Al die eigenschappen verschillen sterk tussen verschillende leveranciers. (Figliozzi, 2010)

Wat ook niet uit het oog mag worden verloren zijn benzine- en arbeidskosten. Ook dat zijn kosten die rechtstreeks in verband staan met congestie. Meer congestie betekent bijvoorbeeld meer benzine voor de verschillende voertuigen, omdat zoals eerder vermeld benzineverbruik het grootst is bij vertrek uit stilstand. Ook de arbeidskosten stijgen wanneer chauffeurs in de file staan, omdat ze langer zullen moeten rijden en eventueel overuren moeten maken. Een bedrijf zal om congestie het hoofd te bieden ook bij voorkeur flexibele werknemers aannemen, die multi-inzetbaar zijn, maar een flexibele werknemer kost meer dan een gewone werknemer, wat de arbeidskosten enigszins doet stijgen. (Jayaratne et al., 2010; Figliozzi, 2010; McKinnon, 1999; Green et al., 2010; Liu et al., 2010)

Terzijde moet nog worden opgemerkt dat de uiteindelijke monetaire impact van congestie, vanuit het standpunt van de leverancier, afhankelijk is van hoeveel hij kan doorschuiven naar andere spelers op de supply chain, en dat congestie doorgaans een grotere invloed heeft wanneer de afstanden die afgelegd moeten worden tussen depot en stopplaatsen groter zijn (Figliozzi, 2010; Holguin-Veras et al., 2006). Hierover later meer.

De verschillende kosten voor een logistiek bedrijf of distributiebedrijf zijn nu besproken, maar over de meting van deze kosten is nog niets gezegd. Wel is al vermeld dat congestie-indexen gebruikt kunnen worden om directe en indirecte kosten te meten, maar deze methode wordt in de logistiek niet zo vaak toegepast. Vroeger werden drie manieren gebruikt om de indirecte kosten te meten bij logistieke operaties. (McKinnon, 1999)

Een eerste methode is de vermenigvuldiging van de geldwaarde die wordt toegekend aan tijd met de totale kosten die worden veroorzaakt door congestie-gerelateerde vertragingen. Een tweede methode is het toekennen van een monetaire eenheid aan de betrouwbaarheid, om zo een indicatie van de indirecte kosten te verkrijgen. Het probleem van beide methodes is dat ze ervan uitgaan dat de logistieke managers voldoende informatie hebben om accurate schattingen te maken van congestie-gerelateerde kosten. Zoals al vermeld is dat niet altijd het geval, maar door evoluties in de methodologie van de kostenmeting kan dat probleem tegenwoordig vaak worden opgelost (McKinnon, 1999; Weisbrod et al., 2001). Een derde methode, die volledig losstaat van de eerste twee, is het ondervragen van de logistieke managers van een bedrijf via een in-depth interview, zodat achterhaald kan worden wat de grote problemen zijn in dat bedrijf. Logistieke managers worden regelmatig met het congestieprobleem geconfronteerd, dus mogelijk is dit de meest accurate methode van de drie. Het is echter ook de meest tijdrovende: het kost de onderzoeker veel tijd om met elke manager van een bedrijf individueel overleg te plegen over de problemen in dat bedrijf. (McKinnon, 1999; Sekeran, 2003)

Ten slotte nog dit: men veronderstelde aanvankelijk dat congestie ook voorraadkosten zou beïnvloeden, namelijk omdat bedrijven meer voorraad zouden moeten inslaan om aan de variabiliteit van de vertragingen te voldoen. Uit studies is echter gebleken dat dit niet het geval is. De onderzochte bedrijven hadden helemaal geen aanpassingen gedaan in hun voorraad, omdat zelfs de ergste vertragingen die ze door congestie konden oplopen relatief klein waren ten aanzien van hoelang een product gemiddeld in een opslagplaats blijft liggen. (McKinnon, 1999; McKinnon et al., 2009)

In volgende hoofdstuk worden de mogelijke oplossing van congestie besproken. Deze oplossingen zijn algemene oplossingen die een impact hebben op alle automobilisten. Ze houden dus nog geen rekening met het plannen van de ritten, dat later aan bod zal komen.

Hoofdstuk 3. Oplossingen voor congestie

Er is natuurlijk niet enkel onderzoek gedaan naar oorzaken en gevolgen van verkeerscongestie, maar ook naar mogelijke oplossingen. Vroeger veronderstelde men dat het probleem kon worden opgelost door meer lanen toe te voegen aan de autosnelwegen, maar al snel werd ingezien dat dit geen langetermijnoplossing was, hoewel het onder vrachtwagenchauffeurs nog steeds als zeer verkieslijk wordt beschouwd. Er werd gezocht naar nieuwe oplossingen om de verkeersstroom enigszins te controleren, rekening houdend met de capaciteit van het gehele infrastructurele systeem. In dit deel wordt een samenvattende opsomming gegeven van de belangrijkste oplossingen: rekeningrijden, parkeerpolitiek, nachtritten en ramp metering. (Kamel et al., 2009; Golob en Regan, 2000; Goh, 2002)

3.1. Rekeningrijden

Het gebruik van rekeningrijden, waarbij bestuurders van gemotoriseerde voertuigen tol betalen om de wegen te mogen gebruiken, is een optie waar veel onderzoek naar is gedaan. Het principe van rekeningrijden heeft tegen- maar ook voorstanders. Velen beschouwen tolrijden als de ultieme oplossing voor het congestieprobleem. Bij rekeningrijden wordt een reeks effectieve tolpatronen gezocht om de verkeersstroom tot op het streefniveau te doen afnemen, door chauffeurs geld te vragen voor het gebruiken van bepaalde wegen. Dat zet de mensen aan tot reflectie over de kosten en problemen die het surplus aan weggebruikers meebrengt voor de samenleving en moedigt ze af om onnodig gebruik te maken van de tolwegen. (Hau, 1992; Holguin-Veras et al., 2006; Ockwell, 2002; Verhoef et al., 1997; Yang et al., 2010)

Een belangrijke toepassing van de economische theorie van rekeningrijden is de zogenaamde marginale kostprijsing, een model dat steunt op de theorie dat de additionele kosten of de externaliteit van congestie die een weggebruiker aan anderen oplegt (sociale kosten) geïnternaliseerd kunnen worden door tol te vragen, zodat het gebruikersevenwicht wordt opgevoerd naar een systeemoptimum. Om de optimale tol te kunnen bepalen moet rekening worden gehouden met zogenaamde sociale en private kosten. Private kosten

bestaan uit de waarde die bestuurders schenken aan hun reistijd en aan operationele voertuigkosten. Sociale kosten vormen de som van die private kosten met eventuele externe kosten. Wanneer het verkeersvolume stijgt, moeten weggebruikers in toenemende mate hun snelheid aanpassen aan de verkeerssituatie en gaan de private kosten dus afwijken van de sociale kosten. De externe kosten komen in dit geval overeen met de door congestie opgelopen vertragingen. De optimale tol die in een gecongesteerd verkeersnetwerk kan worden geheven verschilt per tolweg en is in theorie steeds gelijk aan het verschil tussen de marginale sociale kosten en de marginale private kosten op die tolweg. (Langer en Winston, 2008; Yang et al., 2010)

Om tolprijzen te bepalen, moet het congestieprobleem worden voorgesteld als een kwestie van het optimaliseren van een sociaal verkeersevenwicht. De volledige optimalisering is helaas een utopie, dus het rekeningrijden is als oplossing voor het congestieprobleem niet voldoende (Yang et al., 2010). Het sociaal verkeersevenwichtsprobleem is onoplosbaar en daarom wordt gebruik gemaakt van "tweede beste systemen". Door constant rekening te houden met het verschil tussen de sociale en private kosten wordt wel steeds geprobeerd om zoveel mogelijk te neigen naar het model van de marginale kostenprijsing. (Verhoef et al., 1997; Yang et al., 2010)

Om de tolprijs te bepalen wordt een functie $f(y)$ opgesteld voor de optimale prijs, waarvan de waarde bepaald wordt door oorsprong-bestemmingsfuncties, de bereidheid van bestuurders om te betalen, etc.. Vooral de bereidheid tot betaling blijkt in veel bronnen naar voor te komen als belangrijke factor. Wanneer die bereidheid (uitgedrukt in geldwaarden) hoger ligt, zal immers meer gebruik gemaakt worden van de tolwegen. Natuurlijk is het niet eenvoudig om al de prijsbepalende factoren te achterhalen, omdat niet alle informatie beschikbaar is. Vooral het vinden van de oorsprong-bestemmingsfuncties blijkt in praktijk een ontzettend moeilijke opgave. Om dit te omzeilen, kan een "trial-and-error"-systeem toegepast worden. Die oplossing is al sinds 1993 in omloop en is doorheen de jaren geoptimaliseerd, zodat men tegenwoordig relatief eenvoudig en consequent de tolprijs kan bepalen. (Yang et al., 2010; Verhoef et al., 1997; Vickrey, 1993)

3.1.1. Toepassingen van rekeningrijden

Vandaag de dag is al in veel gebieden een tolsysteem ingevoerd. Bekend zijn de tolwegen in Frankrijk (corridor tolsysteem), maar ook in bijvoorbeeld Singapore wordt met een tolsysteem gewerkt, meer bepaald een cordon tolsysteem. In het cordon tolsysteem moeten de weggebruikers betalen om een bepaald gebied binnen te rijden. Naast Singapore is bijvoorbeeld ook Londen een voorbeeld van een dergelijk gebied. Het cordon-type biedt een aantal voordelen ten opzichte van rekeningrijden op autosnelwegen. Het systeem is gemakkelijk te begrijpen en toe te passen en de vereiste technologie is overal verkrijgbaar. De nadelen van het systeem zijn dan weer de inflexibiliteit – tollocaties zijn moeilijk verplaatsbaar – en de inefficiëntie – chauffeurs betalen eenzelfde tolprijs, ongeacht het aantal kilometers dat ze in het tolgebied afleggen. (Goh, 2002; Phang en Toh, 1997; Safirova et al., 2006; Shen en Zhang, 2010)

In Singapore is het cordon tolsysteem geautomatiseerd en kent het op die manier veel succes. Het geautomatiseerde systeem werkt als volgt. Weggebruikers in Singapore zijn in het bezit van een elektronische waardekaart en een bijhorend ontwaardingsapparaat. Zodra ze een tolzone binnenrijden, gaat er automatisch een bepaald bedrag af van de kaart die in het ontwaardingsapparaat steekt. Het hele systeem werkt aan de hand van sensoren, wat één groot voordeel heeft ten opzichte van de tolhutjes die gebruikt worden in andere landen, namelijk dat het betalen van de tol geen filevorming veroorzaakt. Een systeem met tolhutjes voorkomt immers doorgaans file op de tolwegen zelf, maar niet op de plaatsen waar de tol moet worden betaald. Een ander voordeel van het geautomatiseerde rekeningrijden in Singapore is dat het te betalen bedrag varieert afhankelijk van het verkeer dat op de wegen aanwezig is – weggebruikers betalen meer naarmate het verkeer drukker wordt – wat de efficiëntie verhoogt en filevorming tot een minimum beperkt (Goh, 2002; Phang en Toh, 1997; Safirova et al., 2006; Shen en Zhang, 2010). Tolhutjes worden wereldwijd meer en meer vervangen door automatische tolsystemen, wat gezien de bovenvermelde voordelen daarvan niet mag verbazen. Er zijn inmiddels van het Singapore-systeem meerdere varianten ontstaan; zo zijn er systemen die werken met camera's of met een combinatie van camera's en laserdetectoren. (Jansson, 2010)

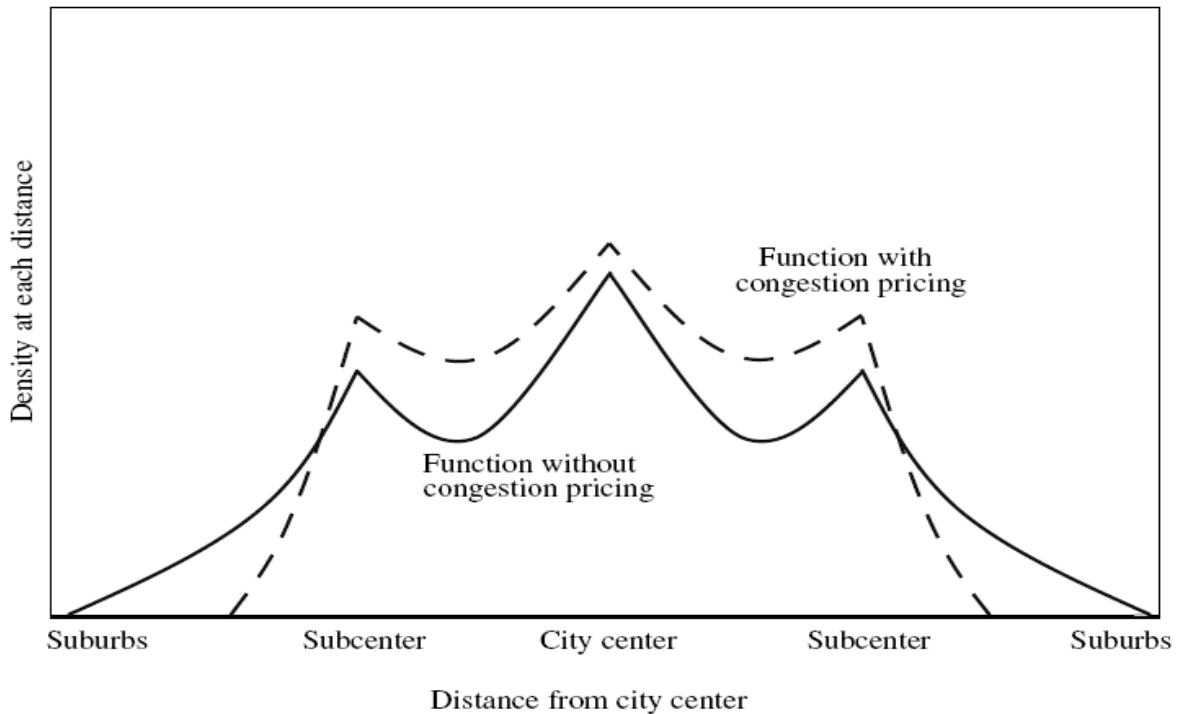
In de Verenigde Staten wordt vooral gewerkt met toepassingen van corridor tolheffing, waarbij chauffeurs betalen voor het gebruik van bepaalde banen, zoals ook in Frankrijk het geval is. De belangrijkste toepassing hiervan is het fenomeen "HOT-lanen". Weggebruikers kunnen in dat systeem kiezen over welke laan ze rijden op autosnelwegen. Ze kunnen beslissen om gebruik te maken van de geprijsde lanen (HOT-lanen) of om op de oude ongeprijsde lanen te rijden. Dat principe wordt ook toegepast bij de constructie van nieuwe wegen. Er is weinig tegenstand bij deze vorm van rekeningrijden omdat weggebruikers nog altijd de ongeprijsde wegen kunnen gebruiken. (Holguin-Veras et al., 2006; Schaller, 2010)

3.1.2. Impact van rekeningrijden

De kosten van rekeningrijden voor transporteurs is sterk afhankelijk van het type transporteur: private transporteurs hebben het makkelijker om de extra toelkosten door te geven aan hun klanten dan ingehuurde transporteurs, omdat ze moeten leveren aan een moeder- of zusterbedrijf. Dat geeft hen een zekere flexibiliteit, omdat het bedrijf dat de levering ontvangt doorgaans inschikkelijker is voor een dochter- of zusterbedrijf dan voor ingehuurde transporteurs. Die ingehuurde transporteurs hebben dus minder te zeggen over wat er gebeurt met de tol die hun chauffeurs moeten betalen. Zij hebben contracten op basis van afstanden afgesloten met de klanten en die contracten kunnen achteraf moeilijk veranderd worden (Holguin-Veras et al., 2006). Omdat huurtransporteurs geen verdere inspraak hebben over het tijdstip van de levering zit er voor hen niks anders op dan de levering op een zo efficiënt mogelijke manier uit te voeren en bijkomende toelkosten te betalen waar nodig. (Holguin-Veras et al., 2006)

Rekeningrijden heeft niet enkel impact op het werk van transporteurs die lokaal opereren, maar ook op transporteurs waarvan de chauffeurs langere afstanden moeten afleggen en in tolgebieden vaak slechts op doorreis zijn. Wanneer die transporteurs met rekeningrijden in aanraking komen, zullen ze hun uren aanpassen. Ze hebben doorgaans naar hun klanten toe een grotere flexibiliteit en meer macht dan lokale transporteurs, zodat het rekeningrijden in dit geval vooral voor de klanten negatieve gevolgen heeft. (Holguin-Veras et al., 2006)

Beleidsmakers zijn heel lang tegen rekeningrijden geweest vanwege het directe verlies in welvaart voor veel reizigers of weggebruikers, maar er zijn ook andere indirecte vormen van impact die niet uit het oog mogen verloren worden, zoals de impact op de immobiënenmarkt. Als het systeem van rekeningrijden geïmplementeerd wordt op de wegen, wordt een stijging verwacht in de vraag naar huizen dicht bij het werk, dus voornamelijk in het centrum van grote steden, zodat die steden ook verkeersgewijs drukker zullen worden en er naar huizen verder van het centrum steeds minder vraag zal zijn. Bovendien bemoeilijken bepaalde tolsystemen de doorgang voor onder andere brandweer en spoeddienst, wat de veiligheid in bepaalde gebieden niet ten goede komt en wat kan leiden tot veel hogere kosten dan de door het tolsysteem bestreden congestiekosten – bijvoorbeeld een huis dat afbrandt, een gewonde die overlijdt. Die negatieve nadelen kunnen ertoe leiden dat bij rekeningrijden de prijzen op de immobiënenmarkt gaan dalen voor huizen in de buitenwijken van grote steden. Bij afwezigheid van een tolsysteem bevinden huizen zich uiteenlopend en is er minder onderscheid tussen gebieden dicht bij en ver van het centrum dan bij de aanwezigheid van een tolsysteem het geval is. Dat komt omdat het doorgaans goedkoper is te bouwen buiten het centrum van grote steden en omdat het toch niet veel zou kosten om elke dag de trip naar het werk te maken. Dit wordt ook aangetoond door volgende grafiek waar het verschil tussen een functie met rekeningrijden en een functie zonder rekeningrijden wordt weergegeven. Bij de eerste is de afstand tot het centrum kleiner en liggen de huizen dicht op elkaar, waardoor de dichtheid ook groter zal zijn in het centrum. Bij de andere functie wordt meer gebouwd in de buitenwijken, waardoor de dichtheid lager is in het centrum en de afstand tot het centrum groter wordt. (Langer en Winston, 2008)



Figuur 1: Impact op immobiëlenmarkt (Langer en Winston, 2008)

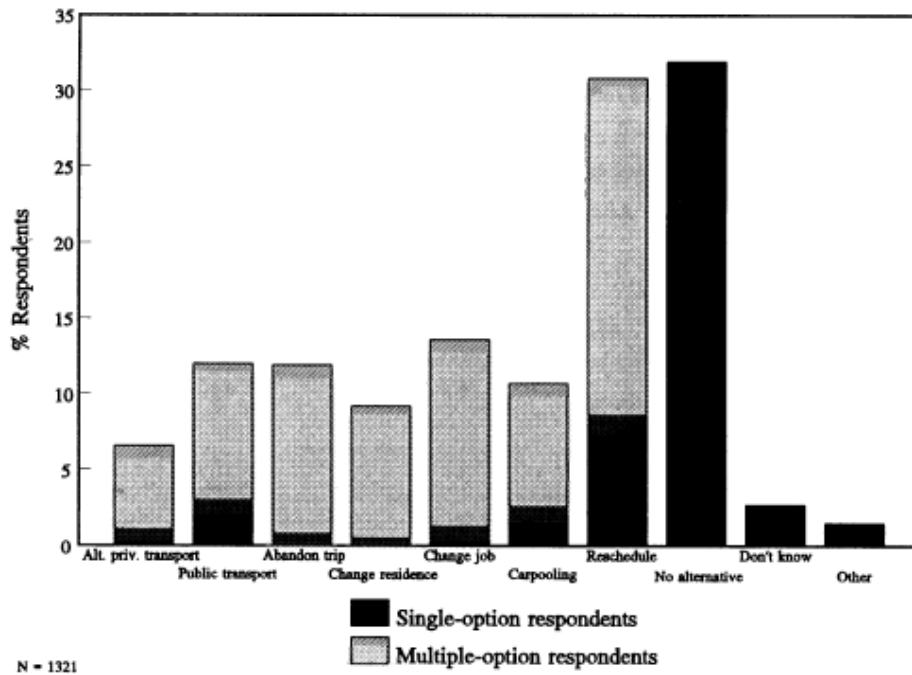
3.1.3. Voor- en nadelen van rekeningrijden

Er is veel onderzoek gedaan naar de voordelen van rekeningrijden. Het grootste voordeel bestaat uit de inkomsten die het systeem met zich meebrengt. Die kunnen bijvoorbeeld gespendeerd worden aan het onderhoud van de tolwegen, waardoor de kwaliteit ervan verbeterd wordt en waardoor ze dus aangenamer zijn om op te rijden. Het elektronisch tolsysteem, zoals aangehaald in vorige paragraaf, probeert de weggebruikers ook aan te zetten om na te denken op welke manier ze willen reizen. Ze moeten nu overwegen of de tijdwinst die ze boeken door de wagen te gebruiken in plaats van andere transportmodi of door de tolwegen te gebruiken in plaats van een alternatieve route voldoende opweegt tegen de prijs die in dit geval betaald moet worden. In onderstaande figuur wordt getoond hoe in Nederland weggebruikers zouden reageren wanneer in hun buurt rekeningrijden geïmplementeerd wordt. Van de respondenten die aan het voorafgaande enquêteonderzoek meededen, beweerde 33% dat ze geen veranderingen zouden aanbrengen in hun rijgedrag en 32% dat ze wel degelijk hun dag zouden herindelen of de gevolgde route zouden

wijzigen. Andere mogelijkheden, elk aangegeven door ongeveer 13% van de respondenten, zijn het gebruik van openbaar vervoer, het stoppen met de rit te maken en het veranderen van job. Ten slotte zijn er nog een aantal opties met kleinere percentages (10% of minder). (Goh, 2002; Langer en Winston, 2008; Verhoef et al., 1997; Yang et al., 2010)

The Social Feasibility of Road Pricing

E. T. Verhoef *et al.*



Figuur 2: Implicaties rekeningrijden (Verhoef et al., 1997)

Een ander voordeel heeft te maken met de impact die rekeningrijden heeft op het verkeer. Wanneer rekeningrijden wordt geïmplementeerd, wordt het effect zo goed als dadelijk gezien. In Londen bijvoorbeeld was al in het eerste jaar een daling van 30% te zien bij filevorming. Ook het effect op snelheden is significant. Dit is natuurlijk logisch, aangezien bij een vermindering van congestie de gemiddelde snelheid stijgt. Gelijkaardige resultaten worden gevonden in Singapore. (Santos en Shaffer, 2004; Phang en Toh, 1997)

Tevens gaat het openbaar vervoer betrouwbaarder rijden. Dit komt door de verminderde congestie in deze gebieden, waardoor deze zich makkelijker kunnen houden aan de vooropgestelde haltetijden. (Santos en Shaffer, 2004)

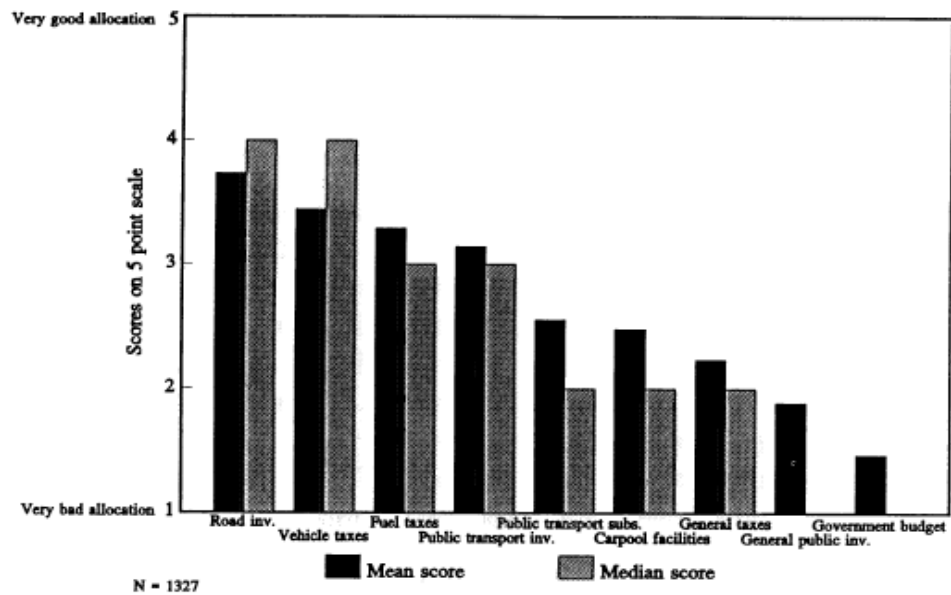
Er zijn ook een aantal nadelen verbonden aan rekeningrijden. Ten eerste moet de impact die rekeningrijden heeft op de welvaart van een bepaalde gebruiker aangehaald worden. De weggebruikers die de tolweg blijven gebruiken, lopen een hoger netto welvaartverlies op dan de niet-tolweggebruikers. Dit komt omdat de optimale tolprijs noodzakelijkerwijs hoger is dan de waarde van de gerealiseerde tijdswinsten. Als het welvaartsverlies voor iedereen gelijk zou zijn, zou de tol geen enkele invloed hebben, waardoor iedereen de tolwegen bleef gebruiken en de congestie onverminderd aanhield (Verhoef et al., 1997; Phang en Toh, 1997; Schaller, 2010). Dit nadeel moet wel nog verfijnd worden. Het is zo dat bij rekeningrijden de welvaart voor tolweggebruikers enigszins daalt, maar daar staat tegenover dat de algemene welvaart stijgt, vanwege de opbrengst van tolwegen en -gebieden. (Langer en Winston, 2008; Tampère et al., 2009)

Vervolgens zijn er de kosten die verbonden zijn aan rekeningrijden. Er is een redelijke investering nodig om rekeningrijden mogelijk te maken. Dit varieert tussen \$31miljoen in Oslo en \$227miljoen in Londen. Het werkelijke probleem ligt echter niet in deze investering, maar wel in de werkingskosten. Veel gebieden hebben moeilijkheden met het systeem. In Londen bijvoorbeeld is er een jaarlijks kostenplaatje van \$151miljoen. Daar zijn vooral problemen bij het binnenrijden van het tolgebied. Doordat de stad veel ingangswegen heeft waar de weggebruiker een gebied kan binnenkomen, kunnen de beleidsmakers geen tolhutjes zetten. Deze tolhutjes hebben misschien een hoge initiële investering, maar de jaarlijkse operationele kosten liggen lager. Een mogelijke oplossing voor het rekeningrijden in Londen kan gevonden worden in het parkeerprincipe. Dit concept wordt nog besproken. (Jansson, 2010; Petrella et al., 2007; Santos, 2005)

Een ander nadeel slaat op de aanvaardbaarheid van het systeem. Iedereen moet rekeningrijden willen implementeren. In vele steden is het al bewezen dat zelfs een heel kleine groep ervoor kan zorgen dat rekeningrijden niet wordt toegepast. Dit is zeker het geval wanneer een aantal legislatieve organen beslissen over de implementatie van het

systeem. Tevens is het zo dat de beleidsmakers van de gemeente, stad of land ontzettend veel moeite hebben om te verantwoorden waarom rekeningrijden gebruikt wordt. Heel veel weggebruikers staan niet te wachten op zo een systeem, want zij vinden het huidige systeem vaak goed genoeg en willen zodoende niet betalen voor het gebruiken van die weg. (Arnott, 1994; Lindsey, 2008; Petrella et al., 2007; Schaller, 2010; Shen en Zhang, 2010; Verhoef et al., 1997)

Dit nadeel moet wel genuanceerd worden. Het uiteindelijke doel van de politici is het naar voren brengen van de voordelen van rekeningrijden, zodat de weggebruikers overtuigd geraken. Het eerste wat gedaan kan worden om de negativiteit tegen te gaan, is verklaren wat met het geld gebeurt dat verkregen wordt door rekeningrijden. De weggebruikers vinden dit een belangrijk aspect in hun uiteindelijk oordeel van rekeningrijden. In onderstaande figuur wordt aangetoond wat de weggebruikers willen dat gebeurt met het tolgeld. Deze factoren hebben een sterke positieve impact op de aanvaardbaarheid van rekeningrijden. Vooral wegonderhoud en een verbetering van de belasting op de voertuigen krijgen positieve reacties. Tevens zijn verminderingen op brandstofbelastingen en publiek transport faciliteiten ook goede mogelijkheden. Carpool faciliteiten en vermindering van de algemene belastingen zijn minder populair. (Petrella et al., 2007; Schaller, 2010; Verhoef et al., 1997)



Figuur 3: Gebruik tolgeld (Verhoef et al., 1997)

3.1.4. Conclusie

Er kan geconcludeerd worden dat de impact van rekeningrijden veel te veel gedragen wordt in de logistieke sector door de transporteurs. Indien de bedoeling van rekeningrijden de vermindering van leveringen tijdens de piekuren is, dan is rekeningrijden niet de beste oplossing. Rekeningrijden is wel goed voor andere doeleinden, zoals het algemene verkeer verminderen. (Golob en Regan, 2000; Holguin-Veras et al., 2006)

3.2. Parkeerpolitiek

Als geen redelijke marktprijzen gevraagd worden voor parkeerplaatsen, zal dit een negatief effect hebben op het wegverkeer. In vele steden is het opvallend dat het marktfalen afkomstig is van de ondergeprijsde of niet-geprijsde parkeerplaatsen op de straten. Dat zorgt ervoor dat het verkeer in het centrum naar een parkeerplaats gaat zoeken. Dit is niet bevorderlijk voor de vlotheid van het verkeer, wat dan weer leidt tot congestievorming. (Arnott et al., 2005; Jansson, 2010)

Er moet een onderscheid gemaakt worden tussen publieke en private parkeerplaatsen. Het eerste type slaat op parkeerplaatsen waar iedereen zijn/haar auto kan parkeren. De bedoeling van parkeerpolicy is dat een prijs gezet wordt op een parkeerplaats. Dit is natuurlijk afhankelijk van de locatie, maar tevens van congestie die kan optreden wanneer geen redelijke marktprijs gevraagd wordt. Bovendien is de tijd een belangrijke factor. Dit kan gezet worden in formule: $P = a + bT$ waar a = congestieprijs, b = parkeervergoeding, T = tijd en P = uiteindelijke prijs. (Jansson, 2010)

Het moeilijke aspect aan de parkeerpolicy zijn de private parkeerplaatsen. Deze worden niet graag opgegeven door de werknemers of werkgevers. Een systeem dat geïnstalleerd is in Stockholm, blijkt succesvol. Daar moeten de werknemers voor de private parkeerplaatsen betalen. Deze prijs wordt opgelegd door de werkgevers. De werkgevers laten hun werknemers betalen omdat zij door de staat beloond worden wanneer de werknemers genoeg moeten betalen om gebruik te maken van deze werkplaatsen. Als zij dit niet doen, moeten de werkgevers belastingen betalen, omdat de werknemers voordeel hebben ten opzichte van de gewone weggebruikers. (Jansson, 2010)

Een ander voorbeeld kan gevonden worden in het zakendistrict van Manhattan. Daar wordt een prijs gevraagd aan truckers en leveranciersbedrijven om langs de weg te parkeren. Het blijkt dat dit succesvol is, omdat deze groepen de voordelen inzagen van dit systeem. Zo waren zij altijd zeker van een parkeerplaats en van verminderde congestie door dubbel parkeren. (Schaller, 2010)

De parkeerpolicy heeft één groot nadeel en dat is de bekendheid van de oplossing. Vaak wordt deze oplossing over het hoofd gezien, doordat de meeste beleidsmakers gefixeerd zijn op oplossingen die hun veel geld kunnen opleveren, zoals rekeningrijden. Dit is een spijtig nadeel voor de beleidsmakers, want parkeerpolicy kan zeker een bijdrage leveren tot het oplossen van het probleem. Het wordt ook erkend door verschillende auteurs (Arnott et al., 2005; Jansson, 2010) dat deze oplossing niet gezien moet worden als een substituuat van rekeningrijden, maar als een complement. Deze methode zorgt ervoor dat rekeningrijden nog efficiënter wordt door het verminderen van het zoeken naar goedkope parkeerplaatsen. (Arnott et al., 2005; Jansson, 2010)

3.3. Nachritten

Beleidsregels voor piekuren worden op vele locaties in de wereld geïmplementeerd om de algemene efficiëntie van de transportinfrastructuur te verhogen. Het principe van de nachtlevering is één van die methodes. Over de jaren is de vermindering van vrachtvervoer tijdens de piekuren een doel geworden van veel steden en landen. Daardoor zijn veel beleidsregels ingevoerd om logistieke operaties naar de nacht te verplaatsen. Het doel van deze beleidsregels is om de impact op de omgeving en op congestie te verminderen. Wanneer 's nachts geleverd wordt is het verkeer rustiger, zowel op de baan als bij de laad- en losfaciliteiten zelf. Dat leidt tot snellere leveringen en minimaliseert de impact van het vrachtverkeer op congestie. Deze oplossing promoot tevens het gebruik van milieuvriendelijke en stillere voertuigen voor de levering om zo het geluidsoverlast tot een minimum te houden. (Sathaye et al., 2010)

3.3.1. Implementatie nachtlevering

In een aantal steden worden al nachtleveringen toegelaten en in andere worden zelfs uitsluitend nachtleveringen toegestaan. In Barcelona is een pilootstudie waar gebruik gemaakt wordt van 40 ton vrachtwagens. Deze vrachtwagens zijn uitgerust met anti-lawaaisystemen. Deze vrachtwagens maken twee ritten per nacht, namelijk één om 23u en één om 5u. Deze twee ritten zorgen ervoor dat er zeven bespaard worden tijdens de piekuren. Er wordt gewerkt met twee afzonderlijke ritten voor de veiligheid van de producten: om 5u worden verse producten geleverd, om 23u producten die niet koel gehouden moeten worden. (Geroliminis en Daganzo, 2005)

Ook in Parijs zijn regels geïntroduceerd omtrent nachtlevering. Daar is het niet toegelaten voor vrachtvoertuigen kleiner dan 29m² om Parijs binnen te rijden tussen 17u en 22u. Voertuigen die groter dan 29m² worden dan weer enkel toegelaten tussen 22u en 6u – ze mogen dus enkel nachtleveringen doen. Bovendien mag geen enkele vrachtwagen hoger dan 12m het centrum binnenrijden tussen 7u30 en 19u, waardoor deze voertuigen verplicht zijn 's nachts in het centrum te leveren. (Browne et al., 2007; Geroliminis en Daganzo, 2005)

In Londen gelden omgekeerde regels: daar mogen vrachtwagens die zwaarder dan 18 ton wegen niet het centrum binnen tussen 21u en 7u, vanwege de geluidsoverlast. (Browne et al., 2007)

3.3.2. Voor- en nadelen nachtleveringen

Er zijn voor logistieke bedrijven een aantal voordelen verbonden aan nachtleveringen. Ten eerste ligt de snelheid waarmee gereden kan worden hoger dan tijdens de piekuren vanwege de verminderde congestie. Bovendien hebben nachtleveringen een positieve impact op het brandstofverbruik, dat lager ligt omdat er 's nachts minder verkeer op de baan is. (Geroliminis en Daganzo, 2005)

Nog een voordeel van nachtleveringen is de verhoogde productiviteit, omdat het probleem van congestie wegvalt. Zo kunnen vrachtwagenchauffeurs 30% van hun tijd uitsparen en stijgt dus de productiviteit. Bovendien liggen de kosten doorgaans lager: er zijn bijvoorbeeld vaak weinig tot geen parkeerkosten 's nachts. Om bedrijven ertoe aan te zetten nachtleveringen door te voeren, kunnen gemeentes een monetaire tussenkomst aanbieden. Die nachtleveringen zijn immers ook voor hen voordelig, omdat de congestie erdoor vermindert. (Cassidy, 2009)

De atmosferische grenslaag zorgt voor een probleem bij nachtleveringen. Deze is stabiel 's nachts dan overdag. Als logistieke operaties meer en meer 's nachts plaatsvinden, zal de gemiddelde concentratie van uitlaatgassen van een dieselveertuig op vele locaties stijgen. Dit probleem licht gevoeliger voor locaties in het binnenland dan voor plaatsen aan de kust. Dit komt door meteorologische verschillen: weerpatronen in het binnenland worden niet gemodereerd door de zee/oceaan, die de temperatuur langzamer laat veranderen. Hierdoor liggen de temperatuurvariaties in het binnenland hoger dan aan zee- of oceaanelocaties. (Sathaye et al., 2010)

Een ander probleem is de geluidsoverlast voor de verschillende bewoners, alsook diefstal en de beveiliging voor zowel de bestuurders als de goederen. De geluidsoverlast kan door het stadsbestuur aangepakt worden door bepaalde types van auto's te verbieden en andere te subsidiëren. Maar dat alleen is niet voldoende om de geluidsoverlast te verhelpen, want het

meeste lawaai wordt vaak niet gemaakt door de voertuigen zelf, maar door bijvoorbeeld mondelinge communicatie of het sluiten van de deuren. De FTA (Freight Transport Association) en de NAS (Noise Abatement Society) hebben wel een aantal procedures gevonden die het geluidsoverlast verminderen, zoals trainingen voor staf en bestuurders, het gebruik van rubberen matten... (Geroliminis en Daganzo, 2005; Muñuzuri et al., 2005; Walton, 2009)

Tevens willen heel weinig klanten de goederen 's nachts ontvangen. Een laatste nadeel zou liggen bij de logistieke bedrijven zelf: de tijdwinst zou niet kunnen opwegen tegen de extra kosten die moeten worden gemaakt (vooral met betrekking tot het personeel). (Muñuzuri et al., 2005)

3.4. Ramp Metering

Het internaliseren van de externaliteiten van congestie kan gebeuren via rekeningrijden, wat hiervoor al werd besproken, maar er zijn ook andere manieren. Eén van de alternatieven is het gebruik van verkeersmanagementstrategieën zodat alle reizigers in verschillende groepen worden opgedeeld. Hierdoor wordt de congestieveroorzakende interactie tussen reizigers beperkt tot reizigers binnen eenzelfde groep. Een efficiënte onderverdeling in groepen kan leiden tot een vermindering van de totale congestie. (Shen en Zhang, 2010)

Eén van de oudste concepten om dit te bereiken, is het gebruik van ramp metering. Een snelweg met opritten is de ideale locatie om ramp metering te gebruiken. Een dynamisch systeem kan makkelijk geïmplementeerd worden door de prijzen te veranderen. Zulke ramp metering strategieën zijn redelijk makkelijk te installeren en worden snel aanvaard door het publiek, waardoor ze een alternatief vormen voor rekeningrijden. (Shen en Zhang, 2010)

Alle algoritmes van ramp metering zijn opsplitsbaar in twee categorieën, namelijk lokale of gecoördineerde. Lokale ramp metering algoritmes nemen enkel verkeerscondities in beschouwing die dicht bij de oprit gelegen zijn. Gecoördineerde algoritmes daarentegen proberen het verkeer te optimaliseren over een bepaald gebied. (Kamel et al., 2009)

3.4.1. Implementatie ramp metering

De bedoeling van ramp metering is het knelpunt op het einde van autosnelwegen weg te werken (doorgaans dicht bij een grote stad waar veel mensen moeten gaan werken). Dat wordt gedaan door een bepaald aantal auto's tegen te houden bij het oprijden van deze weg. Op elke oprit worden de voertuigen periodiek doorgelaten om zo de congestie te verminderen. Elke oprit krijgt twee verschillende tarieven: een hoog en een laag tarief. Aan elke oprit wordt vervolgens een tijdsvenster toegekend waarop de weg aan het lage tarief mag worden gebruikt. Op alle andere tijden moet het hoge tarief betaald worden. Het doel van dit systeem is vooral om het probleem van de "ochtendspits" te verminderen. Als het kiezen van de duur van het tijdsvenster zorgvuldig wordt gedaan, zullen de opritten dienen als middelen om congestie tegen te houden tussen dezelfde groepen van mensen. Zo wordt de interactie in het verkeer tussen de verschillende groepen verminderd. (Shen en Zhang, 2010)

Een herverdeling van de externaliteit, afkomstig van congestie, kan bekomen worden door de toegang op het knelpunt van de autosnelweg te verdelen volgens een prioriteitssysteem voor de verschillende opritten, waarbij een hogere prioriteit overeenkomt met opritten verder verwijderd van het knelpunt. Elke oprit, behalve de oprit met de hoogste prioriteit, krijgt een tijdsvenster van twee periodes, namelijk een periode met een hoog tarief en één met een laag tarief. De lage tariefperiode – die steeds vóór het gewoonlijke ochtendspitsuur valt – zal bij opritten met een lagere prioriteit, dus dicht bij het knelpunt, vroeger liggen dan bij opritten met een hogere prioriteit. Reizigers die vertrekken aan de opritten met de hoogste prioriteit zouden moeten vertrekken op een later tijdstip om een optimale werking van het systeem te verkrijgen. Doorgaans zullen ze echter vroeger vertrekken, omdat ze rekening blijven houden met mogelijke congestie bij het knelpunt. Dit type van ramp metering wordt gebruikt in Shanghai, China en grote steden in Japan, waar verschillende opritten gesloten worden tijdens bepaalde uren om zo de druk op de knelpunten te verminderen. (Shen en Zhang, 2010)

Het is duidelijk dat om ramp metering strategieën te doen werken, eerst een prioriteitssysteem moet worden geïntroduceerd. Reizigers die de snelweg willen oprijden via

de oprit met de hoogste prioriteit, hebben de laagste evenwichtskosten. Reizigers die de lage prioriteitsopritten gebruiken, hebben evenwichtskosten gelijk aan die van de reizigers wanneer er geen ramp metering wordt toegepast. Omdat dus niemand slechter af is, kunnen deze ramp meteringstrategieën gezien worden als Pareto-verbeterend. Pareto-verbeterend betekent dat niemand slechter wordt van de implementatie van een strategie. Als de nieuwe strategie ook maar voor één groep iets beter is dan de oude strategie, is het beter om de nieuwe strategie te implementeren. De prioriteit van de opritten zou periodiek moeten veranderd worden zodat de voordelen van deze Pareto-verbeterende strategie gelijk verdeeld worden over de verschillende groepen. (Shen en Zhang, 2010)

3.4.2. Voordelen van prioriteitssysteem

Het prioriteitssysteem heeft een aantal belangrijke voordelen. Ten eerste gaat dit systeem de vertrektijden van de reizigers in rekenschap brengen, zodat de effecten van de reizigers op de verkeersstroom tijdens de piekuren gemakkelijker kunnen worden gemeten. Ten tweede is er maar maximaal één lage tariefmoment per dag, wat het makkelijker maakt om het systeem te promoten bij reizigers, die op eenvoudige wijze hun reizen kunnen aanpassen. Het leidt tevens tot minder dagelijkse fluctuaties in de vraag op de opritten waar de tarieven gelden. Bovendien heeft het systeem weinig data nodig. Enkel de capaciteit van het knelpunt van de autosnelweg en het aantal reizigers dat dagelijks de oprit neemt moeten gekend zijn. Ten slotte is het systeem Pareto-verbeterend, waardoor het niet snel op publieke weerstand zal stuiten. (Shen en Zhang, 2010)

3.4.3. Voor- en nadelen ramp metering

Het eerste voordeel van ramp metering is de verbetering van de verkeersstroom op de autosnelweg. Dat komt door de controle op de toegang van deze snelweg. Bovendien wordt het verkeer ook omgeleid naar andere, minder gecongesteerde wegen. Ten tweede zal het meteringproces de verkeersstroom gladstrijken. Tevens leidt ramp metering tot een vermindering van ongevallen, emissies, brandstofverbruik en de werkingskosten van het voertuig. Eveneens past dit systeem het netwerk "routings" aan, waardoor een grotere balans en efficiëntie bereikt wordt. (Kamel et al., 2009)

Er zijn ook een aantal nadelen verbonden aan ramp metering. Ten eerste worden vertragingen opgelopen op de opritten, omdat daar lange rijen ontstaan. Dit probleem kan zelfs nog verergeren als er geen controlesysteem actief is op deze opritten. In dat geval moet het verkeer dat deze opritten wil gebruiken vanwege de lange rijen wachten op de straten. Ook kunnen negatieve effecten optreden wanneer het verkeer wordt omgeleid naar andere wegen. Files zijn daarvan het bekendste voorbeeld. Het laatste probleem heeft te maken met de acceleratie van de voertuigen. Door de ramp meters is het moeilijker om nog een hoge snelheid te halen op de oprit, wat niet bevorderlijk is voor de verkeersstroom. (Kamel et al., 2009)

Ramp metering wordt vaak gezien als een managementapparaat op korte termijn, waar het belangrijkste doel de verbetering van de verkeersstroom op autosnelwegen is. De langetermijnrol wordt vaak over het hoofd gezien. Die houdt in dat ramp metering de distributie van de congestie-externaliteit beïnvloedt door het vertrekken van de reizigers aan te passen. (Shen en Zhang, 2010)

Tot nu toe is vooral gesproken over congestie op de auto(snel)wegen en minder over congestie in de steden, waar wel al een aantal voorbeelden zijn over aangehaald. In het volgende hoofdstuk wordt dieper ingegaan op congestie in deze steden, wat in de literatuur wordt aangeduid als stadsdistributie. De oplossingen die aangehaald zijn in dit hoofdstuk, zullen gelinkt worden aan de oplossingen van congestie in steden om de consistentie te behouden.

Hoofdstuk 4. Stadsdistributie

Er wordt een aparte sectie besteed aan stadsdistributie, omdat congestie ook in grote steden vaak een probleem is. Eerder is al aangehaald wat mogelijke oplossingen zijn voor de congestieproblemen in Londen en Singapore; in dit hoofdstuk zal dieper op de algemene problematiek van stadsdistributie worden ingegaan.

4.1. Definitie

Er bestaan verschillende definities van stadsdistributie. In elke definitie worden andere prioriteiten gesteld, zodat sommige definities een aantal zaken uitsluiten die wel aan bod komen in andere definities. (Ambrosini en Routhier, 2004)

Wanneer in Australië en de VS wordt gesproken over vrachtverkeer in de stad, worden enkel commerciële voertuigen bedoeld. Men beschouwt dus het logistieke systeem dat het vrachtvervoer ondersteunt als een externe factor. Ambrosini en Routhier (2004) concluderen hieruit dat sommige onderzoekers uit deze twee landen niet beschikken over de kennis van het functioneren van logistieke systemen en dus niet weten welke verschillende rollen gespeeld worden door deze systemen. Dat gebrek aan kennis zou er dan toe leiden dat die onderzoekers oplossingen vinden die gebaseerd zijn op onvolledige informatie. Hier worden dus de basiscomponenten van de stadslogistiek geïntroduceerd op een exogene manier. (Ambrosini en Routhier, 2004)

In andere landen wordt een ruimere definitie van stadsdistributie gevonden, zodat met de gehele logistieke gemeenschap rekening wordt gehouden. De oplossingen die daar gevonden worden zijn beter en vollediger ten opzichte van de oplossingen die aangeboden worden in de Verenigde Staten en Australië. Omdat het duidelijk beter is het logistieke systeem te betrekken bij de zoektocht naar verbeteringen in de steeds complexer wordende regeling van stadsdistributie, zal die ruime definitie doorheen deze sectie gehanteerd worden. (Ambrosini en Routhier, 2004)

Stadsdistributie kan worden omschreven als het geheel aan transportbewegingen van goederen die worden beïnvloed door alle partijen die geassocieerd zijn met stadsverkeer en zijn morfologie (Muñuzuri et al., 2005). In hoofdstukken 4.3. en 4.4. zullen de specifieke problemen die worden veroorzaakt door stadsdistributie en een aantal mogelijke oplossingen besproken worden. Specifiek gaat het dan over de logistiek in de stad of city logistics. City logistics houdt de specifieke logistieke concepten en gebruiken in die horen bij het leveren van goederen in de stadsgebieden en de laatste kilometer van het transport, met specifieke problemen zoals vertragingen veroorzaakt door filevorming, gebrek aan parkeerplaatsen, directe interactie met andere weggebruikers, enzovoorts. (Muñuzuri et al., 2005)

4.2. Belang stadsdistributie

Stadsdistributie is ontzettend belangrijk voor de economie als geheel. De uitlaatgassen die een vrachtvoertuig uitstoot in een stadsomgeving liggen veel hoger dan in een omgeving buiten de stad, omdat er veel vaker gestart, gestopt en vertrokken moet worden. Tevens zijn vrachtvoertuigen veel slechter voor het milieu dan gewone auto's en motorfietsen. (Anderson et al., 2005)

Stadsdistributie is vooral belangrijk om de volgende redenen (Anderson et al., 2005):

- Het transport speelt een grote rol in het uitvoeren van de industriële activiteiten en handelsactiviteiten, die bijdragen aan de algemene welvaart
- De vrachtsector maakt een contributie aan de competitiviteit van de industrie van een bepaalde regio
- Vrachtvervoer en logistieke kosten oefenen een invloed uit op de prijs van de handelswaar die in een regio geconsumeerd wordt
- De totale kosten van vrachttransport en logistiek hebben een directe invloed op de economie
- Vrachtvervoer heeft een niet te onderschatten effect op het milieu

Er zijn veel verschillende types van vrachtvervoer, gaande van het vervoer van consumentengoederen, tot bouwmaterialen, afvalproducten en ten slotte ook voertuigen die

de post moeten rondrijden. De verschillende types beslaan samen maar liefst $\frac{1}{4}$ van al het verkeer in de gemiddelde stad. (Dablanc, 2007)

4.3. Problemen rond stadsdistributie

De indifferentie van de logistieke bedrijven naar de lokale condities toe, zal ertoe leiden dat logistieke centrums in de buitenwijken van de stad gebouwd gaan worden. Dat doen de bedrijven om zo weinig mogelijk kosten te maken; de buitenwijken zijn immers veel goedkoper dan het centrum. Er is ook nog een ander probleem, namelijk het slechte imago van vrachtvervoer in een stadsomgeving. Een van de oorzaken daarvan is zwartwerk, een fenomeen dat vandaag de dag grotendeels verdwenen is, behalve in grote steden. Daar houdt men zich vaak niet aan sociale regulaties en arbeidsvoorschriften, mede door een gebrek aan controle. (Dablanc, 2007)

Een ander probleem is te wijten aan de lokale overheden. Die richtten hun aandacht vroeger niet aan de logistieke bedrijven, maar vooral op de vrachtwagenchauffeurs, hoewel die niet verantwoordelijk zijn voor de stiptheid van de levering. De chauffeur moet namelijk de door het logistiek bedrijf opgestelde planning volgen. In die planning is uiteraard al rekening gehouden met de bestaande regelgeving omtrent het vrachtverkeer, maar die regelgeving is doorgaans niet strikt genoeg om bepaalde problemen rond stadsdistributie weg te werken. Voor een oplossing van die problemen aan de hand van een aanpassing van de regels voor vrachtwagenchauffeurs zouden echter ontzettend strenge regels nodig zijn. Zulke regels zouden ingaan tegen de constitutionele principes van vrijheid van circulatie en handel. Later verschoof de aandacht van de overheden naar de logistieke bedrijven, maar toen bleek dat zelfs de logistieke bedrijven weinig te zeggen hebben over de levering. Zij moeten immers op hun beurt voldoen aan de wensen van de klanten. (Dablanc, 2007; Holguin-Veras et al., 2006)

Ook de opkomst van het internet heeft een probleem met zich mee gebracht. Er moest namelijk plots veel meer aan huis geleverd worden, door een nieuwe manier van "online" winkelen waaraan de logistieke sector zich nog steeds niet heeft kunnen aanpassen. De

nieuwe markt heeft immers moeilijke leveringsschema's, en soms moet een groot aantal leveringen gebeuren op een eerste verdieping of hoger. (Dablanc, 2007)

Er zijn duidelijk grote veranderingen op til in de productie-, distributie- en consumptiesectoren, maar het beleid voor vrachtverkeer loopt nog een beetje achter op deze veranderingen. Ook doen de meeste overheden niks aan de verschuiving van de logistieke centra naar de randgebieden. Enkel Parijs probeert die ontwikkeling wat tegen te gaan door een aantal logistieke gebieden op te zetten in het centrum. Lokale overheden zijn de laatste tien jaar bezig met een inhaalbeweging om het probleem aan te pakken op een zo efficiënt mogelijke manier. (Dablanc, 2007; Browne et al., 2007)

4.4. Oplossingen van stadsdistributie

Men kent twee types van oplossingen bij het vrachtvervoer in de steden, namelijk de specifieke en de gecombineerde oplossingen. Wanneer het gaat over de specifieke oplossingen, worden enkel specifieke problemen en de mogelijke antwoorden daarop bedoeld. Die oplossingen worden gekozen voor implementatie op basis van de behoeften van de groepen stakeholders in de stad en kunnen dus een positief effect hebben op een aantal van die groepen maar ook een negatief effect op andere groepen. Een bekend voorbeeld van een specifieke oplossing is rekeningrijden dat hierboven al uitgebreid besproken werd. Het bleek dat dit positief is voor de welvaart van een aantal weggebruikers, maar tevens negatief voor andere weggebruikers. (Muñuzuri et al., 2005; Verhoef et al., 1997)

Tegenover de specifieke staan de gecombineerde oplossingen. Die oplossingen worden gegenereerd als een combinatie van verschillende specifieke oplossingen en bestaan dus uit een strategische politiek voor logistiek in de stad. Een gecombineerde oplossing streeft ernaar even positief te zijn voor de verschillende groepen van stakeholders, waardoor dus niemand in zijn/haar belangen wordt geschaad. Wanneer een gecombineerde oplossing wordt aangebracht, moet rekening gehouden worden met twee belangrijke startpunten, namelijk:

- De specifieke oplossingen die worden gecombineerd, moeten compatibel zijn. Dat wil zeggen dat zij elkaar niet mogen uitsluiten of overtuilig zijn.
- Het effect van de gecombineerde oplossing van de groepen stakeholders zal waarschijnlijk verschillend zijn van de som van alle individuele effecten die veroorzaakt worden door elke specifieke oplossing.

In wat volgt worden enkel een aantal specifieke oplossingen besproken. Eerst worden de specifieke problemen geanalyseerd waarvoor een oplossing moet gevonden worden. Pas daarna kan worden nagedacht over het vormen van een gecombineerde oplossing. In onderstaande tabel worden alle mogelijke oplossingen van stadsdistributie samengevat. Voor een volledige bespreking kan Muñuzuri et al. (2005) worden geraadpleegd. (Muñuzuri et al., 2005)

Tabel 1: Oplossingen stadsdistributie voor lokale administraties (Muñuzuri et al., 2005)

Local administration solutions for urban freight		
Public infrastructure	Transfer points	City terminals Outskirts logistic centers Logistic improvement of terminals Use of rail or ship terminals Use of public parking lots
	Modal shift	Use of the train or underground system Shuttle train
Land use management	Parking	Load zone provision Parking space planning Hub areas Use of other reserved spaces
	Building regulations	Load/unload interfaces Use of private parking lots Mini-warehouse
Access conditions	Spatial restrictions	Access according to weight and volume Access to pedestrain zones Street blocking allowance Closing the center to private traffic Road pricing
	Time restrictions	Adequate rotation in load zones Night deliveries Double-parking short time restrictions Access time windows
Traffic management	Scope of regulations	Carrier classification Freight zone classification Harmonization of regulations Street classification
	Information	On-line load zone reservations

In de categorie "publieke infrastructuur" is het gebruik van spoor- of schipterminals een mogelijke oplossing. Dit is enkel een goede oplossing wanneer deze terminals niet te ver liggen van het centrum van de stad. Deze terminals zijn bruikbaar op verschillende manieren. De voornaamste mogelijkheid bestaat erin de goederen die ontvangen of verzonden worden via de spoorweg of het water te vervoeren (afhankelijk van het type terminal). Zo wordt het bedrijf een onderdeel van het intermodale netwerk. (Muñuzuri et al., 2005)

Er is een duidelijke vooruitgang op het gebied van het gebruik van intermodaal transport in de loop der jaren. Meer en meer bedrijven beginnen gebruik te maken van het intermodale netwerk en hierbij worden voornamelijk spoorwegen gebruikt. Als het logistiek bedrijf dichtbij een haven of een station (of spoorweg) gelokaliseerd is, wordt geprobeerd om een logistiek centrum dichtbij of zelfs aan het water (of het spoor) te bouwen. Zo worden kosten uitgespaard, zodat een concurrentieel voordeel behaald kan worden. Een voorbeeld hiervan vindt men in Antwerpen, waar veel terminals dicht bij de haven liggen. (Macharis en Verbeke, 1999)

Ten tweede kan opgemerkt worden dat in tabel 1 vaak het gebruik van parkeerplaatsen terugkomt. Die oplossing moet natuurlijk wel verfijnd worden, aan de hand van een onderverdeling in publieke en private parkeerplaatsen. Voor publieke parkeerplaatsen kunnen de parkeeroperatoren bijvoorbeeld verplicht worden een fractie van hun parkeerplaatsen open te laten voor het laden en lossen van vrachtwagens. Op die manier moeten de vrachtwagenchauffeurs alleen het laatste stuk van hun levering te voet doen. Het gebruiken van private parkeerplaatsen is ook een mogelijkheid. Veel van deze parkeerplaatsen zijn overdag leeg en kunnen dus gebruikt worden door vrachtvoertuigen voor leveringen aan huis. Dit ligt wel moeilijker door de beperkingen van deze parkeerplaatsen op het gebied van hoogte. Een voordeel van deze oplossing is dat het leidt tot minder dubbel parkeren en dus minder congestie. (Muñuzuri et al., 2005)

Nog in verband met parkeerplaatsen is ook het gebruik van hub-plaatsen een mogelijke oplossing. Dat zijn gebieden die gereserveerd kunnen worden voor goederenwagens en trucks. Die krijgen daar dan een aantal gereserveerde parkeerplaatsen toegewezen. In Parijs

is deze oplossing al geïmplementeerd en kent het een groot succes. (Browne et al., 2007; Muñuzuri et al., 2005)

Ook nachtleveringen en rekeningrijden worden in de tabel aangehaald, bij de sectie "access conditions" of toelatingscondities. Er wordt niet dieper ingegaan op nachtleveringen, omdat voorbeelden ervan al zijn besproken in het vorige hoofdstuk. Rekeningrijden is eveneens al uitgebreid besproken en zal dus ook niet meer behandeld worden. Aan het principe van rekeningrijden is tevens al een hele sectie gewijd. Er bestaan weliswaar nog niet besproken nadelen met betrekking tot rekeningrijden wanneer gekeken wordt naar de logistieke problemen ervan. Als de kosten te hoog zijn om tolgebieden te betreden, kan dit ervoor zorgen dat de handelsactiviteiten in deze omgeving afnemen en zich naar andere contreien verplaatsen waar geen betaling gevraagd wordt. Een ander nadeel heeft te maken met de extra kosten die moeten betaald worden. De bedrijven zien dan geen andere oplossing om de prijzen te verhogen en dit gaat leiden tot een stijging van de inflatie. (Muñuzuri et al., 2005)

De problematiek die tot nu toe is besproken, behandelt het woord congestie en alles wat daar bij komt kijken. Deze thesis bestaat echter uit twee woorden, dus ook het woord transportplanning moet nog aan bod komen. Dit woord zal dan ook uitgebreid besproken worden in het volgende hoofdstuk, waar de verschillende manieren waarop men een route kan plannen aan bod komen.

Hoofdstuk 5. Modelleren van congestie in rittenplanning

5.1. Inleiding

In de vorige hoofdstukken is nagegaan wat de term congestie inhoudt en welke implicaties congestie op verschillende gebieden heeft. Tevens zijn een aantal mogelijke oplossingen besproken, alsook de invloed van congestie op stadsdistributie. Wat nog niet is aangehaald, is de impact van congestie op de planning van de ritten. Wel is de impact op de logistieke sector al besproken, maar nog niets over de planning ervan. Dat wordt dan ook uitgebreid besproken in dit hoofdstuk.

Efficiënte planning kan ertoe leiden dat substantiële kosten bespaard worden voor bedrijven zoals leveranciers en aanbieders van logistieke diensten. Het ontwerpen van deze efficiënte plannen is een complexe taak die dagelijks opnieuw gedaan moet worden. Dat maakt rittenplanning tot een uitdagend probleem in de praktijk. (Kok, 2010)

Planners hebben meestal te maken met veel voertuigen en moeten die ook toewijzen aan een groot aantal klanten, op een zo efficiënt mogelijke manier. Het doel van die planning is dat een minimum aantal voertuigen gebruikt wordt om aan de vraag van de klanten te voldoen of om zoveel mogelijk aanvragen van klanten toe te wijzen aan elk voertuig. Vervolgens moeten de planners een volgorde van levering toekennen aan elk voertuig. De bedoeling is uiteraard dat zowel de totale reisafstand als de totale kosten zo minimaal mogelijk worden gehouden. Dit probleem wordt in de literatuur ook wel het Vehicle Routing Problem of rittenplanningsprobleem genoemd, dat hier zal worden afgekort als VRP. In wat volgt zal eerst dieper worden ingegaan op het basisprobleem, namelijk het VRP. Dan zullen een aantal varianten op dat probleem besproken worden om te eindigen met de sectie Time Dependent Vehicle Routing Problem of TDVRP, waar in tegenstelling tot alle eerder besproken varianten in dit hoofdstuk wel rekening gehouden wordt met congestie. (Kok, 2010)

5.2. Vehicle Routing Problem (VRP)

5.2.1. Algemeen

Het VRP heeft ontzettend veel aandacht gekregen in de literatuur. Dantzig en Rantser (1959) bespraken als eerste dit probleem. Het VRP kan gedefinieerd worden als het probleem om een aantal voertuigen optimaal te verdelen zodat aan de vraag van alle klanten wordt voldaan en er een aantal doelfuncties worden geoptimaliseerd. Elke klant mag slechts één keer worden bediend door slechts één voertuig en elk voertuig vertrekt uit een depot. (Cordeau et al., 2005; Kok, 2010; Müller, 2010)

Het VRP is een veralgemening van het Traveling Salesman Problem (TSP), omdat het TSP hetzelfde probleem kent maar dan maar met slechts één voertuig. (Cordeau et al., 2005; Kok, 2010)

Omdat de condities verschillen van omgeving tot omgeving, zullen de doelstellingen en de beperkingen die men in de praktijk tegenkomt ook variëren. Het meeste onderzoek naar algoritmes en softwareontwikkeling in dit gebied richt zich vooral op een beperkt aantal prototypeproblemen. (Cordeau et al., 2005)

De introductie van microcomputers heeft ervoor gezorgd dat onderzoekers het VRP sneller kunnen oplossen. Ook zorgen deze microcomputers ervoor dat grotere problemen aangepakt kunnen worden. Daardoor steeg het aantal artikels dat gepubliceerd werd significant in de jaren 80 en vooral in de jaren 90. Toen werden ook bewerkingsmethoden ontwikkeld om kwalitatieve oplossingen te vinden, wat dan weer leidde tot de ontwikkeling van metaheuristieken. (Eksioglu et al., 2009)

5.2.2. Oplossingsmethoden van VRP: exacte methoden

Oplossingsmethoden voor het VRP kunnen opgedeeld worden in twee categorieën. De eerste zijn de exacte methoden. Deze methoden zijn ontworpen om het probleem op een optimale manier op te lossen. Dat is in praktijk moeilijk, omdat het VRP een veralgemening van het TSP is. Omdat het TSP al een non-deterministic polynomial-time hard (NP-hard) probleem is,

kunnen enkel instanties van kleine problemen optimaal opgelost worden binnen een respectabele rekentijd. (Cordeau et al., 2005; Kok, 2010)

Het VRP wordt vaak beschreven als een integer lineair programmeerprobleem (ILP). De belangrijkste exacte methoden kunnen dan opgesplitst worden in drie categorieën, namelijk de branch & bound methoden, dynamisch programmeren (DP) en andere ILP-algoritmes. De branch & bound methode is een belangrijke oplossing, die veel wordt aangehaald in de literatuur. Het wordt apart besproken, hoewel het ook een ILP-algoritme is. De branch & bound is een methode gebaseerd op complete opsomming. Het basisconcept van branch & bound is het principe van verdelen en veroveren: omdat het originele probleem te groot is om in één keer op te lossen, wordt het probleem opgedeeld in kleinere subproblemen zodat deze afzonderlijk uitgewerkt kunnen worden. Het verdelen wordt gedaan door de hele set van mogelijke oplossingen herhaaldelijk op te splitsen in steeds kleinere subsets. Het veroveren gebeurt partieel door de kwaliteit van een oplossing in een subset te beschouwen als een grens en vervolgens de subset weg te laten wanneer die grens erop wijst dat de oplossing onmogelijk de optimale oplossing kan bevatten voor het hele systeem. Dit "veroveren" gebeurt aan de hand van drie testen, die teruggevonden kunnen worden in Hillier en Lieberman (2005). Als slimme grenzen gebruikt worden op partiële oplossingen en systematische opsommingen, kunnen grote sets van mogelijke oplossingen uitgesloten worden. (Hillier en Lieberman, 2005; Cordeau et al., 2005; Kok, 2010)

Naast de branch & bound methode zijn er nog een heel aantal andere ILP algoritmes waarmee het VRP exact kan worden opgelost. Als enkel een aantal waarden gehele getallen moeten zijn, dan noemt men dit probleem mixed integer programming (MIP). Als de waarden binaire getallen zijn, dan heet het probleem binary integer programming (BIP). Binnen ILP blijken vooral set partitioning en column generation succesvol te zijn. Set partitioning is gebaseerd op het definiëren van binaire beslissingsvariabelen voor elke haalbare route. De moeilijkheid van deze formuleringen is dat ze leiden tot een gigantisch aantal binaire beslissingsvariabelen. Dit kan dan weer opgelost worden met column generation, dat ervoor zorgt dat het aantal variabelen verminderd wordt. Column generation is een manier om een klein deel van het probleem op te lossen en te analyseren zodat het volgende deel kan worden opgelost. Er worden dus kolommen toegevoegd, wat betekent dat

in het duaal probleem een extra beperking wordt toegevoegd. Daarom kan column generation worden gezien als een soort cutting plane methode, waarover later meer. Een ILP probleem lijkt redelijk gemakkelijk op te lossen, omdat LP problemen extreem efficiënt opgelost kunnen worden en ILP problemen nog minder mogelijke oplossingen hebben (omdat de waarden integer moeten zijn). Het blijkt zelfs dat ILP problemen binnen een begrensde haalbare regio gegarandeerd zijn om maar een eindig aantal oplossingen te hebben. Er zijn echter twee grote gaten in deze redenering. Ten eerste is "een eindig aantal oplossingen" geen efficiënte parameter, want het aantal kan zo nog steeds astronomisch hoog liggen. Ten tweede berust de assumptie dat door het verwijderen van een aantal haalbare oplossingen (de non-integere oplossingen) van een LP probleem het ILP probleem makkelijker oplosbaar is, op een denkfout. Aangezien de zekerheid voor een optimale oplossing van een LP probleem ligt in het feit dat rekening gehouden wordt met alle oplossingen, zal die zekerheid wegvallen bij het ILP probleem. ILP problemen zijn dus moeilijker oplosbaar dan LP problemen. De drie belangrijkste determinanten voor de rekenkundige moeilijkheid van een ILP probleem zijn het aantal integere variabelen, of deze variabelen zelf nu integer of binair zijn, en de speciale structuur van het probleem (het aantal beperkingen, het doel...). (Cordeau et al., 2005; Hillier en Lieberman, 2005; Kok, 2010)

Naast de ILP algoritmes is ook dynamisch programmeren (DP) een mogelijke werkwijze om het VRP exact op te lossen. DP is gebaseerd op een sequentieel gebouwde route voor voertuigen. Complete opsomming wordt in deze methode vermeden door enkel optimale partiële routes uit te breiden. Deze formule bevat een flexibel raamwerk zodat verschillende VRP-varianten kunnen worden opgelost. DP is een bruikbare mathematische techniek voor het maken van een reeks onderling gerelateerde beslissingen en verstrekt een systematische procedure voor het bepalen van de optimale combinatie van beslissingen. In wat volgt zullen een aantal kenmerken van DP-problemen besproken worden. Ten eerste kan het gehele probleem opgesplitst worden in fasen, waarbij een beleidsbeslissing genomen wordt in elke fase. Elke beslissing correspondeert dus met een fase. Ten tweede hebben alle fasen een aantal toestanden, verbonden met het begin van de fase. De toestanden zijn de verschillende mogelijke condities die het systeem kan hebben in elke fase van het probleem. Ten derde zal het effect van de beleidsbeslissing op elke fase de huidige toestand

transformeren naar een toestand geassocieerd aan het begin van de volgende fase. Ten vierde vindt de oplossingsprocedure van een DP-probleem steeds een optimaal beleid voor het totale probleem. Er wordt dus voor elke fase een optimale beslissing gevonden voor elke mogelijke toestand. Een vijfde eigenschap van een DP-probleem is dat het optimaal beleid voor de resterende fases onafhankelijk is van de beleidsbeslissingen van de vorige fases. Dat wordt ook wel het principe van optimaliteit van het dynamisch programmeren genoemd. De oplossingsprocedure begint bij het vinden van het optimaal beleid bij de laatste fase. Een recursieve relatie die het optimaal beleid voor fase n vindt, gegeven het optimaal beleid voor fase $n+1$, is tevens beschikbaar. Een laatste eigenschap heeft te maken met het gebruiken van de recursieve relatie. Wanneer die wordt toegepast, dan start de oplossingsprocedure aan het einde van de fasereeks en beweegt die fase per fase achterwaarts, waarbij elke keer het optimaal beleid gezocht wordt voor die fase. Die procedure herhaalt zich totdat het optimaal beleid gevonden is bij de initiële fase. DP is uitermate geschikt om de beste combinatie van oplossingen te vinden bij vooral grote problemen. Natuurlijk moet een probleem wel aan alle bovenstaande kenmerken voldoen voordat het een DP-probleem is. Kok (2010) lost het VRP-probleem op met DP door het aantal staten (of klanten) te nemen als het aantal fases en dan kan vanuit een bepaalde staat geopteerd worden om ofwel naar een andere klant te gaan of niet te gaan. Dus het doel is om in elke fase de beste klant te kiezen om vanuit te vertrekken. Dat zijn dan de verschillende toestanden van deze procedure. Door gebruik te maken van het principe van Malandraki en Dial (1996) waar een ondergrens wordt geplaatst op het aantal staten waar de chauffeur naartoe kan rijden vanuit zijn positie, wordt de tijd die nodig is om het probleem op te lossen geminimaliseerd. Hier wordt het aantal staten begrensd met een parameter H . (Hillier en Lieberman, 2005; Kok, 2010)

5.2.3. Oplossingsmethoden van VRP: heuristieken

Er kunnen ook heuristieken gebruikt worden om een VRP op te lossen. Die heuristieken worden opgesplitst in twee categorieën, namelijk constructieve heuristieken en verbeteringsmethoden. Constructieve methoden zijn vaak heel snel en leveren altijd een oplossing. De meest gekende constructieve heuristiek is de nearest-neighbor heuristiek. Die start de eerste route met de klant die het dichtst bij het depot gelokaliseerd is en breidt de

route dan telkens uit met de klant die het dichtst bij ligt. Wanneer geen extensies meer mogelijk zijn – omdat de maximale vrachtcapaciteit van het voertuig bereikt is – wordt de volgende route geïnitieerd met een nieuw voertuig. Die planningsprocedure blijft doorgaan tot alle klanten bereikt zijn. Er zijn ook nog andere constructieve heuristieken, zoals het sweep-algoritme of de savings-heuristiek. De savings-heuristiek is gebaseerd op het feit dat het combineren van twee verschillende routes tot één route, zodat de laatste klant van de eerste route direct wordt opgevolgd door de eerste klant van de tweede route, betere resultaten geeft. Op deze manier worden een voertuig en de additionele afstand van een terugrit naar het depot uitgespaard. Bij het sweep-algoritme worden klantenroutes gevonden door een rechte lijn te trekken die vertrekt vanuit het depot en dan deze lijn te roteren rond het depot. Elke keer dat die lijn een klantlocatie snijdt, wordt de klant toegevoegd aan de route, indien nog genoeg capaciteit aanwezig is. (Cordeau et al., 2005; Kok, 2010)

De tweede categorie van heuristieken bestaat uit de verbeteringsmethoden. Dat zijn methoden die een oplossing als input vereisen. Deze methoden behoren tot de klasse van de lokale zoekmethoden. De eerste verbeteringsmethoden werden enkel toegepast op één route, ze waren dus ontworpen voor het TSP en niet voor het VRP. Deze methoden zijn gebaseerd op veranderingen in de verbindingen zodat de volgorde van de klanten wijzigen in een route. Een voorbeeld hiervan zijn de λ -opt algoritmen, waar λ verbindingen worden verwijderd van de originele oplossing en vervangen door λ andere verbindingen. De systemen ontworpen voor een VRP leiden tot een grotere klasse van verbeteringsstrategieën. Een voorbeeld van een lokale verbeteringsprocedure is de hill-climbing procedure. Deze heuristiek met een initiële proefoplossing zoekt bij elke iteratie naar een betere oplossing in de directe omgeving van de oude oplossing. Dit proces blijft doorgaan tot er geen betere oplossing gevonden wordt in de directe omgeving. Het grootste nadeel van dit type strategieën is dat ze kunnen leiden tot een lokaal optimum en dus niet tot een globaal optimum. Daarom zijn een aantal mechanismen ontworpen, metaheuristieken genaamd, om van deze lokale optima tot betere optima te komen en indien mogelijk tot een globaal optimum. Metaheuristieken zijn algemene oplossingsmethoden die zowel voor een algemene structuur als voor strategierichtlijnen

zorgen, zodat een specifieke heuristische methode overeenkomt met een specifiek soort van probleem. (Hillier en Lieberman, 2005; Kok, 2010)

5.2.4. Oplossingsmethoden van VRP: metaheuristieken

Metaheuristieken kunnen ruwweg in drie klassen opgedeeld worden: lokale zoekstrategieën, populatie-zoekstrategieën en leermechanismen. Een eerste metaheuristiek is simulated annealing, waar bepaalde achteruitgangen worden geaccepteerd met een bepaalde waarschijnlijkheid. Door dit toe te laten, kan men losraken van lokale optima om zo een betere oplossing te vinden. De waarschijnlijkheid voor het accepteren van de achteruitgang wordt initieel een hoge waarde toegekend, die vervolgens telkens lager gezet wordt wanneer een vooraf bepaald aantal iteraties zijn gebeurd. Deterministic annealing is een andere metaheuristiek en is gelijkaardig aan simulated annealing. Het grote verschil is dat hier gebruik gemaakt wordt van een deterministische drempelwaarde voor de acceptatie van de oplossingen. Dan is er tabu search, waarbij de beste nabije oplossing gekozen wordt. Deze nieuwe oplossing ligt één stap van de laatst aanvaarde oplossing af en wordt gevonden door gebruik te maken van verbeteringsheuristieken. Om te vermijden dat de volgende stap ertoe zal leiden dat de oplossing terug naar het oude lokale optimum gaat, wordt de oude oplossing op een tabu-lijst gezet. Die lijst kan dan een bepaald aantal oudere oplossingen bijhouden. De bedoeling van de tabu-lijst is om te voorkomen dat een stap gezet wordt die tot een van de oude oplossingen leidt. (Cordeau et al., 2005; Kok, 2010)

Simulated annealing, deterministic annealing en tabu search zijn voorbeelden van het type van de lokale zoekstrategie. Het grote nadeel van dit type metaheuristiek ligt in de beginoplossing, die gevonden moet worden vooraleer deze metaheuristieken kunnen worden gebruikt. Om de beginoplossing te vinden worden lokale zoekmethoden gebruikt. (Cordeau et al., 2005; Kok, 2010)

Naast de lokale zoekstrategieën zijn er de populatie-zoekstrategieën. Voorbeelden daarvan zijn de genetische zoekmethode en adaptieve geheugenprocedures. De bedoeling van dit type metaheuristiek is om een aantal generaties in de populatie te creëren. Bij adaptieve geheugenprocedures wordt een kind gecreëerd door elementen uit verschillende ouders te

nemen en ze te combineren. In een genetisch algoritme worden willekeurig twee ouders gekozen uit een populatie en wordt een kind gecreëerd door elementen uit beide ouders te nemen. Dan worden in de populatie de twee slechtste ouders vervangen door deze kinderen, zodat uiteindelijk de beste elementen overblijven. (Cordeau et al., 2005; Kok, 2010)

Voorbeelden van het derde en laatste type metaheuristieken ten slotte, de zogenaamde leermechanismen, zijn ant colony optimization en neural networks. Neurale netwerken zijn bijvoorbeeld modellen gemaakt uit intergerelateerde eenheden, zoals neuronen in het brein. Zij bekomen een oplossing door een feedbackmechanisme dat de gewichten van de verbindingen tussen de eenheden aanpast zodat de geobserveerde output dichter naar de beschreven output toegaat. Het ant colony optimization algoritme is afgeleid van een analogie met mieren, die een soort van feromoon achterlaten wanneer ze aan het wandelen zijn, waardoor ze weten waar het voedsel zich bevindt. Andere mieren kunnen de feromonen ruiken en weten zo waar het voedsel is, waardoor ze dezelfde weg gebruiken en meer feromonen op deze weg achterlaten. Uitgewerkt voor een VRP ziet dat er zo uit: een beweging krijgt een hogere kans toegewezen, wanneer die in vorige iteraties tot een goede oplossing geleid heeft. Al deze metaheuristieken worden uitgebreid besproken in Hillier en Lieberman (2005) en Cordeau et al. (2005). (Cordeau et al., 2005; Kok, 2010)

Aangezien problemen in de werkelijke wereld gewoonlijk groter en gecompliceerder zijn dan de theoretische testproblemen, zijn er oplossingen nodig die redelijk snel kunnen bekomen worden. Tevens moet de kwaliteit van de oplossing acceptabel zijn. De gemiddelde kwaliteit ligt doorgaans lager bij lokale heuristieken dan bij metaheuristieken. Metaheuristieken hebben echter wel een aantal andere problemen. Ten eerste liggen de bewerkingstijden hoger dan bij gewone heuristieken, zodat het soms ongunstig is om deze types van algoritmen te gebruiken. Ten tweede geven metaheuristieken betere oplossingen dan simpele heuristieken, maar het uitvoeren van het algoritme van de metaheuristiek duurt meestal langer doordat het een aantal keren moet worden herhaald voordat de beste oplossing gevonden is. Door het tijdsgebrek dat de mensen in het dagelijks leven meestal parten speelt, kunnen gewone heuristieken in sommige gevallen beter zijn dan metaheuristieken. (Müller, 2010)

5.3. Varianten van VRP

5.3.1. Capacitated Vehicle Routing Problem

De meest gekende variant van VRP is de Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP). In het CVRP moet een homogeen aantal voertuigen, gelokaliseerd aan een depot, een aantal klanten bedienen. Elk voertuig heeft een capaciteit en elke klant een vraag. Het probleem hier is om voor elk voertuig een rondrit te vinden die start en eindigt aan het depot, zodat de totale reisafstand geminimaliseerd wordt en de totale vraag in elke rondrit niet groter is dan de capaciteit van het voertuig. De oplossingen die hierboven besproken werden voor het VRP zijn ook allemaal toepasbaar op het CVRP. De beste exacte methode voor een CVRP zijn de branch & cut algoritmen. Dat is een veralgemening van de branch & bound methode waarin, nadat het LP-relaxatie probleem opgelost is, een cut wordt gezocht die niet voldoet aan de oplossing van de huidige LP-relaxatie. Deze cuts worden vervolgens toegevoegd aan de formulering en het LP-probleem wordt opnieuw opgelost. Cutting planes is een methode die beperkingen toevoegt aan een lineair probleem tot de optimale haalbare oplossing integere waarden aanneemt. Een gedetailleerde uitleg van branch & cut algoritmen wordt gegeven in het artikel van Naddef en Rinaldi (2002). (Cordeau et al., 2005; Kok, 2010)

5.3.2. Vehicle Routing Problem with Time Windows

Een belangrijke extensie van het VRP is het Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW). Bij het VRPTW heeft elke klant (i) een tijdsvenster $[a_i, b_i]$ waarin de service moet gebeurd zijn. In het geval dat een voertuig te vroeg bij de klant arriveert (voor a_i), moet de chauffeur wachten tot het openingsuur van het tijdsvenster. Dit is het tijdstip dat de klant beschikbaar is voor de dienst. Het is niet toegelaten dat een voertuig te laat bij de klant is, dat wil zeggen nadat het tijdsvenster afgelopen is (na b_i). Ter nuancering moet worden toegevoegd dat dit niet voor alle tijdsvensters geldt. Het geldt bij harde tijdsvensters, doch niet bij zachte tijdsvensters. Bij die laatste is het nog altijd mogelijk om te leveren buiten het tijdsvenster, zij het tegen een boete. Als er van een zacht tijdsvenster gebruik gemaakt wordt, kunnen oplossingen gevonden worden die lagere totale kosten veroorzaken, maar waar op hetzelfde moment de boetes stijgen. De doelstelling bij zachte tijdsvensters is het minimaliseren van de totale transportkosten, die zowel bestaan uit de vaste kosten van het

voertuig, de afstandskosten en de boetes. Een probleem ontstaat wanneer meer en meer klanten in de route worden opgenomen. Dan kunnen de boetes stijgen wanneer tegelijkertijd de totale kosten verminderd worden. Deze twee conflicterende effecten zorgen ervoor dat er geen unieke optimale oplossing is. De oplossingen zijn afwegingen tussen de totale kosten en de boetes. De beslissingnemer moet de oplossing kiezen die het probleem het beste schikt. In gevallen waar boetes ervoor zorgen dat minder voertuigen gebruikt worden of substantiële besparingen in de totale afstand zijn, kunnen boetes een acceptabele last worden. Het blijkt dat bij zachte tijdsvensters de mogelijkheid om boetes te gebruiken voor lagere totale kosten, afhankelijk is van de geografische distributie van de klanten. Bovendien blijkt dat het verschil tussen de afstandskosten en vaste kosten van het voertuig een significante factor is. Hoe hoger het verschil tussen de vaste en variabele kosten, hoe aantrekkelijker de oplossingen waarbij minder voertuigen nodig zijn. In deze wereld kan dit verschil als redelijk hoog gezien worden; een bedrijf spaart dus veel uit door minder voertuigen te gebruiken en dus boetes te aanvaarden. Veel hangt echter af van het belang van de klant in kwestie. Als het om een belangrijke klant gaat, kan ervoor geopteerd worden om niet buiten het tijdsvenster te leveren. (Cordeau et al., 2005; Kok, 2010; Müller, 2010)

Het VRPTW is net als het CVRP en het VRP een NP-hard probleem. De exacte methoden kunnen opgesplitst worden in drie categorieën, namelijk het dynamisch programmeren, Dantzig-Wolfes kolomgeneratie en Lagranges decompositie. Exacte oplossingen zijn zeer tijdsconsumerend, waardoor ze niet geschikt zijn voor toepassingen die in het dagelijks leven voorkomen. Dus worden vaker benaderingsmethoden, namelijk heuristieken en metaheuristieken gebruikt. Onderzoek heeft zich de laatste jaren vooral gericht op het zoeken naar heuristieken om dit probleem aan te pakken. Heuristieken kunnen namelijk het probleem veel sneller oplossen dan exacte algoritmes en soms worden ze gebruikt om een bovengrens te geven aan de exacte methode. Een totaaloverzicht van de belangrijkste exacte algoritmen (en formuleringen) en heuristieken kan worden teruggevonden in Kallehauge (2008), Bräysy en Gendreau (2005a, 2005b) en Cordeau et al. (2005). Omdat deze heuristieken in een later hoofdstuk gebruikt zullen worden om een optimum te bereiken, zullen de belangrijkste hier opgesomd worden. Men heeft ten eerste het Or-opt algoritme. Dit algoritme verwijderd een aantal verbindingen en voegt ze weer toe op een andere locatie. Dit kan wel enkel binnen één route gebeuren, dus er is geen uitwisseling van klanten

tussen verschillende routes mogelijk. De tweede belangrijke methode is de exchange operator. Deze heuristiek zal twee klanten van verschillende routes wisselen. Op deze manier wil men de reistijd verminderen tussen deze locaties. De derde methode, die gebruikt zal worden, is de relocate operator. Deze operator zal locaties overbrengen van de ene route naar de andere om een vermindering van reistijd te krijgen. Hier moet wel de opmerking gemaakt worden dat deze heuristieken bij een VRPTW horen, waardoor de tijdsvensters ook belangrijk zijn. Bij de reistijd hoort dan ook de mogelijke wachttijd van de vrachtwagenchauffeur tot de opening van het tijdsvenster. (Bräysy en Gendreau, 2005a; Bräysy en Gendreau, 2005b; Cordeau et al., 2005; Donati et al., 2008; Figliozzi, 2009; Kallehauge, 2008; Kok, 2010; Müller, 2010)

Het VRPTW heeft verschillende toepassingen in distributiemanagement. Voorbeelden hiervan zijn drank- en voedselleveringen en commerciële en industriële afvalverwerking. (Cordeau et al., 2005)

Omdat gebruik wordt gemaakt in het praktijkprobleem van een Time Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows en er nog geen eenduidige formulering hiervan bestaat, zal een formulering gegeven worden van een VRPTW, waar wel al een formulering van bestaat.

Volgens Cordeau et al. (2005) kan VRPTW (met harde tijdsvensters) gedefinieerd worden als $G = (V, A)$ waar $|V| = n+2$ en het depot wordt weergegeven door twee knooppunten 0 en $n+1$. Uitvoerbare routes worden gecorrespondeerd aan paden startend met knooppunt 0 en eindigend met knooppunt $n+1$. Het totale aantal voertuigen wordt genoteerd door K , waar $|K| = m$. Laat s_i de diensttijd zijn op tijdstip i (met $s_0 = s_{n+1} = 0$) en laat t_{ij} de reistijd zijn van i naar j . Een tijdsvenster $[a_i, b_i]$ wordt geassocieerd met elke "vertex" $i \in N = V \setminus \{0, n+1\}$, tijdsvensters $[a_0, b_0]$ en $[a_{n+1}, b_{n+1}]$ kunnen ook geassocieerd worden met de depot knooppunt. Als er geen specifieke beperkingen zijn op de beschikbaarheid van de voertuigen, kan men gewoon $a_0 = \min_{i \in N} \{a_i - t_{0i}\}$, $b_0 = \max_{i \in N} \{b_i - t_{0i}\}$, $a_{n+1} = \min_{i \in N} \{a_i + s_i + t_{i, n+1}\}$ en $b_{n+1} = \max_{i \in N} \{b_i + s_i + t_{i, n+1}\}$. Laat q_i de vraag van een klant i zijn en Q de capaciteit van het voertuig. Het model heeft twee types van variabelen: binaire variabelen x_{ij}^k , $(i, j) \in A$, $k \in K$, gelijk aan 1 enkel en alleen als een verbinding (i, j) gebruikt wordt door

voertuig k , en continue variabelen w_i^k , $i \in N$, $k \in K$, die de tijd aangeven wanneer een voertuig k vertrekt om knooppunt i te bedienen. Laat $\delta^+(i) = \{j : (i, j) \in A\}$ en $\delta^-(j) = \{i : (i, j) \in A\}$. Het probleem kan dan als volgt geformuleerd worden:

Minimaliseer:

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

met de volgende beperkingen:

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

$$\sum_{j \in \delta^+(0)} x_{0j}^k = 1 \quad (k \in K) \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \delta^-(j)} x_{ij}^k - \sum_{i \in \delta^+(j)} x_{ji}^k = 0 \quad (k \in K, j \in N) \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \delta^-(n+1)} x_{i,n+1}^k = 1 \quad (k \in K) \quad (4)$$

$$x_{ij}^k (w_i^k + s_i + t_{ij} - w_j^k) \leq 0 \quad (k \in K, (i, j) \in A) \quad (5)$$

$$a_i \leq w_i^k \leq b_i \quad (k \in K, i \in V) \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} q_i \sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ij}^k \leq Q \quad (k \in K) \quad (7)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad (k \in K, (i, j) \in A) \quad (8)$$

De doelfunctie minimaliseert de totale kosten. Deze functie kan nog uitgebreid worden wanneer de tijdsvensters zacht zijn, waar boetes nog moeten worden opgenomen in de doelfunctie. Beperking (1) zorgt ervoor dat elke klant één keer wordt bezocht, terwijl beperking (2) tot (4) verzekeren dat elk voertuig exact één keer wordt gebruikt en dat er aan de "flow conservation" op elk knooppunt bij de verschillende klanten wordt voldaan. Flow conservation zorgt er algebraïsch voor dat de som van de reis door een verbinding gericht naar een knooppunt plus het aanbod van dat knooppunt, gelijk is aan de som van de reis door een verbinding gericht weg van dat knooppunt plus de vraag van dat knooppunt. De consistentie van de tijdsvariabele w_i^k wordt verzekerd door de vijfde beperking, terwijl de tijdsvensters (die hard zijn) worden opgelegd in beperking (6). Deze beperkingen zorgen er tevens voor dat geen subtour mogelijk is. Ten slotte zorgt beperking (7) dat de maximale capaciteit van de vrachtwagens niet overschreden wordt. (Cordeau et al., 2005)

5.3.3. Pickup and Delivery Problem

Een ander type van VRP is het Pickup en Delivery Problem (PDP). Hier kan een onderscheid gemaakt worden tussen twee grote klassen. De eerste refereert naar situaties waar goederen opgepikt en/of geleverd worden tussen een klant en een depot. In deze klassen worden een aantal onderverdelingen gemaakt naargelang de voorwaarde van het oppikken of leveren verandert. Een voorbeeld van zo een subdivisie kan zijn dat goederen enkel op het eerste depot kunnen worden opgepikt en dat ze enkel bij de klant kunnen worden geleverd. Voor een uitgebreide classificatie kan Parragh et al. (2008a) geraadpleegd worden. De tweede PDP-klasse omvat alle problemen waarbij goederen (of passagiers) getransporteerd worden tussen ophaal- en leverplaatsen. Hier wordt elk verzoek van de klant gegeven door een locatiepaar (i, j) waar een hoeveelheid moet worden opgepikt op locatie i en afgeleverd op locatie j . Hier worden eveneens subdivisies gemaakt aan de hand van een aantal voorwaarden. Deze kunnen worden teruggevonden in Parragh et al. (2008b). Elk paar wordt bediend door één voertuig en natuurlijk moet eerst iets worden opgepikt voordat het kan worden afgeleverd. Bij beide klassen mag de totale hoeveelheid goederen die in elk voertuig zit de capaciteit van het voertuig niet overstijgen. Ook dit probleem is een NP-hard probleem. Van het PDP bestaan drie bekende types die onderzocht worden. Het eerste type is de single-commodity PDP waarbij één type van goederen wordt opgepikt of

geleverd op elke plaats. Een voorbeeld is het oppikken en leveren van geld aan een bank. Het tweede type is de two-commodity PDP waarbij gekozen wordt tussen twee types van goederen en waarbij elke plaats zowel als lever- en als afhaalplaats kan acteren. Een voorbeeld hiervan zijn bier- en drankleveringen, waar de voertuigen eerst volle flessen afzetten om vervolgens de lege terug mee te nemen. Het derde en laatste type bestaat uit de n-commodity problemen, die voorkomen wanneer elk artikel overeenkomt met één levering en één ophaling. Dit gebeurt wanneer passagiers moeten worden vervoerd van de ene plaats naar de andere. Net als bij de vorige problemen kan hier een onderscheid gemaakt worden tussen exacte algoritmen en heuristieken. Deze kunnen voor elk type teruggevonden worden in Cordeau et al. (2004) en Parragh et al. (2008a, 2008b). (Cordeau et al., 2004; Kok, 2010; Parragh et al., 2008a; Parragh et al., 2008b)

Ten slotte moet nog worden vermeld dat elke variant van VRP tot nu toe besproken, een beperking heeft ten opzichte van de oplossing die TDVRP biedt, namelijk dat deze varianten allemaal aannemen dat reistijden tijdsonafhankelijk en proportioneel aan de reisafstanden zijn. De laatste variant van een VRP, dat uitgebreid besproken zal worden, is het TDVRP. (Kok, 2010)

5.4. Time Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP)

5.4.1. Algemeen

Door de toegenomen verkeerscongestie van de afgelopen jaren is het steeds duidelijker geworden dat modellen die tijdsonafhankelijke reistijden aannemen, falen in de praktijk. Daarom heeft men het TDVRP ontwikkeld, een model dat wél rekening houdt met mogelijke filevorming op de weg. Reistijden worden in het TDVRP als tijdsafhankelijk beschouwd, dus afhankelijk van het tijdstip waarop de bestuurder vertrekt bij het depot of de klant. Het uiteindelijke doel van elke oplossing is de minimalisering van enerzijds de totale reistijd en anderzijds het aantal ritten. Eerst wordt het aantal ritten geminimaliseerd, en pas wanneer het aantal ritten in de verschillende oplossingen gelijk is, wordt er gekeken naar de totale reistijd. Wanneer andere doelfuncties of variaties van deze functies voorkomen, worden ook die in onderstaande bespreking vermeld. Oplossingen die gevonden worden zonder tijdsvensters in rekenschap te nemen, resulteren vaak in suboptimale of onmogelijke

oplossingen. Tevens moet vermeld worden dat, net als alle problemen die een extensie van het VRP zijn, het TDVRP een NP-hard probleem is. (Balseiro et al., 2011; Kok, 2010; Donati et al., 2008)

Enkele veronderstellingen die gemaakt worden zijn de volgende: elke route begint en eindigt in een vast depot, elk voertuig bedient één route, de klanten worden in één keer bediend door één voertuig en er wordt voldaan aan de capaciteitsbeperkingen van het voertuig en aan de vraag van elke klant. (Ichoua et al., 2003)

Het TDVRP is een vrij nieuw model, met als gevolg dat er in de literatuur nog maar relatief weinig artikels aan zijn gewijd. In tabel 2 wordt een kort overzicht gegeven van verscheidene auteurs en de oplossingen die worden aangeboden in de artikels, met telkens ook de belangrijkste beperkingen. In de laatste kolom wordt aangegeven of er een afwijking is van de originele doelfunctie die hierboven werd aangehaald, namelijk het minimaliseren van het aantal ritten en/of de totale reistijd. Deze tabel wordt in de volgende paragrafen verder besproken.

Tabel 2: Overzicht literatuurstudie TDVRP

Auteurs	Oplossing	1 depot	FIFO-principe	Tijdsvensters	Variatie doelfunctie
	Nearest-neighbor/ Cutting plane	Nee	Niet voldaan	Hard	Ja
Malandraki & Daskin (1992)					Ja
Ichoua et al. (2003)	Tabu search	Ja	Voldaan	Zacht	Ja
Donati et al. (2008)	Ant colony	Ja	Voldaan	Hard	Nee
Balseiro et al. (2011)	Ant colony	Ja	Voldaan	Hard	Nee
Kuo et al. (2009)	Tabu search	Ja	Voldaan	Ja	Ja
Kuo et al. (2010)	Simulated annealing	Ja	Voldaan	Nee	Ja
Haghani & Jung (2005)	Genetisch algoritme	Ja	Voldaan	Zacht	Nee
Chen et al. (2006)	Or-opt algoritme	Ja	Voldaan	Hard	Nee
Soler et al. (2009)	Assymetric CVRP	/	Voldaan	Hard	Nee
Fleischmann et al. (2004)	Verskillende heuristieken	Ja	Voldaan	Hard	Nee
Kok (2010)	DP heuristiek	Beide	Voldaan	Ja: Uitbreiding	Ja

5.4.2. Oplossingsmethoden

De eerste auteurs die het probleem van TDVRP en TDTSP erkenden, waren Malandraki en Daskin (1992). Zij stelden een Mixed Integer Linear Programming (MILP)-formulering voor en bespraken twee heuristieken om het TDVRP op te lossen. Die heuristieken kunnen worden opgesplitst in sequentiële en gelijktijdige routeconstructieheuristieken, proberen de totale tijd te minimaliseren en houden – in tegenstelling tot latere modellen – geen rekening

met het aantal voertuigen dat gebruikt werd. Ze modelleren tijdsafhankelijke reistijden met discontinue (stapsgewijze) functies en harde tijdsvensters en nemen aan dat er een vaste vraag is, die dus niet meer aangepast kan worden na de planning. Dit model bleek onrealistisch: sommige voertuigen zouden andere voertuigen inhalen die eerder op dezelfde plaats vertrokken waren, wanneer het tijdsinterval waarin het tweede voertuig vertrok snellere reistijden gaf dan het tijdsinterval waarin het eerste voertuig was vertrokken. Dat druist in tegen het First In First Out (FIFO)-principe of de non-passing-eigenschap. Het probleem wordt geïllustreerd in onderstaande figuur. (Kok, 2010; Malandraki en Daskin, 1992)

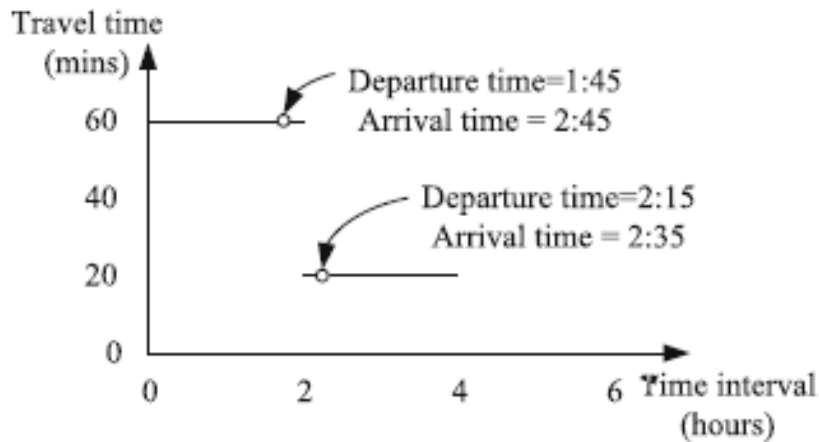


Fig. 1. Example of "passing" situation.

Figuur 4: FIFO-principe (Kuo,2009)

Gegeven in figuur 4 zijn een voertuig A dat vertrekt om 1u45min en 60min moet rijden om zijn bestemming te bereiken, en een voertuig B dat 30min later vertrekt maar omdat het in een beter tijdsinterval zit dan voertuig A duurt de rit maar 20min, waardoor dit voertuig vroeger aankomt dan voertuig A, namelijk om 2u35min. Dat is in de realiteit onmogelijk indien de twee voertuigen dezelfde route nemen en dezelfde snelheden aanhouden.

Voor het TDTSP hebben Malandraki en Daskin (1992) een nearest-neighbor en een cutting plane heuristiek ontwikkeld. De nearest-neighbor is niet dezelfde als de eerder besproken gelijknamige heuristiek voor het originele TSP, want dat leidde tot suboptimale oplossingen. Malandraki en Daskin hebben de heuristiek aangepast zodat er betere oplossingen mee

gevonden konden worden. Het nadeel van de heuristieken is dat ze nog geen rekening houden met tijdsvensters en dus eigenlijk onbruikbaar zijn in de praktijk. (Malandraki en Daskin, 1992)

Een andere oplossing voor het TDVRP kan gevonden worden in het ant colony systeem, zoals Donati et al. (2008) en Balseiro et al. (2011) hebben beschreven. Donati et al. (2008) gaan er van uit dat de tijd die nodig is om van a naar b te gaan niet hetzelfde als de tijd om van b naar a te gaan. Zowel Donati et al. (2008) als Balseiro et al. (2011) gaan bovendien uit van het FIFO-principe en het gebruik van één depot. Hier zijn de tijdsvensters hard. De levering mag dus niet buiten het tijdsvenster bezorgd worden. In het artikel van Balseiro et al. (2011) wordt verondersteld dat de capaciteit van het voertuig gelimiteerd is en dat de klanten tijdsvensters hebben. Donati et al. (2008) hebben een aantal lokale zoekoperaties ontwikkeld die toegepast kunnen worden op een TDVRP om een betere oplossing te vinden. Daarvoor definiëren ze een slack variabele, die aangeeft hoeveel speling de chauffeur heeft voordat hij/zij zijn tijdsvenster overschrijdt waardoor de oplossing niet meer aanvaardbaar is. Om te evalueren of een bepaalde beweging bijdraagt tot de kwaliteit van een oplossing, moet worden nagegaan wat de invloed van deze beweging is op elke klant. Eerst wordt een lokale evaluatie gedaan van alle individuele ritten en dan wordt het totale effect geëvalueerd op de nieuwe rondrit om te controleren of de beweging ook werkelijk een verbetering is. Balseiro et al. (2011) hebben een invoegheuristisch geïmplementeerd die de klanten die nog niet in de rondrit zitten, proberen te incorporeren in de oplossing. Omdat er bij een oplossing gecreëerd door een ant colony systeem altijd klanten zijn die niet in de rondrit zitten, hangt het succes van een dergelijk type algoritme af van de prestatie van het post-insertiesysteem. (Balseiro et al., 2011; Donati et al., 2008)

Een andere methode om het TDVRP op te lossen is tabu search, zoals ontwikkeld door Kuo et al. (2009) en Ichoua et al. (2003). Hierbij dient te worden vermeld dat zij als doel hebben om de totale reistijd te minimaliseren en niet het aantal rondritten. In beide artikels worden capaciteitsbeperkingen in rekenschap genomen, alsook het FIFO-principe. Ichoua et al. (2003) zijn de eersten die in het TDVRP aan dit principe voldeden. De artikels vóór 2003 voldeden nooit aan dit principe. In het tabu search algoritme van Ichoua et al. (2003) heeft elk voertuig kleine ladingen. Daardoor valt dit model moeilijk te vergelijken met andere

modellen, die vaak proberen het voertuig tot volle capaciteit te laden. Er wordt ook gebruik gemaakt van zachte tijdsvensters en beide auteurs gebruiken één depot. Verder wordt niet aangenomen dat er een constante snelheid is over de gehele weg: de snelheid verandert wanneer over een grens wordt gereden tussen twee opeenvolgende tijdsperiodes. Deze grenzen worden door de bedrijven gekozen om een zo goed mogelijke representatie van de werkelijkheid weer te geven. De reissnelheid is een discontinue functie van de tijd van de dag. Daardoor is de reistijd een continue functie over de tijd, waardoor deze gemakkelijk te evalueren is. Dat alles zorgt ervoor dat aan het FIFO-principe wordt voldaan. De tabu search wordt bij Ichoua et al. (2003) zowel toegepast in een dynamische omgeving als in een statische en deterministische omgeving. (Ichoua et al., 2003; Kuo et al., 2009)

Een andere mogelijke oplossing voor een TDVRP is simulated annealing, aangehaald door Kuo (2010). Hier wordt als additionele doelstelling geprobeerd het benzineverbruik te minimaliseren. Een aantal beperkingen die bij dit model worden ingevoerd zijn het FIFO-principe, het gebruik van één depot, vijf categorieën van tijdsafhankelijke reissnelheden, drie snelheidsniveaus, en capaciteitsbeperkingen. Simulated annealing is een stochastische methode. (Kuo, 2010)

Haghani en Jung (2005) en Chen et al. (2006) hebben het dynamisch TDVRP voorgesteld als een MILP. Het doel van die formulering is het minimaliseren van de totale kosten die bij Haghani en Jung (2005) bestaan uit vaste kosten van de gebruikte voertuigen, transport- en boetekosten. De beperkingen voor dit probleem bestaan onder andere uit voertuig-, vraag- en routebeperkingen. Een restrictie bij Haghani en Jung (2005) is dat het een PDP met één depot is met zachte tijdsvensters waarin de voertuigen verschillende capaciteiten hebben. Bij Chen et al. (2006) wordt aangenomen dat geen vertragingen mogelijk zijn, waaruit kan worden afgeleid dat het harde tijdsvensters zijn. Een andere veronderstelling bij beide artikels is dat er een communicatiesysteem is tussen de bestuurder en de planner, zodat aanpassingen mogelijk blijven. Tevens kunnen de reistijden nog veranderen wanneer de chauffeurs al aan het rijden zijn. Er kunnen bijvoorbeeld onverwachte ongelukken gebeuren, waardoor de reistijd langer wordt. De planners moeten dan direct kunnen ingrijpen en de route aanpassen om zo weinig mogelijk weerslag te krijgen van dit ongeluk. Aanvragen om bediend te worden kunnen nog binnenkomen wanneer de planning gemaakt wordt. Na een

bepaald tijdstip worden deze aanvragen overdag echter niet meer behandeld, zodat alle diensten moeten voltooid zijn na de planningsperiode. De reistijd wordt bij Haghani en Jung (2005) gezien als een continue functie, in tegenstelling tot bij Chen et al. (2006). Bij een continue functie kan het model alle vormen van variatie in reistijd aanvaarden. Het probleem bij Haghani en Jung (2005) kan worden opgelost met een genetisch algoritme, omdat deze heuristiek ook op zeer complexe problemen kan worden toegepast en omdat met de computer de oplossing veel sneller kan worden berekend wanneer dit algoritme wordt gebruikt. De conclusie bij Haghani en Jung luidt dat het genetisch algoritme de exacte oplossing zeer goed benadert en in een veel snellere tijd, zodat het dus in de praktijk ook de betere methode is. Chen et al. (2006) stellen een heuristiek voor die enerzijds bestaat uit de insertiemethode voor routeconstructie en anderzijds uit het Or-opt algoritme voor routeverbetering. (Bräysy en Gendreau, 2005a; Chen et al., 2006; Haghani en Jung, 2005)

Soler et al. (2009) transformeren het TDVRPTW met de algemene beperkingen en harde tijdsvensters in een ACVRP (=asymmetric capacitated vehicle routing problem). Het verschil tussen een CVRP en een ACVRP ligt in de richting van de verbinding tussen twee klanten. Bij een CVRP mag de planner kiezen hoe ze de klanten bedienen en maakt de richting niks uit. Bij een ACVRP is de richting al op voorhand bepaald, waardoor de planner niet zoveel mogelijkheden heeft als bij het CVRP. Tevens kan de afstand verschillen in de twee richtingen, wat niet zo is bij een CVRP. Een ACVRP kan opgelost worden met alle heuristieken en zelfs met exacte methoden die hier gebruikt worden. Deze exacte methoden zijn echter enkel bruikbaar voor kleine problemen, omdat de bewerkingstijd langer is. (Soler et al., 2009; Melkonian, 2007)

Fleischmann et al. (2004) ontwikkelen een besparings-, sequentieel insertie- en 2-opt lokale zoekalgoritme voor het TDVRP met tijdsvensters. Zij hebben een extensie van het concept van tijdsvensters van een route naar een tijdsafhankelijk probleem gebracht. Dit laat de heuristiek toe om de haalbaarheid van de inserties te testen. Verder hebben Fleischmann et al. (2004) ook de non-passing beperking geïntroduceerd. Ze stellen een afgevlakte reistijdfunctie voor om de aankomsttijd te berekenen wanneer de vertrektijd bekend is. Deze reistijden zijn dus niet dynamisch, omdat wordt aangenomen dat alle informatie voor

de gehele planningshorizon bekend is op het moment van de planning. Andere beperkingen zijn het gebruik van één depot en harde tijdsvensters. (Fleischmann et al., 2004)

Kok (2010) stelt een oplossingsmethode voor gebaseerd op DP. Deze oplossingsmethode is een constructieve heuristiek, in tegenstelling tot de methodes van de meeste auteurs, die vooral verbeteringsmethoden gebruiken (zoals tabu search). Kok (2010) introduceert een oplossing die vooral heel flexibel en toepasbaar is op vele gebieden. Een beperking is dat het een deterministisch model is. Het model kan uitgebreid worden naar VRPTW, PDP en CVRP. Tevens kunnen realistische beperkingen zoals meerdere depots, heterogene voertuigen, meerdere routes per voertuig en het open VRP geïncorporeerd worden. Met open VRP wordt bedoeld dat de voertuigen niet verplicht zijn om terug te komen naar het depot. De oplossingsaanpak is een veralgemening van de beperkte DP heuristiek van het TSP van Malandraki en Dial (1996), die door gebruik te maken van Giant-Tour Representation (GTR), het VRP in een sequentieel probleem omzetten. Daardoor kunnen DP formuleringen gebruikt worden om het probleem op te lossen. Hier moet wel verzekerd worden dat de DP oplossing een GTR van een uitvoerbare VRP oplossing is. Omdat het uitwerken van een DP probleem nog altijd traag is voor realistische situaties, wordt een beperkte versie van dit algoritme voorgesteld, waar het aantal toestanden in elke fase wordt gebonden door een parameter. Kok (2010) gaat in plaats van reistijden werktijden minimaliseren. Werktijd is de som van reis-, dienst- en wachttijden. In praktijk is de werktijd vaker belangrijker dan de reistijd. Dit is zeker het geval indien er harde tijdsvensters zijn, want dan zijn werktijden een belangrijke kostenfactor. Dit komt doordat grote wachttijden grote wervingskosten voor vrachtwagenchauffeurs veroorzaken. Tevens brengt dit met zich mee dat de voertuigen lange tijd onbruikbaar zijn voor andere diensten. Het minimaliseren van de reistijden houdt geen rekening met deze wachttijden. Het model wordt getest op realistische gegevens in Nederland en er worden vier verschillende strategieën ontwikkeld om met congestie om te gaan. De eerste strategie houdt helemaal geen rekening met congestie, in tegenstelling tot de tweede. Beide modellen proberen echter niet om congestie te vermijden in het plannen van de ritten. Zowel de derde als de vierde strategie houden rekening met congestie en incorporeren dat in hun model. Kok (2010) concludeert dat modellen die de derde en vierde strategie volgen en dus congestie incorporeren in hun model betere resultaten hebben. (Kok, 2010)

5.4.3. Conclusie

De oplossingsmethoden voor het TDVRP focussen zich vooral op lokale zoekmethoden. Tabu search is al veelvuldig voorgesteld voor een TDVRP met zachte tijdsvensters. Het nadeel van lokale zoekmethoden is dat lokale updates op- en neerwaartse effecten hebben op de rondritten die worden overwogen, waardoor de evaluaties van deze updates veel duurder zijn bij het uitrekenen dan bij VRP modellen zonder tijdsvensters. Tevens zijn een aantal constructieve methoden voor het TDVRP voorgesteld, zoals een beperkte DP heuristiek. Andere methodes voor het TDVRP zijn het ant colony systeem en het genetisch algoritme. Vaak wordt bij deze oplossingsmethoden het aantal voertuigen geminimaliseerd. De algemene tweede doelstelling is het minimaliseren van de totale reistijd. (Kok, 2010)

In het volgende hoofdstuk zal op een kleinschalig praktijkprobleem, waar met intervallen wordt gewerkt om zo de impact van congestie na te gaan, een aantal lokale heuristieken uitgevoerd worden. Deze heuristieken zijn al besproken geweest in vorige hoofdstukken, maar zullen nog eens worden uitgelegd in hoofdstuk 6.

Hoofdstuk 6. Praktijkstudie

In dit hoofdstuk zal aan de hand van een onderzoek worden nagegaan hoe congestie kan geïncorporeerd worden in de praktijk. In de eerste paragraaf wordt het netwerk beschreven. Daarna wordt de time dependent nearest-neighbor heuristiek toegepast om een initiële oplossing te vinden. Vervolgens worden op deze oplossing een aantal lokale zoekmethoden uitgevoerd zodat een betere oplossing kan gevonden worden. Ten slotte wordt een conclusie getrokken en komen enkele bemerkingen aan bod.

6.1. Beschrijving netwerk

Het netwerk dat in deze praktijkstudie gebruikt wordt, is een fictief voorbeeld dat bestaat uit elf verschillende locaties in en rond Brussel, maar allemaal gelegen in de provincie Vlaams-Brabant. De eerste locatie is het depot waar de route start en eindigt, de andere tien zijn de verschillende klanten van het fictief bedrijf. Het depot is gelokaliseerd in Jette en de tien klanten bevinden zich in Bever, Elsene, Grimbergen, Haacht, Halle, Lennik, Leuven, Overijse, Tienen en Vilvoorde. De bediening van de klanten gebeurt in één van vier tijdsintervallen van de dag. Afhankelijk van deze tijdsintervallen, zal de tijd die nodig is van locatie A naar locatie B veranderen. Deze vier tijdsintervallen kunnen worden opgesplitst in nachtleveringen, tussen 19u-7u, twee piekperiodes, tussen 7u-10u en tussen 16u-19u, en dagleveringen, tussen 10u-16u. Natuurlijk is de reistijd die nodig is om te reizen tussen twee locaties gemiddeld genomen langer in de piekperiodes dan 's nachts en overdag. Tevens wordt verondersteld dat elke locatie bereikt kan worden vanuit een andere locatie, dus men is niet verplicht om vanuit een locatie naar een vooraf bepaalde locatie te reizen. Ook wordt aangenomen dat de reistijd afhankelijk is van de richting. De reistijd die nodig is om van locatie A naar locatie B te rijden is dus niet hetzelfde als de tijd om van locatie B naar locatie A te reizen. Naast de reistijd, moet er ook nog een dienst verricht worden bij deze klant. Die dienst is afhankelijk van de vraag van de klant, die in deze thesis willekeurig bepaald zal worden tussen 0 en 30 m³. Per m³ zijn vijf minuten diensttijd nodig. Op deze manier zal de vrachtwagenchauffeur altijd in de twee piekperiodes terecht komen, waardoor congestie zeker een rol zal spelen op de planning van de route. In tabel 5 wordt de vraag van de verschillende klanten weergegeven. Deze vraag is bepaald in Excel door een

willekeurig getal tussen 0 en 1 te vermenigvuldigen met 30, zodat de vraag van elke klant tussen 0m^3 en 30m^3 ligt. Hierdoor zal het bedrijf waarschijnlijk twee of meer vrachtwagens nodig hebben.

Bovendien wordt nog verondersteld dat deze klanten harde tijdsvensters hebben waarin de bediening moet gebeuren. Dat wil zeggen dat een tijdsvenster $[a_i, b_i]$ gespecificeerd is door de klant en het bedrijf moet zorgen dat de klanten bediend worden in dat tijdsvenster. Er is dus geen mogelijkheid tot levering buiten het tijdsvenster tegen een boete. De klanten in Grimbergen en Halle moeten bediend worden tussen 15u-18u, terwijl de klanten in Elsene en Haacht tussen 10u-14u hun leveringen moeten ontvangen. De vrachtwagenchauffeur moet de dienst in Leuven en Vilvoorde uitvoeren tussen 13u-17u. Klanten gelokaliseerd in Tienen en Bever hebben een tijdsvenster tussen 11u-14u. Ten slotte moeten de klanten in Overijse en Lennik bediend worden tussen respectievelijk 12u-15u en 14u30min-17u30min. Deze tijdsvensters worden eveneens weergegeven in tabel 4.

Tevens wordt aangenomen dat een chauffeur een normale dienst maakt zonder overuren, wat dus neer komt op een shift van maximaal acht uren. De capaciteit van één vrachtwagen bedraagt 52m^3 . In tabel 3 worden de locaties en de bijhorende afstanden tussen twee locaties weergegeven.

De reistijden tussen twee verschillende locaties in de vier verschillende tijdsintervallen die hierboven werden vermeld, worden weergegeven in tabel 6. Deze informatie moet gebruikt worden om de verschillende algoritmes uit te voeren om een optimale oplossing te bereiken. Als deze tabel wordt geraadpleegd, wordt duidelijk een verschil opgemerkt tussen 's nachts leveren en tijdens de piekuren.

Tabel 3: Aantal kilometers tussen 2 locaties

Locatie	Aantal kilometers tussen 2 locaties										
	Vilvoorde	Leuven	Elsene	Jette	Halle	Haacht	Bever	Lennik	Overijse	Grimbergen	Tienen
Vilvoorde	/	32	13	12	38	18	62	30	24	4	50
Leuven	32	/	32	36	64	15	91	57	21	36	19
Elsene	13	32	/	6	21	31	46	19	15	23	49
Jette	12	36	6	/	28	30	55	16	33	12	59
Halle	38	64	21	28	/	53	28	14	40	33	80
Haacht	18	15	21	30	53	/	80	48	37	26	35
Bever	66	89	47	51	29	81	/	23	67	61	108
Lennik	31	54	19	16	14	46	26	/	47	26	73
Overijse	23	22	15	32	45	35	71	47	/	27	53
Grimbergen	8	33	16	10	34	23	60	27	28	/	53
Tienen	49	34	49	58	79	43	106	73	44	53	/

Tabel 4: Tijdsvensters van de klanten

Locatie	Tijdsvenster
Vilvoorde	13u-17u
Leuven	13u-17u
Elsene	10u-14u
Halle	15u-18u
Haacht	10u-14u
Bever	11u-14u
Lennik	14u30min-17u30min
Overijse	12u-15u
Grimbergen	15u-18u
Tienen	11u-14u

Tabel 5: Vraag uitgedrukt in m³

Locatie	Random nummer	Vraag uitgedrukt in m ³
Vilvoorde	0,126460913	4
Leuven	0,24328584	7
Elsene	0,93843055	28
Halle	0,750499283	23
Haacht	0,055587872	2
Bever	0,437239451	13
Lennik	0,872430523	26
Overijse	0,368891464	11
Grimbergen	0,455830727	14
Tienen	0,409077056	12

Tabel 6: Reistijd van locatie A naar locatie B afhankelijk van starttijdstip

Tijd nodig van 7-10u (in min)												
Locatie	Vilvoorde	Leuven	Elsene	Jette	Halle	Haacht	Bever	Lennik	Overijse	Grimbergen	Tienen	
Vilvoorde (1800)	/	34	29	24	38	30	49	32	31	6	44	
Leuven (3000)	36	/	28	42	60	20	77	57	37	36	23	
Elsene (1050)	27	27	/	18	27	42	45	31	21	24	38	
Jette (1090)	21	39	18	/	30	38	46	27	35	20	49	
Halle (1500)	32	56	29	32	/	56	22	26	33	35	64	
Haacht (3150)	29	21	45	43	63	/	73	56	44	32	41	
Bever (1547)	53	73	47	49	23	68	/	33	50	53	82	
Lennik (1750)	29	50	31	25	23	45	37	/	42	29	56	
Overijse (3090)	27	32	17	23	35	40	54	47	/	24	42	
Grimbergen (1850)	14	34	30	16	29	39	45	28	36	/	46	
Tienen (3300)	45	27	37	50	67	38	82	68	52	45	/	

Tijd nodig van 10-16u (in min)												
Locatie	Vilvoorde	Leuven	Elsene	Jette	Halle	Haacht	Bever	Lennik	Overijse	Grimbergen	Tienen	
Vilvoorde (1800)	/	31	24	24	35	27	45	30	25	6	41	
Leuven (3000)	31	/	27	37	54	20	68	50	33	31	23	
Elsene (1050)	26	27	/	18	27	41	45	30	21	24	38	
Jette (1090)	21	38	18	/	29	38	43	25	33	18	48	
Halle (1500)	26	51	25	26	/	50	22	20	33	27	56	
Haacht (3150)	25	21	40	39	55	/	66	50	40	29	41	
Bever (1547)	46	66	41	42	23	61	/	33	49	44	75	
Lennik (1750)	29	50	29	25	21	45	37	/	41	27	57	
Overijse (3090)	24	30	17	21	34	37	53	43	/	23	40	
Grimbergen (1850)	14	30	25	16	25	35	41	26	30	/	42	
Tienen (3300)	41	26	37	46	60	37	76	62	45	41	/	

Tijd nodig van 16-19 (in min)												
Locatie	Vilvoorde	Leuven	Elsene	Jette	Halle	Haacht	Bever	Lennik	Overijse	Grimbergen	Tienen	
Vilvoorde (1800)	/	41	27	24	39	27	50	30	36	6	51	
Leuven (3000)	38	/	27	45	66	20	82	61	41	39	23	
Elsene (1050)	35	29	/	18	31	50	49	31	26	33	38	
Jette (1090)	21	50	18	/	31	38	48	25	45	20	60	
Halle (1500)	26	61	25	26	/	50	22	20	33	32	69	
Haacht (3150)	25	21	43	39	62	/	72	54	60	29	41	
Bever (1547)	46	77	41	42	23	61	/	33	49	47	85	
Lennik (1750)	29	61	30	25	25	45	37	/	51	30	67	
Overijse (3090)	32	39	17	29	34	45	53	55	/	29	51	
Grimbergen (1850)	14	41	28	16	30	35	45	26	40	/	54	
Tienen (3300)	48	26	37	53	72	37	87	71	53	48	/	

Tijd nodig van 19-7u (in min)												
Locatie	Vilvoorde	Leuven	Elsene	Jette	Halle	Haacht	Bever	Lennik	Overijse	Grimbergen	Tienen	
Vilvoorde (1800)	/	29	25	24	34	27	44	30	25	6	39	
Leuven (3000)	30	/	27	36	47	20	63	46	32	30	23	
Elsene (1050)	26	27	/	18	26	40	44	29	21	24	38	
Jette (1090)	21	37	18	/	26	38	42	25	32	18	47	
Halle (1500)	26	49	25	26	/	50	22	20	33	27	56	
Haacht (3150)	25	21	40	39	49	/	61	47	39	29	41	
Bever (1547)	46	63	41	42	23	61	/	33	49	44	73	
Lennik (1750)	29	47	28	25	20	45	37	/	41	27	54	
Overijse (3090)	23	30	17	21	34	36	53	39	/	22	39	
Grimbergen (1850)	14	29	25	16	24	35	40	26	30	/	41	
Tienen (3300)	40	26	37	45	54	37	70	57	44	40	/	

6.2. Time dependent nearest-neighbor heuristiek

In deze paragraaf wordt een initiële oplossing gevonden rekening houdend met congestie. In deze praktijkstudie zal de nearest-neighbor heuristiek gebruikt worden om de oplossing te vinden. De nearest-neighbor heuristiek werkt als volgt: die start de eerste route met de klant die het dichtst bij het depot gelokaliseerd is en breidt de route dan telkens uit met de klant die het dichtst bij ligt. Wanneer geen extensies meer mogelijk zijn – omdat de maximale vrachtcapaciteit van het voertuig bereikt is – wordt de volgende route geïnitieerd met een nieuw voertuig. Die planningsprocedure blijft doorgaan tot alle klanten bereikt zijn. De time dependent nearest-neighbor heuristiek is gelijkaardig aan de originele heuristiek, maar hier wordt gekeken naar tijden (in plaats van afstanden) om te beslissen welke locatie de volgende stop is op de route, waardoor met congestie rekening gehouden kan worden.

Als de vrachtwagenchauffeur zijn shift begint om 10u in Jette, is de eerste klant die bediend kan worden binnen het vooropgestelde tijdsvenster, Elsene. De rit duurt 18min en de daaropvolgende dienst $28 * 5\text{min} = 140\text{min}$ of 2u20min. Hierdoor is het 12u38min wanneer de vrachtwagenchauffeur naar de volgende klant vertrekt. De volgende klant die bediend wordt, is gelokaliseerd in Overijse, omdat het slechts 21min duurt om van Elsene naar Overijse te rijden. In Overijse moet natuurlijk nog een dienst verleend worden. Die dienst duurt in dit geval $11 * 5\text{min} = 55\text{min}$. Dat maakt dat de vrachtwagen om 13u54min naar de volgende klant kan rijden. De volgende stop is in Grimbergen, maar de vrachtwagen heeft de capaciteit niet meer om de goederen van deze klant in de vrachtwagen te plaatsen, waardoor een andere vrachtwagen moet geïnitieerd worden (capaciteit is 52m^3 met een totale vraag van $28 + 11 + 14 = 53$) om deze klant te bedienen.

Een nieuwe vrachtwagen, die om 10u naar de dichtstbijzijnde klant die nog niet bediend is vertrekt, wordt in het algoritme gebracht. Deze klant is gelokaliseerd in Haacht, omdat dat de enige klant is die een tijdsvenster tussen 10u-14u heeft. De rit van Jette naar Haacht duurt 38min met een bediening van $2 * 5\text{min} = 10\text{min}$. Hierdoor is het 10u48min wanneer de dienst volledig gedaan is bij deze klant en de vrachtwagen naar de volgende locatie rijdt. Die locatie is gelegen in Tienen en deze rit duurt 41min. Deze klant zou bij de eerste

vrachtwagen toegevoegd moeten worden, omdat de reistijd van Overijse naar Tienen korter is dan de reistijd van Haacht naar Tienen. Wanneer deze klant bereikt zou worden bij de eerste vrachtwagen is het echter al 14u25min, waardoor de dienst bij deze klant buiten het tijdsvenster zou gedaan moeten worden, wat niet toegelaten is. Deze klant wordt dus bij de tweede vrachtwagen toegevoegd met een reistijd van 41min en een diensttijd van $12 * 5\text{min} = 1\text{u}$. Hierdoor is het 12u29min wanneer de vrachtwagen in Tienen terug kan vertrekken. De dichtstbijzijnde locatie is Leuven met een totale reistijd van 31min (26min reistijd en 5min wachttijd tot de opening van het tijdsvenster om 15u), doch de reistijd van Overijse naar Leuven is even lang als de totale reistijd van Tienen naar Leuven. Hierdoor wordt deze locatie bij de eerste vrachtwagen toegevoegd, omdat de capaciteit van Leuven klein genoeg is om bij deze vrachtwagen toegevoegd te worden.

Bij de eerste vrachtwagen, waar het nog altijd 13u54min is, wordt dus Leuven toegevoegd als volgende klant. De reistijd is 31min met een dienst van $7 * 5\text{min} = 35\text{min}$. Hierdoor is het 15u wanneer deze klant bediend is. De dichtstbijzijnde locatie vanuit Leuven is Grimbergen, maar de vraag van deze klant is groter dan de resterende capaciteit van de vrachtwagen, waardoor deze klant aan de tweede vrachtwagen wordt toegevoegd. Omdat het echter 1u31min duurt om van Tienen naar Grimbergen te rijden (41min reistijd plus 50min wachttijd), wordt beter een andere locatie genomen die dichterbij ligt. Deze locatie is Vilvoorde vanuit Tienen met een reistijd van 41min en een diensttijd van $4 * 5\text{min} = 20\text{min}$. Doch is de reistijd van Leuven naar Vilvoorde slechts 31min, waardoor Vilvoorde bij vrachtwagen 1 wordt toegevoegd. Na de dienst bij deze klant is het 15u51min wanneer de vrachtwagen terug kan vertrekken naar de volgende klant. Doch is door deze laatste klant de capaciteit van de overige klanten altijd groter dan de resterende capaciteit (2m^3) van vrachtwagen 1, waardoor vrachtwagen 1 geen klanten meer kan toegewezen krijgen. Hierdoor keert vrachtwagen 1 terug naar het depot en komt aan om 16u15min.

De vrachtwagenchauffeur van vrachtwagen 2 kan nog steeds om 12u29min naar de volgende locatie vertrekken. De dichtstbijzijnde locatie bij de tweede vrachtwagen is Bever met een reistijd van 76min of 1u16min. Hierdoor komt de vrachtwagen aan om 13u45min en met een diensttijd van 1u05min ($=13 * 5\text{min}$), is de vrachtwagen terug gereed om te vertrekken om 14u50min. De volgende locatie is Halle met een reistijd van 23min en een

diensttijd van $23 * 5\text{min} = 1\text{u}55\text{min}$. Dan is het $17\text{u}08\text{min}$ wanneer de vrachtwagen bij deze klant geweest is en naar de volgende klant kan reizen. Omdat de resterende capaciteit slechts 2m^3 is, kan geen andere klant meer bediend worden door deze vrachtwagen, waardoor deze vrachtwagen terug naar het depot keert en aankomt om $17\text{u}34\text{min}$.

Een derde vrachtwagen wordt geïntroduceerd in het algoritme met als dichtstbijzijnde locatie Lennik met een reistijd van 25min en een diensttijd van $26 * 5\text{min} = 2\text{u}10\text{min}$. Het tijdsvenster opent pas om $14\text{u}30\text{min}$, waardoor de dienst pas dan kan gebeuren. De vrachtwagenchauffeur vertrekt om $14\text{u}05\text{min}$, zodat hij geen wachttijd oploopt. Hierdoor is het $16\text{u}40\text{min}$ wanneer de vrachtwagenchauffeur naar de laatste locatie vertrekt, namelijk Grimbergen. Omdat de reistijd plus de diensttijd echter te lang in beslag zal nemen zodat de vrachtwagen niet voor 18u terug in het depot is, moet nog een vierde vrachtwagen geïntroduceerd worden. Deze vierde vrachtwagen rijdt enkel naar Grimbergen met een reistijd van 18min en een diensttijd van $1\text{u}10\text{min}$ ($=14 * 5\text{min}$). Deze vrachtwagen vertrekt om $14\text{u}42\text{min}$, omdat het tijdsvenster pas opent om 15u . De derde vrachtwagen keert hierdoor terug in het depot om $17\text{u}05\text{min}$ en de vierde vrachtwagen om $16\text{u}26\text{min}$.

In totaal doen alle vrachtwagens er 413min of $6\text{u}53\text{min}$ over om op alle plaatsen te geraken. Hier moet opgemerkt worden dat deze oplossing zeker niet de beste oplossing is. Als de dienst- en de reistijden worden opgeteld, wordt een totaal bekomen van 1113min of $18\text{u}33\text{min}$. Dat betekent dat er zeker twee vrachtwagens nodig zijn om alle klanten te bedienen, maar dat waarschijnlijk ook met drie vrachtwagens alle klanten bediend kunnen worden, want twee vrachtwagens kunnen in totaal 960min of 16u (2 shiften van 8u) rijden. De resterende minuten ($=1113\text{min} - 960\text{min} = 153\text{min}$) moeten normaal verdeeld kunnen worden over een derde vrachtwagen, waardoor geconcludeerd kan worden dat de initiële oplossing zeker niet de optimale oplossing is.

In onderstaande tabel wordt de volgorde van klantenlocaties nog eens weergegeven per vrachtwagen. De tabel moet als volgt worden geïnterpreteerd: Vrachtwagen i vertrekt vanuit locatie A op een starttijdstip en rijdt naar locatie B. De reistijd en het aankomstuur van deze vrachtwagen worden eveneens weergegeven. Dan wordt aan de hand van het volume de diensttijd berekend: $\text{Volume} * 5\text{min}$. In de volgende kolom wordt de resterende capaciteit

gegeven en ten slotte worden de tijdsvensters van de verschillende klanten gegeven. De aankomst in Jette moet gebeuren voor 18u, dus het depot heeft een tijdsvenster van 10u-18u. Tevens moet worden opgemerkt dat bij de aankomsttijd van de klant een tijdstip tussen haken kan staan. Het uur dat tussen haken staat, is het openingsuur van het tijdsvenster van die klant. Deze informatie kan ook in de laatste kolom teruggevonden worden.

Tabel 7: Routes van de verschillende vrachtwagens

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Overijse	12u38min	21min	12u59min	55min	11	13	12u-15u
	Overijse	Leuven	13u54min	31min	14u25min	35min	7	6	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	15u	31min	15u31min	20min	4	2	13u-17u
	Vilvoorde	Jette	15u51min	24min	16u15min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Bever	12u29min	76min	13u45min	1u05min	13	25	11u-14u
	Bever	Halle	14u50min	23min	15u13min	1u55min	23	2	15u-18u
	Halle	Jette	17u08min	26min	17u34min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Grimbergen	14u42min	18min	15u	1u10min	14	38	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

6.3. Lokale zoekmethoden

In deze paragraaf zal met behulp van lokale zoekstrategieën gezocht worden naar een betere oplossing dan deze gevonden in bovenstaande paragraaf. De lokale heuristieken die aangehaald worden in hoofdstuk 5 als mogelijke oplossingen voor het VRPTW zijn het Or-opt algoritme, de relocate operator en de exchange operator. Deze heuristieken zullen uitgevoerd worden in volgende paragrafen om te onderzoeken of de initiële oplossing de beste is. Ze hebben allemaal een initiële oplossing nodig om een betere oplossing te vinden in de directe omgeving van deze oude oplossing. De laatste methode die getest zal worden, is het verschuiven van het startuur naar een later tijdstip. Hierdoor vermijdt de chauffeur één piek uur, wat een positieve invloed zou moeten hebben op de resultaten. Het doel van elke methode is de minimalisering van het aantal vrachtwagens, want elke vrachtwagen brengt een grote kost met zich mee. Het tweede ondergeschikte doel is de minimalisering van de totale tijd. Dit is zowel de reistijd om zich van de ene naar de andere klant te verplaatsen als de wachttijd bij een klant totdat het tijdsvenster opent.

Hier moet nog worden opgemerkt dat de beste oplossing niet gevonden wordt door enkel één heuristiek te gebruiken, maar door een combinatie van heuristieken. De meeste bedrijven werken hun heuristieken af in een bepaalde volgorde om zo tot een heel goede oplossing te komen. Er wordt dus niet geopteerd om één operator te gebruiken en de rest te verwaarlozen omdat dat niet tot de beste oplossing leidt. Elke operator heeft zijn troeven en een bedrijf probeert deze uit te spelen.

Eerst zal bij elk algoritme een korte uitleg gegeven worden over het algoritme, daarna zal de uitwerking van het praktijkprobleem gebeuren.

6.3.1. Or-opt operator

Het Or-opt algoritme verwijdert een aantal verbindingen en voegt ze weer toe op een andere locatie: grenzen worden uit de initiële oplossing gehaald en terug ingevoerd op een ander punt in de route. Zo wordt geprobeerd om een nieuwe betere oplossing te vinden dan de initiële. Het doel van deze operator is dus om één of meerdere klanten binnen eenzelfde route te verplaatsen. Deze operator heeft enkel een effect op het ondergeschikte doel binnen de doelfunctie, namelijk de minimalisering van de totale reis- en wachttijd. Dat wordt tevens aangetoond in figuur 5, waar het principe van een Or-opt algoritme uitgelegd wordt aan de hand van een tekening. Het algoritme zal toegepast worden op het praktijkprobleem om een nieuwe, betere oplossing te vinden.

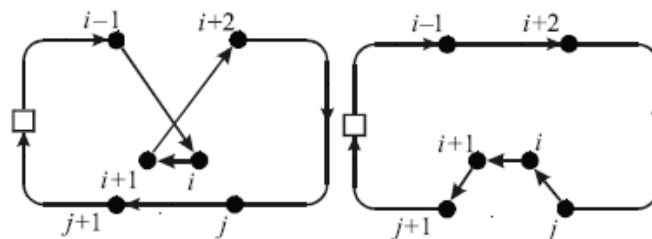


Figure 3 The Or-Opt Operator

Note. Customers i and $i + 1$ are relocated to be served between two customers j and $j + 1$, instead of customers $i - 1$ and $i + 2$. This is performed by replacing three edges $(i - 1, i)$, $(i + 1, i + 2)$, and $(j, j + 1)$ by the edges $(i - 1, i + 2)$, (j, i) , and $(i + 1, j + 1)$, preserving the orientation of the route.

Figuur 5: Or-opt algoritme (Bräysy en Gendreau, 2005a)

Als naar de initiële oplossing gekeken wordt, kan worden opgemerkt dat vrachtwagens 1 en 2 de enige zijn waar iets kan veranderen, want bij vrachtwagens 3 en 4 wordt maar 1 klant bediend, waardoor die rit niet verbeterd kan worden.

Bij vrachtwagens 1 en 2 worden lange ritten gemaakt voordat de vrachtwagens terugkeren naar Jette. Het Or-opt algoritme zal de route proberen te optimaliseren door klanten te verplaatsen in deze route. Hier zal getest worden of mogelijkheden bestaan om een betere oplossing te krijgen dan deze gevonden in tabel 7.

Bij vrachtwagen 1 zal de route Jette → Elsene → Overijse → Leuven → Vilvoorde → Jette vervangen worden door een andere route, namelijk de route Jette → Elsene → Vilvoorde → Overijse → Leuven → Jette. De oplossing in tabel 8 geeft deze nieuwe oplossing weer.

Tabel 8: Or opt operator: slechte oplossing

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekkuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvenster
1	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Overijse	12u38min	21min	12u59min	55min	11	13	12u-15u
	Overijse	Vilvoorde	13u54min	24min	14u18min	20min	4	9	13u-17u
	Vilvoorde	Leuven	14u38min	31min	15u09min	35min	7	2	13u-17u
	Leuven	Jette	15u44min	37min	16u21min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Bever	12u29min	76min	13u45min	1u05min	13	25	11u-14u
	Bever	Halle	14u50min	23min	15u13min	1u55min	23	2	15u-18u
	Halle	Jette	17u08min	26min	17u34min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Grimbergen	14u42min	18min	15u	1u10min	14	38	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

Dit is een achteruitgang ten opzichte van de oplossing gevonden in tabel 7 voor vrachtwagen 1, want nu komt deze vrachtwagen pas om 16u21min aan in het depot en in tabel 7 om 16u14min. Omdat de klant in Overijse het algoritme beperkt door het tijdsvenster (12u-15u), kan geen andere oplossing gevonden worden die beter is dan die gegeven in tabel 7 voor vrachtwagen 1.

Bij vrachtwagen 2 zal de route Jette → Haacht → Tienen → Bever → Halle → Jette vervangen worden door de route Jette → Bever → Haacht → Tienen → Halle → Jette. Dit zal leiden tot een inferieure oplossing, omdat deze oplossing veel meer afstand moet afleggen. Een andere mogelijkheid is Jette → Haacht → Bever → Tienen → Halle → Jette, maar dan

moet nog meer afstand afgelegd worden door de tweede vrachtwagen, wat dus eveneens tot een inferieure oplossing zal leiden, zoals aangetoond in respectievelijk tabel 9 en tabel 10. In tabel 9 zal de voorgestelde eerste route weergegeven worden, terwijl in tabel 10 de tweede optie wordt voorgesteld. De oplossing in tabel 9 zal ervoor zorgen dat een vijfde vrachtwagen nodig is, omdat de tweede vrachtwagen te laat terugkeert in het depot (18u18min). Tabel 10 geeft zelfs nog een slechtere oplossing dan tabel 9, omdat de reistijd nog langer is dan die in tabel 9, waardoor de tweede vrachtwagen nog later in het depot terugkeert en alweer een vijfde vrachtwagen nodig is. Hierdoor blijft tabel 7 de optimale oplossing. Dit kon op voorhand al verwacht worden, omdat de initiële route weinig extra kilometers maakt. Enkel de reistijd van Bever kan voor verbetering vatbaar zijn, maar het probleem is dat het tijdsvenster van Bever beperkend werkt.

Tabel 9: Or opt operator: slechte oplossing

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvenster
1	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Overijse	12u38min	21min	12u59min	55min	11	13	12u-15u
	Overijse	Leuven	13u54min	31min	14u25min	35min	7	6	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	15u	31min	15u31min	20min	4	2	13u-17u
	Vilvoorde	Jette	15u51min	24min	16u15min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Bever	10u14min	46min	11u	1u05min	13	39	11u-14u
	Bever	Haacht	12u05min	61min	13u06min	10min	2	37	10u-14u
	Haacht	Tienen	13u16min	41min	13u57min	1u	12	25	11u-14u
	Tienen	Halle	14u57min	60min	15u57min	1u55min	23	2	15u-18u
	Halle	Jette	17u52min	26min	18u18min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	30min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Grimbergen	14u42min	18min	15u	1u10min	14	38	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

Tabel 10: Or opt operator: slechte oplossing

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvenster
1	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Overijse	12u38min	21min	12u59min	55min	11	13	12u-15u
	Overijse	Leuven	13u54min	31min	14u25min	35min	7	6	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	15u	31min	15u31min	20min	4	2	13u-17u
	Vilvoorde	Jette	15u51min	24min	16u15min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Bever	10u48min	66min	11u54min	1u05min	13	37	11u-14u
	Bever	Tienen	12u59min	75min	14u14min	1u	12	25	11u-14u
	Tienen	Halle	15u14min	60min	16u14min	1u55min	23	2	15u-18u
	Halle	Jette	18u09min	26min	18u35min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Grimbergen	14u42min	18min	15u	1u10min	14	38	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

Hieruit kan geconcludeerd worden dat de initiële oplossing voor deze operator de beste oplossing is. Deze minimaliseert de totale reis- en wachttijd van de verschillende klanten.

Het grote nadeel van deze operator is de beperking dat enkel iets kan aangepast worden binnen een bepaalde route waardoor geen uitwisseling van klanten tussen de verschillende vrachtwagens kan plaatsvinden. In het artikel van Bräysy en Gendreau (2005a) kunnen andere operatoren gevonden worden die wel locaties tussen vrachtwagens zullen wisselen. Een voorbeeld hiervan is het 2-opt algoritme (figuur 6). Deze heuristiek zal twee locaties van route veranderen om zo een betere oplossing te vinden. Het nadeel van deze operator is dat die enkel een effect heeft op het ondergeschikte doel van het praktijkprobleem, namelijk de minimalisering van de reis- en wachttijd. Door deze beperking wordt hier geopteerd om eerst de relocate operator uit te werken.

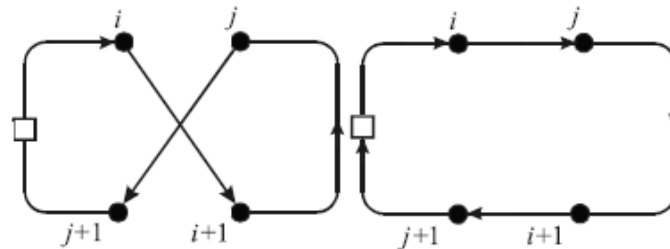


Figure 2 2-Opt Exchange Operator
Note. The edges $(i, i + 1)$ and $(j, j + 1)$ are replaced by edges (i, j) and $(i + 1, j + 1)$, thus reversing the direction of customers between $i + 1$ and j .

Figuur 6: 2-opt operator (Bräysy en Gendreau, 2005a)

6.3.2. Relocate operator

De relocate operator zal één klant bezocht door een route in een andere route plaatsen. In figuur 7 wordt deze heuristiek visueel voorgesteld. Deze operator kan dus een effect hebben op beide doelstellingen in deze praktijkstudie. De relocate operator kan zowel het aantal vrachtwagens als de totale reis- en wachttijd beïnvloeden.

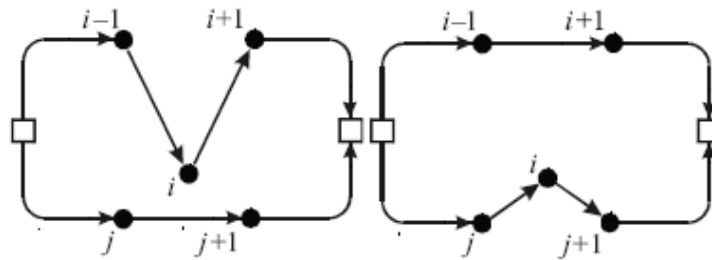


Figure 5 Relocate Operator

Note. The edges $(i-1, i)$, $(i, i+1)$, and $(j, j+1)$ are replaced by $(i-1, i+1)$, (j, i) , and $(i, j+1)$, i.e., customer i from the origin route is placed into the destination route.

Figuur 7: Relocate operator (Bräysy en Gendreau, 2005a)

Als gekeken wordt naar het praktijkprobleem, zal volgens een bepaald systeem gewerkt worden. Er zal altijd gezocht worden naar locaties die leiden tot een verbetering van één van beide doelstelling rekening houdend met de capaciteit van de vrachtwagens en de tijdsvensters van zowel de klanten als de vrachtwagenchauffeur. Het doel van de hele procedure is om één vrachtwagen weg te werken zodat er nog maar drie vrachtwagens over zijn. Dit bekommt men door in één van de drie vrachtwagens een capaciteitsoverschot te creëren. Op deze manier kan de klant in vrachtwagen 3 of 4 verplaatst worden, waardoor deze vrachtwagen niet meer nodig is.

Als de heuristiek op het praktijkprobleem wordt toegepast, wordt er naar locaties gezocht die beter in een andere route terecht komen via een iteratieve procedure. In de eerste iteratie zal getracht worden om een klant van vrachtwagen 1 of 2 te verplaatsen naar vrachtwagen 3 of 4. Hier kan enkel geopteerd worden voor klanten die een tijdsvenster hebben dicht tegen de aankomsttijd van de klanten in vrachtwagens 3 en 4, want anders leidt de nieuwe oplossing tot een te grote wachttijd waardoor er geen betere oplossing gevonden zal worden. Een voorbeeld kan gevonden worden wanneer de klant in Bever verplaatst wordt naar vrachtwagen 3 of 4. In tabel 11 wordt de klant in Bever verplaatst naar vrachtwagen 3. Deze oplossing is geen verbetering door de wachttijden die de chauffeurs in Halle en Lennik moeten maken (1u31min in Halle en 1u52min in Lennik). Hierdoor zal deze oplossing niet aanvaard worden als nieuwe oplossing.

Tabel 11: Relocate operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekkur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Overijse	12u38min	21min	12u59min	55min	11	13	12u-15u
	Overijse	Leuven	13u54min	31min	14u25min	35min	7	6	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	15u	31min	15u31min	20min	4	2	13u-17u
	Vilvoorde	Jette	15u51min	24min	16u15min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Halle	12u29min	60min	13u29min (15u)	1u05min	23	25	15u-18u
	Halle	Jette	16u05min	26min	16u31min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Bever	10u17min	43min	11u	1u05min	13	39	11u-14u
	Bever	Lennik	12u05min	33min	12u38min (14u30min)	2u10min	26	13	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Grimbergen	14u42min	18min	15u	1u10min	14	38	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

Een nieuwe betere oplossing is dus niet mogelijk wanneer de chauffeur te veel moet wachten op een volgende klant. De klant in Haacht kan ook niet verplaatst worden naar vrachtwagen 3, want dat leidt weer tot een inferieure oplossing zoals weergegeven in tabel 12. De lange wachttijd in Grimbergen zorgt ervoor dat deze oplossing nooit aanvaard kan worden. Hier is dus hetzelfde probleem als in de vorige tabel aanwezig, namelijk de lange wachttijd. Het zal dus niet gemakkelijk zijn om een betere oplossing te vinden dan de initiële oplossing dankzij de korte reistijden en het gebrek aan wachttijden in deze oplossing.

Tabel 12: Relocate operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekkur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Overijse	12u38min	21min	12u59min	55min	11	13	12u-15u
	Overijse	Leuven	13u54min	31min	14u25min	35min	7	6	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	15u	31min	15u31min	20min	4	2	13u-17u
	Vilvoorde	Jette	15u51min	24min	16u15min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Tienen	10u12min	48min	11u	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Bever	12u	76min	13u16min	1u05min	13	27	11u-14u
	Bever	Halle	14u21min	23min	14u44min (15u)	1u55min	23	4	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Grimbergen	10u48min	29min	11u17min (15u)	1u10min	14	36	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

In vrachtwagen 2 kan geprobeerd worden om de klanten in Tienen en Halle te verplaatsen naar een andere vrachtwagen. De klant in Halle zal niet kunnen verplaatst worden omdat de vrachtwagenchauffeur altijd om 18u terug in het depot moet zijn. De levering in Halle duurt 1u55min en de vrachtwagenchauffeurs van vrachtwagens 3 en 4 kunnen ten vroegste om 16u10min vertrekken (bij de klant in Grimbergen). Hierdoor kan nooit op tijd geleverd en

terug gekeerd worden in het depot omdat het zeker al 18u05min (16u10min + 1u55min diensttijd in Halle) is wanneer de levering gedaan is, wat een overschrijding van 5min is van het tijdsvenster (10u-18u). De mogelijkheid om de klant in Halle te verplaatsen wordt dan ook niet geprobeerd, waardoor de klant in Tienen overblijft. Omdat Tienen dichterbij Grimbergen ligt dan bij Lennik, wordt geopteerd om deze klant bij vrachtwagen 4 toe te voegen. Dit leidt tot de oplossing gegeven in tabel 13. De wachttijd bij de klant in Grimbergen is veel te groot om tot een betere oplossing te leiden (totale reis- en wachttijd van 670min). Hierdoor wordt deze oplossing niet aanvaard.

Tabel 13: Relocate operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekkur	Reistijd	Aankomsttijd	Dienstdtijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Overijse	12u38min	21min	12u59min	55min	11	13	12u-15u
	Overijse	Leuven	13u54min	31min	14u25min	35min	7	6	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	15u	31min	15u31min	20min	4	2	13u-17u
	Vilvoorde	Jette	15u51min	24min	16u15min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Bever	10u48min	66min	11u54min	1u05min	13	37	11u-14u
	Bever	Halle	12u59min	23min	13u22min (15u)	1u55min	23	14	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Tienen	10u12min	48min	11u	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Grimbergen	12u	41min	12u41min (15u)	1u10min	14	26	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

Uit de vorige tabellen blijkt dat het niet mogelijk is om een betere oplossing te bereiken in één iteratie. Hierdoor zal een assumptie worden gemaakt dat één slechte stap aanvaard wordt om zo tot een betere oplossing te komen. Om de nodige capaciteit te creëren, zal beslist worden om de klant in Elsene te verplaatsen. De klant zal naar de route van vrachtwagen 4 verplaatst worden. Deze oplossing kan teruggevonden worden in tabel 14. Deze oplossing heeft een totale reis- en wachttijd van 549min of 9u09min (431min of 7u11min reistijd en 118min of 1u58min wachttijd).

Tabel 14: Relocate operator: iteratie 1

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Leuven	12u55min	31min	13u26min	35min	7	34	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	14u01min	31min	14u32min	20min	4	30	13u-17u
	Vilvoorde	Jette	14u52min	24min	15u16min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Bever	12u29min	76min	13u45min	1u05min	13	25	11u-14u
	Bever	Halle	14u50min	23min	15u13min	1u55min	23	2	15u-18u
	Halle	Jette	17u08min	26min	17u34min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u10min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Grimbergen	12u38min	24min	13u02min (15u)	1u10min	14	10	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

Deze oplossing is dus een inferieure oplossing ten opzichte van de oplossing gevonden in tabel 7, maar deze stap wordt toegelaten om tot een betere oplossing te komen. Hier wordt dus de assumptie gemaakt dat deze operator geen lokale zoekmethode maar een metaheuristiek is, waar slechte stappen worden toegelaten om uit een lokaal optimum te raken. Omdat er een capaciteitsoverschot van 30m³ gecreëerd is in de eerste vrachtwagen, kan de klant in Lennik, die maar een vraag van 26m³ heeft, naar vrachtwagen 1 verplaatst worden zodat de route met één vrachtwagen minder kan voltooid worden. Deze oplossing kan gevonden worden in tabel 15. Dit is een duidelijke verbetering ten opzichte van tabel 7, omdat slechts drie vrachtwagens gebruikt worden om alle klanten te bedienen. De totale reistijd is in dit geval 530min, waarvan 118min of 1u58min wachttijd zijn.

Tabel 15: Relocate operator: iteratie 2

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Leuven	12u55min	31min	13u26min	35min	7	34	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	14u01min	31min	14u32min	20min	4	30	13u-17u
	Vilvoorde	Lennik	14u52min	30min	15u22min	2u10min	26	4	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	17u32min	25min	17u57min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Bever	12u29min	76min	13u45min	1u05min	13	25	11u-14u
	Bever	Halle	14u50min	23min	15u13min	1u55min	23	2	15u-18u
	Halle	Jette	17u08min	26min	17u34min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Grimbergen	12u38min	24min	13u02min (15u)	1u10min	14	10	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

Omdat drie vrachtwagens het minimum is waarmee alle klanten bediend kunnen worden, zal vanaf nu het doel zijn om de totale reis- en wachttijd te minimaliseren. Er zijn nog altijd

grote wachttijden bij de klant in Grimbergen, waardoor de eerste aandacht hier naar uit gaat, natuurlijk met de capaciteitsbeperkingen in overweging. Door de capaciteitsbeperking van vrachtwagen 2 (slechts 2m³ nog in overschot), kan geen klant van vrachtwagen 1 of 3 naar die vrachtwagen worden overgebracht. Hier wordt dus geopteerd om een klant van vrachtwagen 1 naar 3 te verplaatsen en door het gebrek aan capaciteit bij vrachtwagen 3, kunnen enkel de klanten in Leuven en Vilvoorde genomen worden uit vrachtwagen 1. De klant in Leuven zal de grootste impact hebben op de wachttijd (door de langere dienstdiensttijd), dus wordt geopteerd om deze klant te nemen. Dat geeft de oplossing weergegeven in tabel 16. Deze oplossing is een duidelijke verbetering ten opzichte van de vorige oplossing met een totale reis- en wachttijd van 478min of 7u58min.

Tabel 16: Relocate operator: iteratie 3

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekkuur	Reistijd	Aankomsttijd	Dienstdiensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Vilvoorde	12u55min	24min	13u19min	20min	4	37	13u-17u
	Vilvoorde	Lennik	13u39min	30min	14u09min (14u30min)	2u10min	26	11	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Bever	12u29min	76min	13u45min	1u05min	13	25	11u-14u
	Bever	Halle	14u50min	23min	15u13min	1u55min	23	2	15u-18u
3	Halle	Jette	17u18min	26min	17u34min	/	/	/	10u-18u
	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Leuven	12u38min	27min	13u05min	35min	7	17	13u-17u
	Leuven	Grimbergen	13u40min	31min	14u11min (15u)	1u10min	14	3	15u-18u
Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u	

De grootste wachttijd wordt nog altijd bij vrachtwagen 3 gevonden, namelijk 49min in Grimbergen. Dit zal getracht worden om te verminderen in de volgende iteratie. Omdat het capaciteitsoverschot van vrachtwagen 3 nog maar 3m³ is en er slechts één klant is die onder de 3m³ vraag heeft, wordt de klant in Haacht naar vrachtwagen 3 gebracht. Dat levert de oplossing in tabel 17 op, die beter is dan de vorige oplossing. Deze heeft een totale reis- en wachttijd van 453min of 7u33min.

Tabel 17: Relocate operator: iteratie 4

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekkur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensers
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Vilvoorde	12u55min	24min	13u19min	20min	4	37	13u-17u
	Vilvoorde	Lennik	13u39min	30min	14u09min (14u30min)	2u10min	26	11	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Tienen	10u12min	48min	11u	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Bever	12u	76min	13u16min	1u05min	13	27	11u-14u
	Bever	Halle	14u21min	23min	14u44min (15u)	1u55min	23	4	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Haacht	12u38min	41min	13u19min	10min	2	22	10u-14u
	Haacht	Leuven	13u29min	21min	13u50min	35min	7	15	13u-17u
	Leuven	Grimbergen	14u25min	31min	14u56min (15u)	1u10min	14	1	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

Nu zijn geen mogelijkheden over om wissels door te voeren bij vrachtwagen 3. Door het gebrek aan capaciteit bij vrachtwagen 2, kan enkel geprobeerd worden om de klant gelokaliseerd in Vilvoorde naar vrachtwagen 2 te verplaatsen. In tabel 18 wordt deze oplossing weergegeven. Door de verplaatsing van de klant in Vilvoorde naar vrachtwagen 2, komt vrachtwagen 2 nu te laat aan in het depot (tijdsvenster: 10u-18u), waardoor deze oplossing niet aanvaard kan worden.

Tabel 18: Relocate operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekkur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensers
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Lennik	12u55min	43min	13u38min (14u30min)	2u10min	26	15	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Tienen	10u12min	48min	11u	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Bever	12u	76min	13u16min	1u05min	13	27	11u-14u
	Bever	Vilvoorde	14u21min	46min	15u07min	20min	4	23	13u-17u
	Vilvoorde	Halle	15u27min	35min	16u02min	1u55min	23	0	15u-18u
	Halle	Jette	17u57min	26min	18u23min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Haacht	12u38min	41min	13u19min	10min	2	22	10u-14u
	Haacht	Leuven	13u29min	21min	13u50min	35min	7	17	13u-17u
	Leuven	Grimbergen	14u25min	31min	14u56min (15u)	1u10min	14	3	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

De enige mogelijkheid is nu nog om klanten van vrachtwagen 2 naar vrachtwagen 1 te verplaatsen. Omdat vrachtwagen 1 echter maar een capaciteit van 11m³ heeft en elke klant van vrachtwagen 2 een grotere vraag dan dat capaciteitsoverschot heeft, kan geen enkele klant van vrachtwagen 2 naar vrachtwagen 1 verplaatst worden. Een verplaatsing van vrachtwagen 3 naar 1 is irrationeel, omdat zojuist gebleken is dat het toevoegen van de klant in Haacht naar vrachtwagen 3 een positief effect heeft op de totale reis- en wachttijd. Dit wordt bijvoorbeeld nog eens aangetoond als de klant in Leuven naar vrachtwagen 1 verplaatst wordt (tabel 19). Door deze verplaatsing moet de chauffeur langer wachten in

Grimbergen, namelijk 1u02min, waardoor eventuele tijdswinst teniet wordt gedaan. Dit wordt tevens duidelijk wanneer de totale reis- en wachttijd wordt berekend (505min of 8u25min), dat een achteruitgang is van bijna 1u ten opzichte van de betere oplossing in tabel 17.

Tabel 19: Relocate operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Leuven	12u55min	31min	13u26min	35min	7	34	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	14u01min	31min	14u32min	20min	4	30	13u-17u
	Vilvoorde	Lennik	14u52min	30min	15u22min	2u10min	26	4	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	17u32min	25min	17u57min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Tienen	10u12min	48min	11u	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Bever	12u	76min	13u16min	1u05min	13	27	11u-14u
	Bever	Halle	14u21min	23min	14u44min (15u)	1u55min	23	4	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Haacht	12u38min	41min	13u19min	10min	2	22	10u-14u
	Haacht	Grimbergen	13u29min	29min	13u58min (15u)	1u10min	14	8	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

Er kan geconcludeerd worden dat de oplossing in tabel 17 de beste oplossing is voor deze operator. Hier moet nog eens vermeld worden dat zonder de assumptie die gemaakt is geen betere oplossing mogelijk is dan de initiële oplossing. Bovendien is het gebruik van meerdere operatoren aangeraden om tot een optimale oplossing te komen, zoals het verplaatsen van het startuur. In de oplossing gegeven in tabel 17 zou men de wachttijd in Grimbergen bijvoorbeeld kunnen wegwerken door 2 minuten later te vertrekken in het depot. Deze optie zal later nog verder worden toegelicht.

6.3.3. Exchange operator

De exchange operator wisselt twee bezoeken in verschillende routes. Dit wordt tevens weergegeven in onderstaande figuur. Het grote nadeel van deze heuristiek is dat de heuristiek het aantal routes niet zal verminderen, maar enkel een effect heeft op de totale reis- en wachttijd. Hierdoor zal nooit de beste oplossing gevonden worden met enkel deze operator. De beste oplossing volgens deze heuristiek is nooit beter dan de oplossing gevonden door de relocate operator, want die heeft één vrachtwagen minder nodig dan de beste oplossing van de exchange operator.

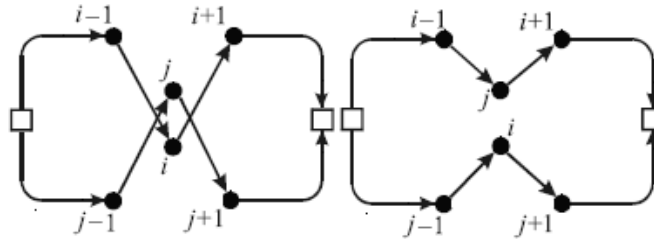


Figure 6 The Exchange Operator

Note. The edges $(i - 1, i)$, $(i, i + 1)$, $(j - 1, j)$, and $(j, j + 1)$ are replaced by $(i - 1, j)$, $(j, i + 1)$, $(j - 1, i)$, and $(i, j + 1)$, i.e., two customers from different routes are simultaneously placed into the other routes.

Figuur 8: Exchange operator (Bräysy en Gendreau, 2005a)

Hier zal weer rekening gehouden worden met de capaciteitsbeperkingen van de vrachtwagen en de tijdsvensters van de klanten en vrachtwagenchauffeurs en zal getracht worden om de reis- en/of wachttijden te verminderen.

In de eerste iteratie zal geopteerd worden om een klant van vrachtwagen 1 te wisselen met een klant in vrachtwagen 3 of 4, omdat uit de originele oplossing gebleken is dat het niet mogelijk is om een klant van vrachtwagen 2 buiten Halle te wisselen met een klant in vrachtwagen 3 of 4 door het tijdsvenster tussen 10u-18u van de vrachtwagenchauffeurs. Dit wordt nog eens aangetoond in tabel 20, waar de klant in Bever gewisseld wordt met deze in Grimbergen. Hier ziet men dat de chauffeur pas om 19u01min aankomt in het depot, terwijl het tijdsvenster al sluit om 18u.

Tabel 20: Exchange operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Overijse	12u38min	21min	12u59min	55min	11	13	12u-15u
	Overijse	Leuven	13u54min	31min	14u25min	35min	7	6	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	15u	31min	15u31min	20min	4	2	13u-17u
	Vilvoorde	Jette	15u51min	24min	16u15min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Grimbergen	12u29min	41min	13u10min (15u)	1u10min	14	24	15u-18u
	Grimbergen	Halle	16u10min	30min	16u40min	1u55min	23	1	15u-18u
	Halle	Jette	18u35min	26min	19u01min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Bever	10u17min	43min	11u	1u05min	13	39	11u-14u
	Bever	Jette	12u05min	42min	12u47min	/	/	/	10u-18u

De enige mogelijkheid is nog om klanten van vrachtwagen 1 met vrachtwagen 3 of 4 te wisselen. Hier moet wel rekening gehouden worden met het capaciteitsoverschot. De klant in Lennik kan enkel gewisseld worden met Elsene, want de andere klanten creëren een te laag capaciteitsoverschot op om de klant in Lennik te bedienen (bijvoorbeeld: Lennik wordt gewisseld met Vilvoorde, dat levert 6m³ plaats op in vrachtwagen 1 terwijl de klant in Lennik een vraag van 26m³ heeft). Er moet dus een klant gevonden worden die een vraag heeft van minimum 24m³ om te wisselen met de klant in Lennik. De wissel tussen Lennik en Elsene wordt weergegeven in onderstaande tabel. Dit is een iets slechtere oplossing dan deze initieel gevonden in tabel 7, want deze oplossing heeft een totale reis- en wachttijd van 424min of 7u04min (geen wachttijd).

Tabel 21: Exchange operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Leuven	12u55min	31min	13u26min	35min	7	34	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	14u01min	31min	14u32min	20min	4	30	13u-17u
	Vilvoorde	Lennik	14u52min	30min	15u22min	2u10min	26	4	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	17u32min	25min	17u57min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Bever	12u29min	76min	13u45min	1u05min	13	25	11u-14u
	Bever	Halle	14u50min	23min	15u13min	1u55min	23	2	15u-18u
	Halle	Jette	17u08min	26min	17u34min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Jette	12u38min	18min	12u56min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Grimbergen	14u42min	18min	15u	1u10min	14	38	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

De enige optie die nog overblijft, is de klant in Elsene te wisselen met deze in Grimbergen, omdat dat de enige manier is om genoeg capaciteitsoverschot te creëren om aan de vraag van de klant in Grimbergen te voldoen (14m³). In tabel 22 wordt deze oplossing gegeven. Deze oplossing is net iets beter dan de initiële oplossing, met een totale reis- en wachttijd van 409min of 6u49min (met 2min wachttijd), wat 4min beter is dan de oude oplossing. Deze oplossing wordt dan ook aanvaard als nieuwe beste oplossing

Tabel 22: Exchange operator: iteratie 1

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Leuven	12u55min	31min	13u26min	35min	7	34	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	14u01min	31min	14u32min	20min	4	30	13u-17u
	Vilvoorde	Grimbergen	14u52min	6min	14u58min (15u)	1u10min	14	16	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Bever	12u29min	76min	13u45min	1u05min	13	25	11u-14u
	Bever	Halle	14u50min	23min	15u13min	1u55min	23	2	15u-18u
	Halle	Jette	17u08min	26min	17u34min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Jette	12u38min	18min	12u56min	/	/	/	10u-18u

Omdat nu een capaciteitoverschot van 16m³ gecreëerd is in vrachtwagen 1, kan geprobeerd worden om de langere reistijden weg te werken. De reistijd van de klant in Tienen naar Bever is bijvoorbeeld 76min, waardoor geopteerd wordt om deze klant te wisselen met de klant in Overijse. Deze oplossing levert een totale reis- en wachttijd van 466min op, wat een achteruitgang is ten opzichte van tabel 22, dus deze oplossing wordt niet aanvaard als nieuwe oplossing.

Tabel 23: Exchange operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Bever	10u17min	43min	11u	1u05min	13	38	11u-14u
	Bever	Leuven	12u05min	66min	13u11min	35min	7	34	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	13u46min	31min	14u17min	20min	4	30	13u-17u
	Vilvoorde	Grimbergen	14u37min	6min	14u43min (15u)	1u10min	14	16	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Overijse	12u29min	45min	13u14min	55min	11	27	12u-15u
	Overijse	Halle	14u09min	34min	14u43min (15u)	1u55min	23	4	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Jette	12u38min	18min	12u56min	/	/	/	10u-18u

Enkel wissels tussen vrachtwagens 1 en 2 zijn nog mogelijk, omdat een wissel tussen de klant in Lennik en een andere klant ervoor zal zorgen dat de vrachtwagen te laat aankomt in het depot, wat hierboven al aangetoond is. Als de klant in Bever nu gewisseld wordt met de klant in Leuven (omdat de klant in Leuven dicht bij de klant in Tienen ligt), wordt de oplossing in tabel 24 gevonden. De reistijd zal hierdoor significant dalen (van 407min naar

378min), maar de wachttijd zal stijgen tot 87min of 1u27min, waardoor de totale reis- en wachttijd te hoog is. Hier moet wel opgemerkt worden dat door een verschuiving van het startuur een betere oplossing gevonden kan worden dan deze in tabel 22, omdat de wachttijden dan grotendeels wegvallen in vrachtwagen 2. Dus een combinatie van operatoren in één iteratie is altijd beter dan het gebruik van één operator, wat later ook nog eens zal aangetoond worden.

Tabel 24: Exchange operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekkur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Bever	10u17min	43min	11u	1u05min	13	39	11u-14u
	Bever	Overijse	12u05min	49min	12u54min	55min	11	28	12u-15u
	Overijse	Vilvoorde	13u49min	24min	14u13min	20min	4	24	13u-17u
	Vilvoorde	Grimbergen	14u33min	6min	14u40min (15u)	1u10min	14	10	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Leuven	12u29min	26min	12u55min (13u)	35min	7	31	13u-17u
	Leuven	Halle	13u35min	23min	13u58min (15u)	1u55min	23	8	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Jette	12u38min	18min	12u56min	/	/	/	10u-18u

Als getracht wordt om een andere klant te wisselen van vrachtwagen 1 met een klant van vrachtwagen 2 is er altijd wel een probleem. De klant in Haacht kan niet gewisseld worden, omdat die als eerste dan bediend zou worden, waardoor een te grote wachttijd wordt gecreëerd in Overijse. De klanten in Grimbergen en Halle kunnen niet in één route gezet worden, want dan komt de chauffeur te laat terug in het depot. De klant in Overijse kan met niemand gewisseld worden omdat het tijdsvenster in Overijse ervoor zorgt dat de route pas begint om 11u27min, waardoor er uiteindelijk slechts 2min wachttijd in Grimbergen is. Als de vrachtwagenchauffeur vroeger zou moeten vertrekken door een klant die een tijdsvenster voor dat van Overijse heeft, zal de chauffeur langer moeten wachten, zoals aangetoond in tabel 25, waar de klant in Overijse gewisseld is met die in Tienen dat een tijdsvenster tussen 11u-14u heeft.

Tabel 25: Exchange operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Tienen	10u12min	48min	11u	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Leuven	12u	26min	12u26min	35min	7	33	13u-17u
	Leuven	Vilvoorde	13u01min	31min	13u32min	20min	4	29	13u-17u
	Vilvoorde	Grimbergen	13u52min	6min	13u58min (15u)	1u10min	14	15	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Bever	10u48min	66min	11u54min	1u05min	13	37	11u-14u
	Bever	Overijse	12u59min	49min	13u48min	55min	11	26	12u-15u
	Overijse	Halle	14u43min	34min	15u17min	1u55min	23	3	15u-18u
	Halle	Jette	17u12min	26min	17u38min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Jette	12u38min	18min	12u56min	/	/	/	10u-18u

Hierdoor blijven enkel de klanten in Leuven en Vilvoorde over die gewisseld kunnen worden met de klanten in Bever en Tienen. Omdat de wissel tussen de klanten in Leuven en Bever al geprobeerd is, wordt nu de wissel tussen Leuven en Tienen geprobeerd. Tabel 26 geeft de resultaten van deze oplossing weer.

Tabel 26: Exchange operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Tienen	10u12min	48min	11u	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Overijse	12u	45min	12u45min	55min	11	29	12u-15u
	Overijse	Vilvoorde	13u40min	24min	14u04min	20min	4	25	13u-17u
	Vilvoorde	Grimbergen	14u24min	6min	14u30min (15u)	1u10min	14	11	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Bever	10u48min	66min	11u54min	1u05min	13	37	11u-14u
	Bever	Leuven	12u59min	66min	14u15min	35min	7	30	13u-17u
	Leuven	Halle	14u50min	23min	15u13min	1u55min	23	7	15u-18u
	Halle	Jette	17u08min	26min	17u34min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Jette	12u38min	18min	12u56min	/	/	/	10u-18u

De wachttijd die gecreëerd wordt in Grimbergen is een stijging van 28min, waardoor er maar maximaal 379min mag gereden worden en in dit geval is dit meer, waardoor weer geconcludeerd kan worden dat dit een slechte oplossing is. De wissel tussen Vilvoorde en Bever levert het resultaat op gegeven in tabel 27. Dat is eveneens een inferieur resultaat: een totale reis- en wachttijd van 492min of 8u12min waarvan 55min wachttijd is.

Tabel 27: Exchange operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Bever	10u17min	43min	11u	1u05min	13	39	11u-14u
	Bever	Overijse	12u05min	49min	12u54min	55min	11	28	12u-15u
	Overijse	Leuven	13u49min	31min	14u20min	35min	7	21	13u-17u
	Leuven	Grimbergen	14u55min	31min	15u26min	1u10min	14	7	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u36min	16min	16u52min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	10u48min	41min	11u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Vilvoorde	12u29min	41min	13u10min	20min	4	34	13u-17u
	Vilvoorde	Halle	13u30min	35min	14u05min (15u)	1u55min	23	11	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Jette	12u38min	18min	12u56min	/	/	/	10u-18u

Er kan enkel nog getracht worden om de klant in Vilvoorde te wisselen met de klant in Tienen. Deze wissel wordt weergegeven in tabel 28. Hieruit blijkt dat de oplossing alweer een achteruitgang is, want de totale reis- en wachttijd is in dit geval 488min of 8u08min.

Tabel 28: Exchange operator: slechte iteratie

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Tienen	10u12min	48min	11u	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Overijse	12u	45min	12u45min	55min	11	29	12u-15u
	Overijse	Leuven	13u40min	31min	14u11min	35min	7	22	13u-17u
	Leuven	Grimbergen	14u46min	31min	15u17min	1u10min	14	8	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u27min	16min	16u43min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Haacht	10u	38min	10u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Bever	10u48min	66min	11u54min	1u05min	13	37	11u-14u
	Bever	Vilvoorde	12u59min	46min	13u45min	20min	4	33	13u-17u
	Vilvoorde	Halle	14u05min	35min	14u40min (15u)	1u55min	23	10	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Lennik	14u05min	25min	14u30min	2u10min	26	26	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Jette	12u38min	18min	12u56min	/	/	/	10u-18u

Er kan dus geconcludeerd worden dat de oplossing gegeven in tabel 22 de optimale oplossing is voor deze operator, maar natuurlijk moet de opmerking nog gemaakt worden dat dit nooit de optimale oplossing is voor het probleem, want hier kunnen enkel de reis- en wachttijden verminderd worden en niet het aantal vrachtwagens. Dus het belang van een combinatie van operatoren komt weer naar voor. Enkel door zo een combinatie kan een oplossing bekomen worden die de optimale oplossing kan zijn.

6.3.4. Verschuiving startuur

De laatste operator die geprobeerd zal worden is een verschuiving van het startuur van 10u naar 11u en van 10u naar 12u. Aan de hand van de time dependent nearest-neighbor heuristiek zal een nieuwe oplossing gevonden worden die dan vergeleken wordt met de initiële oplossing gevonden met deze heuristiek. Normaal zou deze oplossing beter moeten zijn, omdat de chauffeurs door één piekperiode minder moeten reizen en dus minder tijd nodig hebben om bij de klanten te raken.

Als de time dependent nearest-neighbor heuristiek opnieuw wordt uitgevoerd op het origineel probleem, dus de tien klantenlocaties en het depot, worden de oplossingen gevonden in respectievelijk tabel 29 en tabel 30 voor een verschuiving van het startuur naar 11u en 12u. De verschuiving van het startuur leidt altijd tot een achteruitgang van de initiële oplossing door de wachttijd die telkens in vrachtwagen 3 wordt opgelopen. In tabel 29 wordt wel een verbetering van de reistijd waargenomen (395min ten opzichte van 413min), maar deze tijds winst is niet genoeg om de wachttijd te compenseren. In tabel 30 is er zowel een achteruitgang qua reistijd als wachttijd ten opzichte van tabel 7.

Tabel 29: Verschuiving startuur van 10u naar 11u

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekkuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Elsene	11u	18min	11u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Overijse	13u38min	21min	13u59min	55min	11	13	12u-15u
	Overijse	Vilvoorde	14u54min	24min	15u18min	20min	4	9	13u-17u
	Vilvoorde	Jette	15u38min	24min	16u02min	/	/	/	11u-19u
2	Jette	Haacht	11u	38min	11u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Tienen	11u48min	41min	12u29min	1u	12	38	11u-14u
	Tienen	Leuven	13u29min	26min	14u55min	35min	7	31	13u-17u
	Leuven	Grimbergen	15u20min	31min	15u51min	1u10min	14	17	15u-18u
	Grimbergen	Jette	17u01min	16min	17u17min	/	/	/	11u-19u
3	Jette	Bever	11u	43min	11u43min	1u05min	13	39	11u-14u
	Bever	Lennik	12u48min	33min	13u21min (14u30min)	2u10min	26	13	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
4	Jette	Halle	14u31min	29min	15u	1u55min	23	29	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	11u-19u

Tabel 30: Verschuiving startuur van 10u naar 12u

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekkuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Elsene	12u	18min	12u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Overijse	14u38min	21min	14u59min	55min	11	13	12u-15u
	Overijse	Vilvoorde	15u54min	24min	16u18min	20min	4	9	13u-17u
	Vilvoorde	Jette	16u38min	24min	17u02min	/	/	/	12u-20u
2	Jette	Haacht	12u	38min	12u38min	10min	2	50	10u-14u
	Haacht	Leuven	12u48min	21min	13u10min	35min	7	43	13u-17u
	Leuven	Lennik	13u45min	50min	14u35min	2u10min	26	17	14u30min-17u30min
	Lennik	Grimbergen	16u45min	30min	17u15min	1u10min	14	3	15u-18u
	Grimbergen	Jette	18u25min	16min	18u41min	/	/	/	12u-20u
3	Jette	Bever	12u	43min	12u43min	1u05min	13	39	11u-14u
	Bever	Halle	13u48min	23min	14u11min (15u)	1u55min	23	16	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	12u-20u
4	Jette	Tienen	12u	48min	12u48min	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Jette	13u48min	46min	14u34min	/	/	/	12u-20u

De achteruitgang van de totale reis- en wachttijd in beide tabellen kan te wijten zijn aan het feit dat de verschuiving van het startuur ervoor zorgt dat de volledige impact van de avondspits gezien kan worden. Nu moet er veel meer gereden worden in de avondspits, wat een achteruitgang van de reistijd teweeg brengt. Dit is zeker het geval als naar de verschuiving van het startuur naar 12u wordt gekeken (tijdsvenster: 12u-20u). Omdat de tijdsvensters van de verschillende klanten ten vroegste openen om 10u en de chauffeur ten vroegste om 10u begint te werken, is de impact van de ochtendspits op deze planning heel klein.

De verschuiving van het startuur kan ook gebeuren op een optimale oplossing gevonden door één van de verscheidene andere heuristische. Een voorbeeld hiervan wordt weergegeven in tabel 31, waar het startuur van de beste oplossing volgens de relocate operator onderworpen wordt aan een verschuiving van het startuur. De klant in Haacht heeft een tijdsvenster van 10u tot 14u en wordt geleverd om 13u19min. Hierdoor kan de chauffeur ten laatste vertrekken om 10u41min, omdat de chauffeur dan nog net om 14u aankomt in Haacht. Dit wordt dan ook uitgetoet in de nieuwe tabel voor vrachtwagens 2 en 3, want vrachtwagen 1 vertrekt sowieso later omdat het tijdsvenster in Overijse pas opent om 12u.

Tabel 31: Verschuiving startuur beste oplossing relocate operator

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Vilvoorde	12u55min	24min	13u19min	20min	4	37	13u-17u
	Vilvoorde	Lennik	13u39min	30min	14u09min (14u30min)	2u10min	26	11	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	16u40min	25min	17u05min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Tienen	10u41min	48min	11u29min	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Bever	12u29min	76min	13u45min	1u05min	13	27	11u-14u
	Bever	Halle	14u50min	23min	15u13min	1u55min	23	4	15u-18u
	Halle	Jette	17u08min	26min	17u34min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Elsene	10u41min	18min	10u59min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Haacht	13u19min	41min	14u	10min	2	22	10u-14u
	Haacht	Leuven	14u10min	21min	14u31min	35min	7	15	13u-17u
	Leuven	Grimbergen	15u06min	31min	15u37min	1u10min	14	1	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u47min	16min	17u03min	/	/	/	10u-18u

De verschuiving van het startuur zorgt ervoor dat vrachtwagens 2 en 3 geen wachttijden meer hebben, waardoor de totale reis- en wachttijd ook vermindert naar 433min of 7u13min (ten opzichte van 453min in de beste oplossing van de relocate operator). Er kan besloten worden dat een combinatie van heuristischeken een betere oplossing geeft dan één heuristiek. In volgende paragraaf zal dat eveneens aangetoond worden door een combinatie van verschillende operatoren te gebruiken en een verschuiving van het startuur.

6.3.5. Combinatie van operatoren: relocate operator, exchange operator en verschuiving van het startuur

Hier zal getracht worden om met de beste oplossing gevonden met de relocate operator, een nog betere oplossing te vinden via de exchange operator. De oplossing van tabel 17 zal gebruikt worden als initiële oplossing om een betere oplossing te vinden. Op deze betere oplossing zal het optimale startuur berekend worden om zo tot een minimale reis- en wachttijd te komen.

In de oplossing van tabel 31 wordt nog altijd een wachttijd van 21min waargenomen omdat de verschuiving van het startuur geen effect heeft op de eerste klant van deze rondrit. Als een combinatie van operatoren gebruikt zal worden, zal getracht worden om deze wachttijd weg te werken. Hiervoor zal een klant met een lage vraag in vrachtwagen 1 gewisseld en vervangen moeten worden door een klant met een hogere vraag en een tijdsvenster vanaf 12u, omdat de chauffeur anders wel vroeger kan vertrekken dan 11u27min. Door deze beperkingen blijven enkel de klanten in Leuven, Halle en Grimbergen over. Omdat uit vorige

paragrafen gebleken is dat de klanten in Lennik, Halle en Grimbergen niet in één vrachtwagen kunnen bediend worden, blijft enkel de klant in Leuven over. Dit wordt dan ook uitgewerkt in tabel 32, waar de exchange operator gebruikt wordt om de klanten in Leuven en Vilvoorde te wisselen, gebaseerd op de oplossing gevonden in tabel 17.

Tabel 32: Wissel klanten in Leuven en Vilvoorde op beste oplossing relocate operator

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Leuven	12u55min	31min	13u26min	35min	7	34	13u-17u
	Leuven	Lennik	14u01min	50min	14u51min	2u10min	26	8	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	17u01min	25min	17u26min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Tienen	10u12min	48min	11u	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Bever	12u	76min	13u16min	1u05min	13	27	11u-14u
	Bever	Halle	14u21min	23min	14u44min (15u)	1u55min	23	4	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Elsene	10u	18min	10u18min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Haacht	12u38min	41min	13u19min	10min	2	22	10u-14u
	Haacht	Vilvoorde	13u29min	25min	13u54min	20min	4	18	13u-17u
	Vilvoorde	Grimbergen	14u14min	6min	14u20min (15u)	1u10min	14	4	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u10min	16min	16u26min	/	/	/	10u-18u

Deze oplossing levert een totale reis- en wachttijd van 474min dat een achteruitgang is ten opzichte van de originele oplossing. Als hierop echter een verschuiving van het startuur wordt uitgevoerd naar 10u41min, omdat de klant in Haacht nog altijd de beperkende klant is, wordt de oplossing in tabel 33 gevonden. Dit is een vooruitgang ten opzichte van de originele oplossing, omdat de wachttijd in vrachtwagen 1 verdwenen is en de reistijd is slechts met 2min gestegen. Dit geeft een totaal van 418min of 6u58min.

Tabel 33: Verschuiving startuur naar 10u41min

Vrachtwagen	Locatie A	Locatie B	Vertrekuur	Reistijd	Aankomsttijd	Diensttijd	Volume	Capaciteit	Tijdsvensters
1	Jette	Overijse	11u27min	33min	12u	55min	11	41	12u-15u
	Overijse	Leuven	12u55min	31min	13u26min	35min	7	34	13u-17u
	Leuven	Lennik	14u01min	50min	14u51min	2u10min	26	8	14u30min-17u30min
	Lennik	Jette	17u01min	25min	17u26min	/	/	/	10u-18u
2	Jette	Tienen	10u41min	48min	11u29min	1u	12	40	11u-14u
	Tienen	Bever	12u29min	76min	13u45min	1u05min	13	27	11u-14u
	Bever	Halle	14u50min	23min	15u13min	1u55min	23	4	15u-18u
	Halle	Jette	16u55min	26min	17u21min	/	/	/	10u-18u
3	Jette	Elsene	10u41min	18min	10u59min	2u20min	28	24	10u-14u
	Elsene	Haacht	13u19min	41min	14u	10min	2	22	10u-14u
	Haacht	Vilvoorde	14u10min	25min	14u35min	20min	4	18	13u-17u
	Vilvoorde	Grimbergen	14u55min	6min	15u01min	1u10min	14	4	15u-18u
	Grimbergen	Jette	16u11min	16min	16u27min	/	/	/	10u-18u

Door zowel een verschuiving van het startuur, als de exchange operator als de relocate operator te gebruiken, wordt een betere oplossing gevonden dan door enkel één van deze

operatoren. Het blijkt dus dat een combinatie veel betere resultaten geeft dan enkel het gebruik van één operator.

De oplossing gevonden in tabel 33 is waarschijnlijk niet de optimale oplossing, omdat er nog andere mogelijkheden bestaan. Er kan bijvoorbeeld ook geopteerd worden om de beste oplossing van de exchange operator te nemen en daar dan de relocate operator op uit te voeren. Deze paragraaf dient enkel om aan te tonen dat een combinatie van operatoren vaak tot een betere oplossing leidt dan het gebruik van één operator.

6.4. Conclusie

De oplossing gevonden in de initiële oplossing met de time dependent nearest-neighbor heuristiek met als startuur 10u is duidelijk niet de beste oplossing voor het probleem. De lokale heuristieken die op het probleem zijn uitgevoerd hebben niet allemaal een effect op deze initiële oplossing. Het gebruik van een heuristiek is afhankelijk van het probleem en niet elke heuristiek is relevant voor een probleem. De Or-opt operator heeft in deze praktijkstudie geen enkele invloed op de initiële oplossing. Er kan besloten worden dat de heuristieken zeker niet allemaal even goed zijn voor dit probleem, maar ze kunnen wel allemaal gebruikt worden om een optimale oplossing te vinden.

De beste oplossing wordt uiteindelijk gegeven door een combinatie van operatoren, dus er kan zeker besloten worden dat het gebruik van verschillende heuristieken leidt tot betere resultaten. De volgorde van de heuristieken zal afhangen van het probleem, want elke heuristiek heeft zijn kwaliteiten maar ook zijn nadelen. Er kan geopteerd worden om zo snel mogelijk tot het minimale aantal vrachtwagens te komen via de relocate operator of er kan gekozen worden om eerst de totale reis- en wachttijd te minimaliseren voordat gedacht wordt aan het minimale aantal vrachtwagens dat nodig is om alle klanten te bedienen.

Tevens is gebleken dat de Or-opt operator en de exchange operator enkel een invloed hebben op het minimaliseren van de totale reis- en wachttijd, terwijl de relocate operator een invloed heeft op zowel het minimaliseren van de totale reis- en wachttijd als op het minimaliseren van het aantal vrachtwagens.

Ten slotte is het startuur verschoven van 10u naar 11u en naar 12u voor de initiële oplossing, en naar 10u41min voor de beste oplossing van de relocate operator. Dit blijkt een significante verbetering op te leveren ten opzichte van de originele oplossing, dus het nagaan van het optimale starttijdstip voor de vrachtwagens is zeker van belang voor het beste resultaat.

6.5. Bemerkingen

In deze sectie worden nog een aantal kritische bemerkingen gemaakt in verband met de praktijkstudie die uitgevoerd werd.

Ten eerste is de gevalstudie veel te klein om algemene conclusies te trekken. De tien klanten en één depot hebben slechts drie vrachtwagens nodig, waardoor het maar een klein probleem is. Tevens zorgt het klein probleem ervoor dat de impact van de intervallen miniem is. Het maximale verschil tussen een nachtlevering en een levering in een piekuur is 19min, tussen de klanten in Bever en Leuven. Omdat deze studie enkel Vlaams-Brabant en het Brussels Hoofdstedelijk Gewest bedient, moeten er maar kleine afstanden afgelegd worden, waardoor de tijdswinst minimaal is door rekening te houden met de piekuren.

Ten tweede heeft het gebruik van tijdsintervallen maar een beperkte impact door het late tijdstip waarop de tijdsvensters openen. De bediening start pas om 10u, waardoor het effect van de ochtendspits wordt afgezwakt. Bij een vroegere opening zal de ochtendspits wel een effect hebben op de reistijd van de verscheidene vrachtwagens.

Ten derde moet opgemerkt worden dat de tijdsintervallen te groot zijn om een heel goed beeld te krijgen. Hier werd gewerkt met redelijk grote tijdsintervallen, om het probleem niet te ingewikkeld te maken, maar de ochtendspits bijvoorbeeld duurt geen 3u. Het piekt op bepaalde tijdstippen afhankelijk van de rit tussen twee locaties, waarmee bedoeld wordt dat de piekuren tussen Bever en Leuven anders zijn dan deze tussen Leuven en Jette. Hierdoor zijn de tijdstippen niet precies genoeg om tot een accurate analyse te komen. Een onderscheid kan dus zeker nog gemaakt worden. Deze analyse kan eveneens gemaakt worden bij de avondspits, die ook piekt op bepaalde uren voor een bepaalde rit. Een

mogelijke voortzetting van dit onderzoek kan de opsplitsing van piekuren tussen twee locaties zijn en deze proberen te vermijden. Hier werd aangenomen dat de piekuren overal hetzelfde zijn, wat dus niet het geval is voor elke rit. Soms begint het piekuur later, soms vroeger.

Ten vierde is een studie in België zeker niet uitgebreid genoeg om tot een algemene conclusie te komen. Hoewel in België het probleem van filevorming alsmaar erger wordt, is het nog altijd niet te vergelijken met grote steden in China of in Singapore of een stad als Londen. Daar is het probleem veel groter, waardoor de impact van het besproken systeem veel groter is.

Lijst der geraadpleegde werken

Ambrosini, C. & Routhier, J-L. (January 2004). Objectives, methods and results of surveys carried out in the field of urban freight transport: an international comparison [Elektronische versie]. *Transport Reviews, Volume 24, Issue 1*, 57-77.

Anderson, S., Allen, J. & Browne, M. (March 2005). Urban logistics – how can it meet policy makers' sustainability objectives [Elektronische versie]. *Journal of Transport Geography, Volume 13, Issue 1*, 71-81.

Arnott, R. (1994). Alleviating traffic congestion: Alternatives to road pricing [Elektronische versie]. *Boston College Working Papers in Economics*, 1-44.

Arnott, R., Tillmann, R. & Schöb, R. (2005). *Alleviating urban traffic congestion*. Cambridge: MIT Pres.

Balseiro, S.R., Louiseau, I. & Ramonet, J. (2011). An ant colony algorithm hybridized with insertion heuristics for the Time Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows [Elektronische versie]. *Computers & operations research, Volume 38, Issue 6*, 954-966.

Boron, W.F. & Boulpaep, E.L. (2003). *Medical physiology*. 1st ed. Philadelphia: Elsevier Science.

Bräysy, O. & Gendreau, M. (2005a). Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms [Elektronische versie]. *Transportation science, Volume 29, Number 1*, 104-118.

Bräysy, O. & Gendreau, M. (2005b). Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part II: Metaheuristics [Elektronische versie]. *Transportation science, Volume 39, Number 1*, 119-139.

Browne, M., Allen, J. & Atlassy, M. (September 2007). Comparing freight transport strategies and measures in London and Paris [Elektronische versie]. *International Journal of Logistics: Research & Applications, Volume 10, Issue 3*, 205-219.

Cassidy, W.B. (2009). New York delivers at night [Elektronische versie]. *Journal of commerce, Volume 10, Issue 35*, 42-44.

Chen, H-K., Hsueh, C-F. & Chang, M-S. (2006). The real-time time-dependent vehicle routing problem [Elektronische versie]. *Transportation research part E, Volume 42, Issue 5*, 383-408.

Chin, A.T.H. (1996). Containing air pollution and traffic congestion: transport policy and the environment in Singapore [Elektronische versie]. *Atmospheric environment, Volume 30, Number 5*, 787-801.

Cordeau, J-F., Laporte, G., Potvin, J-Y. & Savelsbergh, M.W.P. (2004). Transportation on demand. In C., Barnhart & G., Laporte (Eds.). *Handbooks in operations research and management science, Volume 14*. (pp. 429-466). Amsterdam: Elsevier B.V.

Cordeau, J-F., Laporte, G., Savelsbergh, M.W.P. & Vigo, D. (2005). Vehicle routing. In C., Barnhart & G., Laporte (Eds.). *Handbooks in operations research and management science, Volume 14*. (pp. 367-428). Amsterdam: Elsevier B.V.

Dablanc, L. (March 2007). Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize [Elektronische versie]. *Transportation Research Part A: Policy & Practice, Volume 41, Issue 3*, 280-285.

Dantzig, G.B. & Ramser, J.H. (1959). The truck dispatching problem [Elektronische versie]. *Management science, Volume 6, Issue 1*, 80-91.

Donati, A.V., Montemanni, R., Casagrande, N., Rizzoli, A.E. & Gambardella, L.M. (2008). Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system [Elektronische versie]. *European journal of operational research, Volume 185, Issue 3*, 1174-1191.

Eksioğlu, B., Vural, A.V. & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review [Elektronische versie]. *Computers & Industrial engineering, Volume 57, Issue 4*, 1472-1483.

Figliozzi, M.A. (2009). A route improvement algorithm for the vehicle routing problem with time dependent travel times [Elektronische versie]. *Proceedings 88th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington DC*, 1-28.

Figliozzi, M.A. (2010). The impacts of congestion on commercial vehicle tour characteristics and costs [Elektronische versie]. *Transportation research part E, Volume 46, Issue 4*, 496-506.

Fleischmann, B., Gietz, M. & Gnutzmann, S. (2004). Time-varying travel times in vehicle routing [Elektronische versie]. *Transportation science, Volume 38, Issue 2*, 160-173.

Geroliminis, N. & Daganzo, C.F. (2005). A review of green logistics schemes used in cities around the world [Elektronische versie]. *UC Berkeley center for future urban transport: a Volvo center of excellence, Institute of transportation studies*, 1-22.

Goh, M. (2002). Congestion management and electronic road pricing in Singapore [Elektronische versie]. *Journal of transport geography, Volume 10, Issue 1*, 29-38.

Golob, T.F. & Regan, A.C. (2000). Freight industry attitudes towards policies to reduce congestion [Elektronische versie]. *Transportation research part E, Volume 36, Issue 1*, 55-77.

Green, C., Kler, P. & Leeves, G. (2010). Flexible contract workers in inferior jobs: reappraising the evidence [Elektronische versie]. *British journal of industrial relations*, Volume 48, Issue 3, 605-629.

Haghani, A. & Jung, S. (2005). A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times [Elektronische versie]. *Computers & operations research*, Volume 32, Issue 11, 2959-2986.

Hau, T.-D. (1992). Economic Fundamentals of road pricing Policy: A Diagrammatic Analysis [Elektronische versie]. *Transportation Division, Infrastructure and Urban Development Department, The World Bank*, 1-105.

Hillier, F.S. & Lieberman, G.J. (2005). *Introduction to operations research*. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education.

Holguin-Veras, J., et al. (2006). The impacts of time of day pricing on the behavior of freight carriers in a congested urban area: Implications to road pricing [Elektronische versie]. *Transportation research part A*, Volume 40, Issue 9, 744-766.

Ichoua, S., Gendreau, M. & Potvin, J-Y. (2003). Vehicle dispatching with time-dependent travel times [Elektronische versie]. *European journal of operational research*, Volume 144, Issue 2, 379-396.

Jansson, J.O. (2010). Road pricing and parking policy [Elektronische versie]. *Research in transportation economics*, Volume 29, Issue 1, 346-353.

Jayaratne, E.R., Ristovski Z.D., Morawska, L. & Meyer, N.K. (2010). Carbon dioxide emissions from diesel and compressed natural gas buses during acceleration [Elektronische versie]. *Transportation research part D*, Volume 15, Issue 5, 247-253.

Kallehauge, B. (July 2008). Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows [elektronische versie]. *Computers & Operations Research*, Volume 35, Issue 7, 2307-2330.

Kamel, B., Benasser, A. & Jolly, D. (2009). Ramp metering by limitation of density and queue length [Elektronische versie]. *AIP conference proceedings*, Volume 1107, Issue 1, 283-288.

Kenyon, S. & Lyons, G. (2003). The value of integrated multimodal information and its potential contribution to modal change [Elektronische versie]. *Transportation research part F*, Volume 6, Issue 1, 1-21.

Kingham, S., Dickinson, J. & Copsey, S. (2001). Travelling to work: will people move out of their cars [Elektronische versie]. *Transport policy*, Volume 8, Issue 2, 151-160.

Kok, L. (2010). Congestion avoidance and break scheduling within vehicle routing. Niet-gepubliceerde doctoraatstudie, Universiteit van Twente, 166pag.

Kuo, Y. (2010). Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem [Elektronische versie]. *Computers & industrial engineering*, Volume 59, Issue 1, 157-165.

Kuo, Y., Wang, C-C. & Chuang, P-Y. (2009). Optimizing goods assignment and the vehicle routing problem with time-dependent travel speeds [Elektronische versie]. *Computers & industrial engineering*, Volume 57, Issue 4, 1385-1392.

Langer, A. & Winston, C. (2008). Toward a Comprehensive Assessment of Road Pricing Accounting for Land Use [Elektronische versie]. *Brookings-Wharton Papers on Urban Affairs*, Issue 9, 127-167.

Lindsey, R. (2008). Prospects for urban road pricing in Canada [Elektronische versie]. *Brookings-Wharton papers on urban affairs*, Issue 9, 235-270.

Liu, S., Triantis, K.P. & Sarangi, S. (2010). A framework for evaluating the dynamic impacts of a congestion pricing policy for a transportation socioeconomic system [Elektronische versie]. *Transportation research part A, Volume 44, Issue 8*, 596-608.

Macharis, C. & Verbeke, A. (1999). Intermodaal vervoer: economische en strategische aspecten van het intermodaal vervoer in Vlaanderen. *Garant*, 23-70.

Malandraki, C. & Daskin, M.S. (1992). Time dependent vehicle routing problems: formulations, properties and heuristic algorithms [Elektronische versie]. *Transportation science, Volume 26, Issue 3*, 185-200.

Malandraki, C. & Dial, R.B. (1996). A restricted dynamic programming heuristic algorithm for the time dependent traveling salesman problem [Elektronische versie]. *European journal of operational research, Volume 90, Issue 1*, 45-55.

Melkonian, V. (2007). LP-based solution methods for the asymmetric TSP [Elektronische versie]. *Information Processing Letters, Vol. 101, Issue 6*, 233-238.

McKinnon, A. (1999). The effect of traffic congestion on the efficiency of logistical operations [Elektronische versie]. *International Journal of Logistics: Research & Applications, Volume 2, Issue 2*, 111-129.

McKinnon, A., Edwards, J., Piecyk, M. & Palmer, A. (2009). Traffic congestion, reliability and logistical performance: a multi-sectoral assessment [Elektronische versie]. *International journal of logistics research and applications, Volume 12, Issue 5*, 331-345.

Mesken, J., Hagenzieker, M.P., Rothengatter, T. & de Waard, D. (2007). Frequency, determinants and consequences of different drivers' emotions: An on-the-road study using self-reports, (observerd) behaviour, and physiology [Elektronische versie]. *Transportation research part F, Volume 10, Issue 6*, 458-475.

Mokhtarian, P.L. & Salomon, I. (1997). Modelling the desire to telecommute: the importance of attitudinal factors in behavioral models [Elektronische versie]. *Transportation research part A, Volume 31, Issue 1*, 35-50.

Müller, J. (2010). Approximative solutions to the bicriterion Vehicle Routing Problem with Time Windows [Elektronische versie]. *European journal of operational research, Volume 202, Issue 1*, 223-231.

Muñuzuri, J., Larrañeta, J., Onieva, L. & Cortés, P. (February 2005). Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement [Elektronische versie]. *Cities, Volume 22, Issue 1*, 15-28.

Naddef, D. & Rinaldi, G. (2002). Branch-and-cut algorithms for the capacitated VRP. In: P. Toth & D. Vigo (eds.). *The Vehicle Routing Problem*, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Philadelphia, pp. 53–84

Ockwell, A. (2002). Road congestion: What's the deal? [Elektronische versie]. *Observer, Issue 230*, 34-36.

Parragh, S.N., Doerner, K.F. & Hartl, R.F. (2008a). A survey on pickup and delivery problems part I: Transportation between customers and depot [Elektronische versie]. *Journal für betriebswirtschaft, Volume 58, Number 1*, 21-51.

Parragh, S.N., Doerner, K.F. & Hartl, R.F. (2008b). A survey on pickup and delivery problems part II: Transportation between pickup and delivery locations [Elektronische versie]. *Journal für betriebswirtschaft, Volume 58, Number 2*, 81-117.

Petrella, M., Biernbaum, L. & Lappin, J. (December 2007). Exploring a new congestion pricing concept: focus group findings from Northern Virginia and Philadelphia [Elektronische versie]. Volpe National Transportation Systems Center. Federal Highway Administration.

Phang, S.-Y. & Toh, R.S. (1997). From manual to electronic road congestion pricing: the Singapore experience and experiment [Elektronische versie]. *Transportation Research Part E, Volume 33, Issue 2*, 97–106.

Reckien, D., Ewald, M., Edenhofer, O. & Lüdeke, M. (February 2007). What Parameters Influence the Spatial Variations in CO2 Emissions from Road Traffic in Berlin? Implications for Urban Planning to Reduce Anthropogenic CO2 Emissions [Elektronische versie]. *In Urban Studies (Routledge), Volume 44, Issue 2*, 339-355.

Safirova, E., Houde, S., Coleman, C., Harrington, H. & Lipman, D.A. (2006). Long-Term Consequences of Congestion Pricing: A Small Cordon in the Hand Is Worth Two in the Bush [Elektronische versie]. *Resources for the Future*, 6-42.

Santos, G. (2005). Urban congestion charging: a comparison between London and Singapore [Elektronische versie]. *Transport Reviews, Volume 25, Issue 5*, 511-534.

Santos, G. & Shaffer, B. (2004). Preliminary results of the London congestion charging scheme [Elektronische versie]. *Public works management & policy, Volume 9, Issue 2*, 164-181.

Sathaye, N., Harley, R. & Madanet, S. (2010). Unintended environmental impacts of nighttime freight logistics activities [Elektronische versie]. *Transportation Research Part A, Volume 44 Issue 8*, 642-659.

Schaller, B. (2010). New York City's congestion pricing experience and implications for road pricing acceptance in the United States [Elektronische versie]. *Transport policy, Volume 17, Issue 4*, 266-273.

Sekeran, U. (2003). *Research methods for business: A skill building approach*. 4th ed., New York: John Wiley & Sons, Inc.

Shen, W. & Zhang, H.M. (2010). Pareto-improving ramp metering strategies for reducing congestion in the morning commute [Elektronische versie]. *Transportation research part A, Volume 44, Issue 9*, 676-696.

Soler, D., Albiach, J. & Martínez, E. (2009). A way to optimally solve a time-dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows [Elektronische versie]. *Operations research letters, Volume 37, Issue 1*, 37-42.

Tampère, C., Stada, J. & Immers, B. (2009). Calculation of welfare effects of road pricing on a large scale road network [Elektronische versie]. *Technological and economic development of economy, Volume 15, Issue 1*, 102-121.

van Exel, N.J.A. & Rietveld P. (2010). Perceptions of public transport travel time and their effect on choice-set among car drivers [Elektronische versie]. *Journal of transport and land use, Volume 2, Number 3*, 75-86.

Verhoef, E.T., Nijkamp, P. & Rietveld, P. (1997). The social feasibility of road pricing [Elektronische versie]. *Journal of Transport Economics and Policy, Volume 31, Issue 3*, 255-276.

Vickrey, W. (1993). Point of view: principles and applications of congestion pricing [Elektronische versie]. *Transportation Research Board, Issue 167*, 4-5.

Walton, C. (2009). FTA and MAS to tackle 'noisy' night deliveries [Elektronische versie]. *Commercial motor, Volume 209, Issue 5332*, 9-9.

Wardman, M. & Tyler, J. (2000). Rail network accessibility and the demand for inter-urban rail travel [Elektronische versie]. *Transport reviews, Volume 20, Issue 1*, 3-24.

Weisbrod, G., Donald, V. & Treyz, G. (2001). Economic implications of congestion. NCHRP Report #463 [Elektronische versie]. National cooperative highway research program, Transportation research board, Washington D.C.

Yang, H., Xu, W, He, B.-S. & Meng, Q. (2010). Road pricing for congestion control with unknown demand and cost functions [Elektronische versie]. *Transportation research part C, Volume 18, Issue 2*, 157-175.

Bijlagen

Bijlage 1: Lijst der gebruikte figuren

Figuur 1: Impact op immobiëlenmarkt (Langer en Winston, 2008)	30
Figuur 2: Implicaties rekeningrijden (Verhoef et al., 1997)	31
Figuur 3: Gebruik tolgeld (Verhoef et al., 1997).....	34
Figuur 4: FIFO-principe (Kuo,2009).....	66
Figuur 5: Or-opt algoritme (Bräysy en Gendreau, 2005a).....	81
Figuur 6: 2-opt operator (Bräysy en Gendreau, 2005a).....	84
Figuur 7: Relocate operator (Bräysy en Gendreau, 2005a).....	85
Figuur 8: Exchange operator (Bräysy en Gendreau, 2005a).....	92

Bijlage 2: Lijst der gebruikte tabellen

Tabel 1: Oplossingen stadsdistributie voor lokale administraties (Muñuzuri et al., 2005)....	47
Tabel 2: Overzicht literatuurstudie TDVRP.....	65
Tabel 3: Aantal kilometers tussen 2 locaties.....	75
Tabel 4: Tijdsvensters van de klanten	75
Tabel 5: Vraag uitgedrukt in m ³	75
Tabel 6: Reistijd van locatie A naar locatie B afhankelijk van starttijdstip.....	76
Tabel 7: Routes van de verschillende vrachtwagens	80
Tabel 8: Or opt operator: slechte oplossing.....	82
Tabel 9: Or opt operator: slechte oplossing.....	83
Tabel 10: Or opt operator: slechte oplossing.....	83
Tabel 11: Relocate operator: slechte iteratie	86
Tabel 12: Relocate operator: slechte iteratie	86
Tabel 13: Relocate operator: slechte iteratie	87
Tabel 14: Relocate operator: iteratie 1	88
Tabel 15: Relocate operator: iteratie 2	88
Tabel 16: Relocate operator: iteratie 3	89
Tabel 17: Relocate operator: iteratie 4	90

Tabel 18: Relocate operator: slechte iteratie	90
Tabel 19: Relocate operator: slechte iteratie	91
Tabel 20: Exchange operator: slechte iteratie	92
Tabel 21: Exchange operator: slechte iteratie	93
Tabel 22: Exchange operator: iteratie 1	94
Tabel 23: Exchange operator: slechte iteratie	94
Tabel 24: Exchange operator: slechte iteratie	95
Tabel 25: Exchange operator: slechte iteratie	96
Tabel 26: Exchange operator: slechte iteratie	96
Tabel 27: Exchange operator: slechte iteratie	97
Tabel 28: Exchange operator: slechte iteratie	97
Tabel 29: Verschuiving startuur van 10u naar 11u.....	98
Tabel 30: Verschuiving startuur van 10u naar 12u.....	99
Tabel 31: Verschuiving startuur beste oplossing relocate operator	100
Tabel 32: Wissel klanten in Leuven en Vilvoorde op beste oplossing relocate operator	101
Tabel 33: Verschuiving startuur naar 10u41min	101

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Congestievermijdende transportplanning

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

Jaar: **2011**

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,

Liesens, Kristof

Datum: **1/06/2011**