

2016•2017
FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN
*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur*

Masterproef
Analyse en optimalisatie van de rittenplanning bij Multimodal Transports &
Logistics

Promotor :
Prof. dr. Kris BRAEKERS

Kaj Houberechts
*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische
wetenschappen: handelsingenieur*

2016•2017

FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE
WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur*

Masterproef

Analyse en optimalisatie van de rittenplanning bij
Multimodal Transports & Logistics

Promotor :
Prof. dr. Kris BRAEKERS

Kaj Houberechts

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

Woord Vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk voor mijn opleiding Handelsingenieur in de Toegepaste Economische Wetenschappen aan de Universiteit Hasselt. Het onderwerp "Analyse en optimalisatie van de rittenplanning bij Multimodal Transports & Logistics" kadert in mijn minor: operationeel management en logistiek.

Graag zou ik mijn promotor Prof. Dr. Kris Braekers bedanken zonder wie deze masterproef niet was gelukt. Zijn verbeteringen en aanbevelingen waren van grote waarde. Verder wil ik de werknemers van MTL bedanken voor hun altijd vriendelijke ontvangst en bereidheid om steeds mijn vragen te beantwoorden. In het bijzonder Maarten en Patrick die naast hun drukke werkschema nog tijd vonden om mij verder te helpen.

Ten slotte bedank ik mijn vrienden Bart en Thor voor hun hulp bij mijn praktijkgedeelte.

Samenvatting

Deze masterproef handelt over het probleem van rittenplanning, met een toepassing bij het bedrijf *Multimodal Transports & Logistics* (MTL) in Ginkelom. MTL is een logistiek bedrijf dat dagelijks een 70-tal import- en exportritten uitvoert. De bedoeling van deze masterproef is om een methode te ontwikkelen die het inplannen van de vrachtwagens (gedeeltelijk) automatiseert om de werklust van de dispatchers te verminderen en de rittenplanning te optimaliseren (minder lege kilometers rijden). Voor MTL is dit een belangrijk probleem omdat de tijd die bespaard wordt met deze methode gebruikt kan worden voor andere doeleinden zoals het zoeken naar klanten. Ook maakt een dergelijke methode het mogelijk om de vrachtwagenvloot uit te breiden zonder extra dispatchers in dienst te moeten nemen wat voor een competitief voordeel zorgt.

Het eerste hoofdstuk gaat dieper in op de praktijkrelevantie van het probleem. Er wordt verklaard waarom rittenplanningsproblemen (vehicle routing problems of VRPs) zo uitgebreid bestudeerd worden en er wordt een situering gemaakt van MTL. Hiernaast komen ook de centrale onderzoeksvraag en de verschillende deelvragen aan bod. Hoe deze worden opgelost staat beschreven in het deel "Methodologie" van dit hoofdstuk. Belangrijk daarbij is dat naast een inleidende literatuurstudie het nodig is om een erg nauwkeurige omschrijving van de huidige situatie bij MTL te krijgen. Na deze omschrijving wordt in een uitgebreidere literatuurstudie gezocht naar een methode om de rittenplanning bij MTL automatisch te laten gebeuren.

In het tweede hoofdstuk worden de verschillende soorten VRPs geclassificeerd. Dit gebeurt aan de hand van twee verschillende soorten kenmerken namelijk het type van transportvraag, en de beperkingen waarmee het VRP rekening moet houden. Hierna wordt in dit hoofdstuk overgegaan tot mogelijke oplossingsmethoden voor VRPs. Hier wordt onderscheid gemaakt tussen exacte algoritmes, heuristieken en metaheuristieken. Van iedere soort worden verschillende voorbeelden aangehaald en er wordt beschreven voor welke soorten VRPs ze het best gebruikt kunnen worden.

In het derde hoofdstuk wordt uitgebreid ingegaan op de huidige situatie bij MTL. Hiervoor is er gesproken met de dispatchers van MTL en zijn ze verschillende keren geobserveerd tijdens hun werk. De vloot van vrachtwagens waarover MTL beschikt wordt uitgebreid besproken waarbij duidelijk wordt wat voor type goederen deze kunnen vervoeren. Ook de chauffeurs en hun manier van werken (internationaal rijden, werkuren) komen uitgebreid aan bod. Daarna worden de verschillende klanten van MTL besproken. Hierbij wordt er vooral aandacht gegeven aan hun locatie, het type goederen dat ze vervoerd willen hebben en hun tijdvensters. Ten slotte wordt de dispatch besproken. Bij de omschrijving van de dispatch is het vooral belangrijk om te weten met welke factoren zij rekening houden bij het opstellen van de planning. Hier is in dit deel dan ook extra aandacht aan gegeven.

In het vierde hoofdstuk wordt er dieper ingegaan op het VRP dat van toepassing is bij MTL, namelijk het pickup-and-delivery (PDP) probleem. PDPs kunnen opnieuw verder ingedeeld worden maar er wordt enkel verder gegaan op het type PDPs dat belangrijk is voor MTL. Dit zijn de one-to-one problems waarbij ieder goed één enkele oorsprong en één enkele bestemming heeft. Na een omschrijving van one-to-one problemen wordt overgegaan tot een omschrijving van dynamische problemen waarbij niet alle klantaanvragen op voorhand bekend zijn. In dit deel worden verschillende papers aangehaald die een dynamisch probleem omschrijven en een oplossingsmethode voorstellen.

Verder wordt er in hoofdstuk vier nog uitgebreid aandacht besteed aan de belangrijkste beperkingen waarmee MTL rekening moet houden. Dit zijn laadbeperkingen, rij- en rusttijden en de tijdvensters van klanten. Ten slotte wordt beschreven wat de methode die ontwikkelt wordt om de rittenplanning op te stellen wilt verwezenlijken en hoe de doelfunctie er hiervoor moet uitzien. In dit geval is de doelstelling een minimalisatie van het aantal gereden kilometers en het voldoen aan de tijdvensters van de klanten.

In het vijfde hoofdstuk wordt de methode beschreven die gebruikt gaat worden om het rittenplanningsprobleem van MTL op te lossen. In dit hoofdstuk wordt een verantwoording voor de methode gegeven en worden de beperkingen waarmee deze rekening kan houden opgesomd. Eerst wordt de methode in versimpelde versie toegepast op een kort theoretisch voorbeeld. Meer bepaald zal deze simpele versie van de methode nog geen rekening houden met de tijdvensters van de klanten maar enkel met de afstand die gereden wordt. Na dit simpele voorbeeld dat de basiswerking van de methode aantoont wordt de volledige methode beschreven. Na de omschrijving wordt de methode verschillende keren toegepast op een klein voorbeeld om de invloed van de verschillende parameters van de methode aan te tonen. Hierna wordt overgegaan tot een bespreking van de resultaten en komen enkele tekortkomingen van de methode aan bod.

In het zesde hoofdstuk wordt een oplossing voor de tekortkomingen van de methode die aan bod kwamen in het vijfde hoofdstuk voorgesteld. Deze oplossingen zijn tweeledig. Een eerste aanpassing zorgt ervoor dat de methode een betere oplossing genereert wat betreft de gereden afstand. Een tweede aanpassing gaat door middel van simulated annealing de gegenereerde oplossing verbeteren. De oplossing die er komt met behulp van de aanpassing wordt hier vergeleken met de oplossing van de methode zonder de aanpassingen. Er wordt aangetoond dat de aanpassingen aan de methode wel degelijk voor betere oplossingen zorgen.

In het zevende hoofdstuk wordt de methode toegepast op 40 orders (20 export- en 20 importritten) van MTL zelf en wordt het resultaat vergeleken met de rittenplanning die MTL had opgesteld. De methode levert een rittenplanning op die zeer goed overeenkomt met de rittenplanning van MTL zelf. Het aantal gereden kilometers is hetzelfde en de wachttijd van de chauffeurs is zelfs verminderd. In dit hoofdstuk wordt de rittenplanning die opgesteld is door de methode ook vergeleken met de rittenplanning opgesteld door een versimpelde versie van de methode. Hiermee wordt aangetoond dat de verschillende parameters van de methode allemaal hun nut hebben. De volledige methode wordt ook nog eens toegepast op de orders van MTL wanneer de starturen van de vrachtwagens willekeurig zijn. Hieruit blijkt dat de opgeleverde rittenplanning nog steeds van hoge kwaliteit is.

In het laatste hoofdstuk komen de conclusies van de masterproef aan bod. Hier wordt ook beschreven hoe de methode het best gebruikt kan worden in een praktische situatie. Ten slotte volgen nog enkele aanbevelingen voor verder onderzoek en verbeteringen van de methode.

Inhoud

Woord Vooraf	1
Samenvatting.....	3
1. Inleiding	7
1.1 Vehicle Routing Problems.....	7
1.2 Praktijkrelevantie.....	8
1.3 Centrale onderzoeksvraag	9
1.4 Methodologie	10
2. Classificatie van rittenplanningsproblemen	11
2.1 Type van transportvraag.....	11
2.2 Intra-route beperkingen	13
2.3 Oplossingsmethoden.....	15
2.3.1 Exacte algoritmes	15
2.3.2 Klassieke Heuristieken	16
2.3.3 Metaheuristieken	17
3. Huidige situatie bij MTL.....	19
3.1 Chauffeurs	19
3.2 Klanten en orders	20
3.3 Dispatch.....	22
3.4 Besluit.....	24
4. Pickup-and-delivery probleem	27
4.1 One-to-one problemen	27
4.2 Dynamische problemen.....	27
4.3 Relevante beperkingen.....	29
4.3.1 Laadbeperkingen	29
4.3.2 Rij- en rusttijden	31
4.3.3 Tijdvensters	32
4.4 Doelfunctie	33
5. Rittenplanningsalgoritme: constructieheuristiek	35
5.1 Nearest Neighbour zonder tijdvensters.....	35
5.1.1 Voorbeeld zonder tijdvensters.....	36
5.2 Nearest neighbour met tijdvensters.....	40
5.2.1 Methode.....	40
5.2.2 Interpretatie van de variabelen	40
5.2.3 Invloed gewichten	42

5.2.4	Nadelen	50
6.	Rittenplanningsmethode: vooruitplannen & verbeteringsheuristiek.....	53
6.1	Vooruitplannen.....	53
6.1.1	Voorbeeld met vooruitplannen	53
6.1.2	Uitgebreid voorbeeld.....	55
6.1.3	Conclusie	56
6.2	Verbeteringen van initiële oplossing	57
6.2.1	Simulated annealing	57
6.2.2	Toepassing SA	60
6.2.3	Besluit.....	62
7.	Toepassing op planning van MTL.....	63
7.1	Planning MTL.....	63
7.2	Toepassing methode.....	63
7.3	Besluit.....	66
8.	Conclusies & aanbevelingen voor verder onderzoek	67
8.1	Conclusies.....	67
8.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek	68
	Referenties	69
	Bijlagen.....	71

1. Inleiding

1.1 Vehicle Routing Problems

Transport van goederen is een heel belangrijk domein van de menselijke activiteit. Transport ondersteunt en maakt de meeste andere sociale en economische activiteiten mogelijk. Telkens wanneer we een telefoon gebruiken, inkopen doen, post lezen of het vliegtuig nemen, wordt dit mogelijk gemaakt door een systeem dat berichten, goederen of mensen vervoerd heeft van de ene plaats naar de andere (Bräysy et al., 2002). Goederentransport in het bijzonder is één van de meest belangrijke activiteiten van vandaag. Geschat werd dat rond de eeuwwisseling de kost van overbodig transport in de Verenigde Staten opliep tot Ongeveer \$45 miljard, en de omzet van goederentransport in Europa bedroeg €168 miljard (Bräysy et al., 2002). Geschat wordt dat distributiekosten verantwoordelijk zijn voor de helft van de logistieke kosten en in sommige industrieën, zoals de voedsel- en drankindustrie, de distributiekosten verantwoordelijk zijn voor 70% van de toegevoegde waarde kosten van goederen (Bräysy et al., 2002).

Rittenplanning is daarom één van de belangrijkste taken bij vele bedrijven. Routes moeten gepland worden in niet alleen de logistieke en transportsector maar in bijna alle sectoren waarin fysieke goederen worden geproduceerd. Naast het transport op publieke wegen wordt rittenplanning ook toegepast op lokaal transport binnen een bedrijf of warehouse of op het terrein van het bedrijf (Drexel, 2012). De voordelen van een verbeterde rittenplanning voor bedrijven zelf zijn duidelijk. Indien een bedrijf door een betere rittenplanning ervoor kan zorgen dat het minder chauffeurs nodig heeft, minder kilometers moet afleggen, goederen sneller bij hun bestemming kan laten aankomen, etc. kan het veel kosten besparen en de dienstverlening verbeteren door de effectievere en efficiëntere werking.

Naast de voordelen voor de bedrijven zelf hangen er ook macro-economische voordelen vast aan een verbeterde rittenplanning. Het vermijden van onnodige, of onnodig lange, routes met lage capaciteit vermindert de druk op het wegennetwerk waardoor andere transporten vlotter zullen kunnen verlopen (Drexel, 2012). Transport heeft ook nefaste gevolgen voor het milieu, zoals landgebruik, uitstoot van broeikasgassen, uitstoot van giftige stoffen, etc. Vooral belangrijk zijn de uitstoot van broeikasgassen en CO₂, aangezien deze directe gevolgen hebben voor de menselijke gezondheid. Zo is wegtransport verantwoordelijk voor 92% van de CO₂-uitstoot in het Verenigd Koninkrijk (Bektas et al., 2011). Verbeterde rittenplanning helpt bij het voorkomen van deze schadelijke gevolgen door efficiëntere routes te bepalen waardoor er minder uitstoot is.

In de literatuur wordt de Engelse benaming *Vehicle Routing Problem* (VRP) gebruikt om rittenplanningsproblemen te beschrijven. Het VRP is het meest bestudeerde combinatorische optimalisatieprobleem in transport en logistiek (Pollaris et al., 2015). Bij een combinatorisch optimalisatieprobleem wordt een optimaal object gezocht in een eindige set van objecten. Het VRP zoekt de optimale set van routes die uitgevoerd moeten worden door een vloot voertuigen om te voldoen aan de vraag van een gegeven set van klanten (Toth & Vigo, 2014). Deze optimale set wordt gezocht aan de hand van een doelfunctie die bijvoorbeeld de reistijd of reiskost gaat optimaliseren.

De economische relevantie van het onderzoek naar VRPs is enorm. Het gebruik van geautomatiseerde oplossingsmethoden voor het VRP, zowel op het strategische niveau als het operationele niveau, zorgt voor substantiële kostenbesparingen in de globale transportkost (Toth & Vigo, 2014). Het succes van de optimalisatietechnieken is te danken aan de ontwikkeling van sterke mathematische modellen die rekening kunnen houden met de verschillende karakteristieken van het VRP die in de praktijk voorkomen.

De eerste paper die een optimalisatietechniek voor het VRP voorstelde, en tegelijk ook het VRP introduceerde, was "The Truck Dispatching Problem" van Dantzig en Ramser (1959). Hierin werd een algoritme voorgesteld om de optimale route te vinden voor een vloot van bestelwagens die benzine vervoerden tussen een depot en een groot aantal tankstations die bediend worden door dit depot (Dantzig en Ramser, 1959). Sinds deze paper gepubliceerd werd zijn er honderden papers verschenen over het VRP. Deze interesse komt er door de praktische relevantie en de moeilijkheidsgraad van het probleem (Battara et al., 2009). De meest effectieve exacte algoritmes zijn maar in staat om problemen met ongeveer 50 klanten op te lossen. Slechts in uitzonderlijke gevallen kunnen ook grotere problemen opgelost worden (Toth & Vigo, 2014). In de praktijk bestaan er zeer veel verschillende varianten van het VRP door de diversiteit aan beperkingen waarmee rekening moet worden gehouden. Het VRP kan dus best gezien worden als een klasse van problemen in plaats van één welbepaald probleem.

1.2 Praktijkrelevantie

Deze masterproef gebeurt in samenwerking met het bedrijf Multimodal Transports & Logistics (MTL). MTL is een logistiek bedrijf gesitueerd in Gingelom en beschikt over een vloot van circa 70 voertuigen. Zoals de naam al aangeeft maakt MTL gebruik van verschillende transportmiddelen waaronder wegtransport en watertransport. De nadruk ligt echter op wegtransport aangezien dit hun belangrijkste activiteit is. Om economische en ecologische redenen worden enkel wegtransporten uitgevoerd voor opdrachten binnen een straal van 1000 kilometer rond de Benelux. Voor bestemmingen buiten deze actieradius zijn alternatieven per spoor, binnenwateren of internationale wateren mogelijk. De vloot van vrachtwagens is flexibel genoeg om aan verschillende klantenaanvragen te voldoen. De vloot bevat standaard trekker-opleggercombinaties maar beschikt ook over kleinere voertuigen voor distributie- en expresdoeleinden.

De verschillende eigenschappen van de chauffeurs en de voertuigen bepalen hoe de klantenaanvragen worden uitgevoerd. Belangrijke factoren die een invloed uitoefenen hebben betrekking op de laadruimte van de vrachtwagens en de kwalificaties van de chauffeur. Voor bepaalde transporten van gevaarlijke goederen moeten chauffeurs bijvoorbeeld de juiste certificaten hebben. Ook de afstand is van belang aangezien niet iedere chauffeur internationaal transport kan uitvoeren. Hiernaast zijn er nog een reeks andere factoren waarmee rekening moet worden gehouden bij de rittenplanning. Deze hebben onder meer te maken met plaatselijke wetgeving of structurele files.

De rittenplanning gebeurt op dit moment volledig manueel door een team van dispatchers zonder behulp van software. Er wordt ook geen algoritme gebruikt om de rittenplanning systematisch op te stellen. De doelstelling van deze masterproef is de rittenplanning van MTL te vereenvoudigen en/of automatiseren met behulp van een exacte oplossingsmethode of heuristiek. Hiernaast moet het ook

mogelijk zijn om de opgestelde rittenplanning aan te passen aan nieuwe informatie (zoals files of ongevallen op de weg) of nieuwe klant aanvragen die binnenkomen terwijl de vrachtwagens aan het rijden zijn. Tegelijkertijd moet de inzet van de vloot ook geoptimaliseerd worden. Hiermee wordt bedoeld: minder lege kilometers, minder afgelegde kilometers in het totaal, een verbeterde en dus economischere inzetbaarheid van de totale vloot en een verhoogde kwaliteit van en betrouwbaarheid naar leverprestatie.

1.3 Centrale onderzoeksvraag

Zoals al eerder beschreven wordt voor deze masterproef samengewerkt met het bedrijf Multimodal Transports & Logistics. Bij dit logistiek bedrijf gebeurt de rittenplanning manueel zonder behulp van enige software of een algoritme. Een team van dispatchers stelt de rittenplanning op via een onbekend proces. De bedoeling is om dit systematischer te laten verlopen. De centrale onderzoeksvraag luidt als volgt.

Centrale onderzoeksvraag: *Welk algoritme is het meest geschikt om de rittenplanning van Multimodal Transports & Logistics op te stellen?*

Om deze vraag te kunnen beantwoorden wordt eerst het antwoord gezocht op enkele deelvragen.

Deelvraag 1: *Met welke beperkingen en variabelen moet Multimodal Transports & Logistics rekening houden bij het opstellen van hun rittenplanning?*

De beperkingen waarmee rekening moet worden gehouden verschillen heel specifiek van bedrijf tot bedrijf. Aangezien de keuze van het algoritme afhangt van de relevante beperkingen moeten deze eerst gekend zijn. Hierna kan er overgegaan worden tot de zoektocht naar een geschikt algoritme, wat de volgende deelvraag is.

Deelvraag 2: *Welke algoritme kan gebruikt worden om de rittenplanning van Multimodal Transports & Logistics op te stellen?*

De rittenplanning van MTL zal bestaan uit meerdere deelproblemen. Er zal rekening gehouden moeten worden met factoren zoals laadcapaciteit, tijdsvensters, etc. Om tot een oplossing te komen zullen waarschijnlijk verschillende methodes uit de literatuur gecombineerd moeten worden. De bedoeling van deze deelvraag is om de verschillende methodes die nodig zijn te identificeren en waar mogelijk samen te voegen tot één algoritme.

Deelvraag 3: *Wat is het effect van het algoritme op de planning?*

Wanneer het algoritme ontwikkeld is moet er gekeken worden wat het effect is van het algoritme op de planning. De bedoeling van het algoritme is niet om een optimale rittenplanning te genereren maar wel om de taken van de dispatchers lichter te maken. De toetsing van het algoritme kan gebeuren door het manueel te testen of met behulp van een computersimulatie. Indien blijkt dat het algoritme niet de gewenste resultaten geeft zal er gekeken worden waar er verbeteringen mogelijk zijn.

1.4 Methodologie

In deze masterproef is het de bedoeling om een praktijkprobleem op te lossen. Belangrijk hiervoor is dat het probleem duidelijk omschreven is. Een korte samenvatting van het probleem is al doorgegeven door MTL maar om de centrale onderzoeksvraag te kunnen oplossen is een concretere omschrijving nodig. Om het probleem duidelijk in kaart te brengen zal er enkele dagen naar het bedrijf zelf gegaan worden om een duidelijk beeld van de huidige situatie te krijgen en de relevante variabelen te identificeren. Hiervoor zal er een inleidende literatuurstudie gedaan worden om te weten welke verschillende soorten van VRPs er zijn zodat duidelijk is waarop gelet moet worden wanneer er naar MTL gegaan wordt.

Nadat het praktijkprobleem volledig in kaart is gebracht moet er overgegaan worden tot een uitgebreide literatuurstudie. Zoals al zal blijken uit de inleidende literatuurstudie (zie volgende sectie) kunnen VRPs op verschillende manieren ingedeeld worden. Het praktijkprobleem zal dus aspecten bevatten van verschillende varianten van het VRP. Het is noodzakelijk dat de verschillende aspecten van het probleem zo concreet mogelijk worden vastgelegd opdat er naar specifieke literatuur kan worden gezocht. Bronnen zullen gezocht worden met behulp van *EBSCOhost*. In *EBSCOhost* zullen zoektermen ingevoerd worden die betrekking hebben op het VRP en de relevante varianten. Om een idee te krijgen van de verschillende soorten VRPs zal de zoekterm *vehicle routing problems taxonomy* gebruikt worden. Belangrijke zoektermen voor de varianten van het VRP zijn onder meer *vehicle routing with pick-up and delivery*, *vehicle routing with time-windows* en *dynamic vehicle routing*. Dit zijn varianten van het VRP die relevant zijn voor MTL. In de gevonden papers zal een onderscheid gemaakt kunnen worden tussen de eerder theoretische papers en de papers die een methode voorstellen om een bepaald probleem op te lossen. In de eerste fase van het onderzoek zal vooral gezocht worden naar de theoretische papers om een duidelijk beeld te krijgen van de variabelen waarmee het rekening houdt. Hierna zal gekeken worden naar de praktische papers die waarschijnlijk een 'nauwere' situatie zullen omschrijven waarin hun methode kan toegepast worden. De relevante papers zullen dan onderzocht worden om de verschillende methodes te combineren tot een praktisch algoritme.

Hoogstwaarschijnlijk zal er in de literatuurstudie geen kant-en-klaar algoritme gevonden worden dat door MTL toegepast kan worden. Daarom zal van verschillende papers die algoritmes voorstellen informatie vergaard moeten worden om zo zelf een methode te kunnen opstellen. Deze methode zal waarschijnlijk een heuristiek of metaheuristiek zijn. Om de methode te testen zal het manueel getest worden en, indien mogelijk, ook met behulp van een computersimulatie.

2. Classificatie van rittenplanningsproblemen

Sinds de introductie van het VRP 50 jaar geleden zijn er een groot aantal varianten ontstaan. In de volgende paragrafen worden enkele van de meest bekende en praktijkrelevante varianten besproken. Deze opsomming is niet limitatief maar geeft wel een perspectief op de verschillende mogelijke VRPs. Eerst worden de VRPs ingedeeld aan de hand van het type van transportvraag, vervolgens wordt een nieuwe indeling gemaakt op basis van de beperkingen waarmee rekening moet worden gehouden. Het boek "Vehicle Routing, problems methods and applications" van Toth en Vigo (2014) wordt hier als leidraad gebruikt maar wordt aangevuld met andere bronnen.

2.1 Type van transportvraag

De transportvraag kan sterk verschillen tussen verschillende opdrachten. Bij het basistype VRP worden goederen vervoerd van een depot naar verschillende klanten. Er bestaan echter verschillende varianten. Hier worden enkele relevante soorten VRPs besproken. Engelse benamingen worden gebruikt voor duidelijkheid.

Delivery and Collection. Naast de levering aan klanten is het ook mogelijk dat goederen moeten opgehaald worden bij klanten. In de literatuur worden deze collecties vaak ook *pickups* genoemd.

Wanneer we aannemen dat distributie start en collectie eindigt aan het depot worden VRPs met collectie *many-to-one* VRP genoemd en problemen met distributie *one-to-many* VRP. Een moeilijkheid hierbij is om compatibele producten te vinden wat betreft de aard van de goederen, de leveringslocatie, het gewicht en de dimensies. De eerste variant is het *VRP with backhauls*. Hierbij moeten alle leveringen aan klanten eerst gedaan zijn voordat het voertuig aan het eerste collectiepunt komt, de zogenaamde *backhaul* klant. Indien het echter mogelijk is om de goederen in de laadruimte te herschikken wordt het probleem een *VRP with mixed deliveries and collections*, oftewel een *Mixed VRP*. Bij het Mixed VRP is het mogelijk om leveringen af te wisselen met collecties bij klanten. Verder onderscheid is nog mogelijk maar zou voor deze inleiding te ver gaan.

Point-to-Point Transportation. Bij *pickup-and-delivery* VRPs moeten er goederen vervoerd worden tussen twee locaties, bij de eerste locatie wordt iets opgehaald om het dan bij de tweede locatie te gaan afleveren. In het algemeen is geen van deze locaties een depot waardoor deze VRPs ook wel *many-to-many* VRPs genoemd worden. Parragh et al. (2008) maken in hun paper nog eens onderscheid tussen twee subklassen van *pickup-and-delivery* VRPs, *unpaired* en *paired*. De eerste klasse is die waar de *pickup* en *delivery* locaties *unpaired* zijn. Ieder goed dat wordt opgehaald kan dan gebruikt worden om te voldoen aan de vraag van eender welke klant. Bij het *paired pickup-and-delivery* VRP hoort iedere pickup bij één leveringslocatie.

Repeated Supply. Het kan zijn dat klanten vaak opnieuw goederen nodig hebben. Indien gepland wordt over een lange tijdshorizon maakt het voor de klant vaak niet uit op welke dag de goederen aankomen, zolang ze maar niet zonder voorraad komt te zitten. Er zijn verschillende soorten VRPs met een repeated supply.

In het *Periodic VRP* zijn er twee planningsniveau: op het eerste niveau wordt het *visiting pattern* voor iedere klant bepaald. Hier wordt bijvoorbeeld bepaald op welke dagen de klant bezocht kan worden.

Op het tweede niveau moet een VRP worden opgelost voor iedere dag, waarbij de subset van klanten die bezocht gaan worden bepaald worden aan de hand van de keuzes gemaakt op het eerste niveau.

Het *periodic* VRP ontstaat vanzelf in gebieden zoals afvalophaling (Cordeau et al, 1997). In het geval van afvalophaling worden deze problemen ook wel *Arc Routing Problems* genoemd omdat het de bedoeling is om alle arcs (straten) te bezoeken tegen een zo laag mogelijke kost (Nuortio et al. 2006).

Bij MTL kan er echter niet ver genoeg vooruit gepland worden om te spreken van repeated supply.

Non-split and Split Services. In de voorgaande types van transportvraag is ervan uitgegaan dat het transport wordt uitgevoerd door één voertuig in één rit. Het is echter ook mogelijk om de dienst op te splitsen. Hiervoor zijn twee redenen: indien de vraag groter is dan de capaciteit van het voertuig zijn meerdere ritten onvermijdelijk, en het opsplitsen van diensten in verschillende kleinere diensten kan leiden tot significante kostenbesparingen, zoals onder andere door Dror et al. (1989) werd aangetoond. Het VRP dat zich hiermee bezighoudt wordt het *Split Delivery* VRP genoemd. Indien MTL aan klantenaanvragen moet voldoen waarbij het aantal te vervoeren goederen niet meer past in één vrachtwagen komt het ook in deze situatie terecht.

Combined Shipment and Multi-modal Service. In tegenstelling tot bij het Split Delivery VRP gaat een *combined shipment* de individuele shipments intact laten maar worden verschillende voertuigen gebruikt om de shipments op hun bestemming te krijgen. Hier bestaan verschillende varianten die afhangen van het gebruikte distributienetwerk zoals *hub-and-spoke* en *crossdocking*. MTL is ook in staat om gebruik te maken van meerdere transportmiddelen waaronder binnenvaartschepen. In sommige gevallen kan dit leiden tot een vermindering van de transportkosten.

Routing with Profits and Service Selection. Met een beperkte vloot kan het zijn dat er niet voldaan kan worden aan alle klantaanvragen. In dat geval wordt enkel voldaan aan een subset van de aanvragen. Door het tegelijkertijd optimaliseren van zowel de routes als de aanvraagselectie kan een bedrijf meer opbrengsten realiseren dan wanneer het eerst de aanvragen gaat selecteren en later de routes gaat uitstippelen. Een onderscheid wordt hier gemaakt tussen drie categorieën:

- 1) Indien routekosten en -winsten gecombineerd worden in één doelstellingsfunctie wordt het routing probleem met één voertuig het *Profitable Tour Problem* genoemd. Voor het VRP dat hiermee overeenkomt bestaat geen consistente benaming maar kan in de literatuur gevonden worden als het *Capacitated PTP*.
- 2) De variant waar de routelengte een bovengrens heeft en het doel winstmaximalisatie is wordt het *Team Orienteering Problem* genoemd.
- 3) Indien er een ondergrens is op de winst die behaald moet worden en het doel is om de goedkoopste route te vinden is het probleem het *Prize-Collecting VRP*.

Dynamic and Stochastic Routing. In veruit de meeste gevallen zijn niet alle variabelen bekend en zullen deze nooit gekend zijn, of worden deze nadat de rittenplanning al is opgesteld pas bekend. Het is dan belangrijk om de planning aan deze nieuwe factoren te kunnen aanpassen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen twee situaties:

- 1) *Dynamische* problemen: hier worden delen of de gehele relevante informatie over de systeemcondities bekend tijdens de uitvoering van de rit.
- 2) *Stochastische* problemen: hier zijn de systeemcondities onzeker, maar de onzekerheid kan weergegeven worden door een kansverdeling.

Bij dynamische VRPs bestaat de informatie die pas na verloop van tijd bekend wordt onder andere uit de locaties van de klanten en de vraag. Sommige kunnen op voorhand bekend zijn maar voor de andere klanten is enkele probabilistische informatie beschikbaar. Dit type van probleem wordt ook wel *online* genoemd wanneer de nadruk ligt op het ontwikkelen van heuristische methodes die een bepaalde prestatie garanderen. Een ander type van dynamisch VRP houdt rekening met de invloed van het tijdstip op de reisduur. Spitsuren proberen dan vermeden te worden. Een veel uitgebreidere taxonomie van dynamische VRPs kan gevonden worden in Psaraftis et al. (2015).

Bij stochastische VRPs zijn sommige componenten zoals de vraag en reistijd onzeker en weergegeven als willekeurige variabelen. De focus van stochastische VRPs ligt daarom op het analyseren van de impact van onzekerheid en de resulterende kosten en serviceniveaus.

In de praktijk zal ieder probleem met een bepaalde onzekerheid te maken krijgen. Systematische files kunnen voorspeld worden, maar files kunnen ook onverwacht ontstaan. Nieuwe informatie kan altijd binnenkomen waardoor een eerder geplande route niet langer de beste keuze is. Het is belangrijk dat de methode die ontwikkeld wordt voor MTL in staat is om rekening te houden met nieuwe informatie waardoor nieuwe routes snel gepland kunnen worden.

2.2 Intra-route beperkingen

VRP varianten kunnen ook onderscheiden worden op basis van de beperkingen die bepalen of een route al dan niet *feasible* is. De beperkingen die hier bekeken worden hebben te maken met het laden, de afstand, het hergebruik van voertuigen en tijdsschema's.

Loading. Een voertuig heeft maar een beperkte capaciteit wat betreft laadruimte. De capaciteitsbeperkingen kunnen geschreven worden als een algemene beperking op een resource die geconsumeerd wordt bij iedere vertex (klant) die het voertuig bereikt. Er kunnen verschillende capaciteitsbeperkingen bestaan. Bijvoorbeeld beperkingen in verband met gewicht, ruimte, of volume. Dit zijn beperkingen die relevant zijn in ieder praktisch VRP. De dimensies van de vracht spelen een grote rol bij de toewijzing van de goederen aan de verschillende vrachtwagens.

Meer complexe ladingsbeperkingen ontstaan wanneer zowel de vracht als de compartimenten beschreven worden als 2- of 3-dimensionele eenheden. Hier moeten multi-dimensionale verpakkingsproblemen gecombineerd worden met VRPs. Beide problemen alleen zijn al moeilijk op te lossen in de praktijk. Een combinatie van de twee leidt nog eens tot een verhoging van de moeilijkheidsgraad maar zorgt wel voor een betere oplossing (Iori et al., 2010).

Laadbeperkingen zijn relevant wanneer goederen niet allemaal in de trailer passen op een willekeurige manier (Pollaris et al., 2015). Er zijn verschillende types van laadbeperkingen die container-, item-, cargo-, of laad-gerelateerd kunnen zijn. Container-gerelateerde beperkingen hebben te maken met de container of het voertuig waarin het de items worden geplaatst. Item-gerelateerde beperkingen hebben betrekking tot de individuele items en cargo-gerelateerde

beperkingen hebben te maken met een subset van items. Laad-gerelateerde beperkingen hebben te maken met het resultaat van het *packing process* (Pollaris et al., 2015).

De integratie van laadbeperkingen in VRPs is een redelijk nieuw onderzoeksdomein. Beide problemen op zich zijn al zeer moeilijk op te lossen. Een combinatie van beide is daarom zeer moeilijk maar het kan wel leiden tot een betere logistieke oplossing (Pollaris et al., 2015). Wanneer er bijvoorbeeld geen rekening wordt gehouden met aslast-beperkingen bij de planning is het mogelijk dat er ad hoc veranderingen moeten worden gemaakt in de planning. Het is dus van belang dat VRP-modellen rekening houden met laadbeperkingen (Pollaris et al., 2015).

Route Length. Een andere simpele beperking zijn de afstandsgrenzen van de gekozen routes. Indien afstandsbependingen worden toegevoegd aan het CVRP krijgen we het *Distance-constrained CVRP*. Hiernaast kunnen ook beperkingen op de reisduur worden vastgelegd, op de reiskost en op het aantal wegen met bepaalde karakteristieken.

MTL beschikt over een bepaald aantal chauffeurs die verschillen wat betreft de afstand die ze overbruggen. Sommige chauffeurs gaan iedere dag naar huis en kunnen dus enkel lokaal goederen vervoeren terwijl andere chauffeurs beschikbaar zijn voor langere (internationale) afstanden. Hiernaast is MTL enkel actief binnen een bepaalde actieradius van haar thuisbasis. De methode voor het opstellen van de rittenplanning van MTL moet dus rekening kunnen houden met afstandsbependingen.

Multiple Use of Vehicles. Bij de meeste VRPs wordt standaard aangenomen dat ieder voertuig slechts één route volgt over de planningshorizon T . In het VRP *with Multiple use of vehicles* mogen voertuigen verschillende routes afleggen. Gegeven enkele routes met duur T_1, T_2, \dots, T_p kan één voertuig deze allemaal afleggen indien $T_1 + T_2 + \dots + T_p \leq T$ geldt. Het is zelfs zo dat, indien de voertuigcapaciteit Q relatief klein is of andere beperkingen ervoor zorgen dat slechts een klein aantal services per route kunnen worden uitgevoerd, voertuigen hergebruikt moeten worden om met een beperkte vloot $|K|$ te kunnen worden uitgevoerd. Indien de rittenplanning eerst zou worden opgesteld met de assumptie dat de vloot onbeperkt is om hierna aangepast te worden aan de vloot worden suboptimale oplossingen bekomen. Battarra et al. (2009) stellen in hun paper een methode voor die rekening houdt met tijdsvensters bij klanten en die het toelaat om voertuigen voor meerdere routes te gebruiken. Hun methode werd uitgetest op reële praktijkproblemen en bleek effectief.

Time Windows and Scheduling Aspects. Relevante beperkingen voor praktische VRPs hebben te maken met reis-, service- en wachttijden. In het VRP *with Time Windows*, wordt een oversteektijd t_{ij} voor iedere arc (weg) $(i, j) \in A$ en een tijdsvenster $[a_i, b_i]$ voor iedere vertex (klant) $i \in V$ gegeven. Een schema is een combinatie van starttijden T_{ik} voor de service aan vertex $i \in V$ wanneer deze bezocht wordt door voertuig $k \in K$. Een schema wordt als geldig beschouwd indien de volgende twee voorwaarden gelden:

$$a_i \leq T_{ik} \leq b_i \forall i \in V, k \in K \quad (1.1)$$

en

$$x_{ijk} = 1 \Rightarrow T_{ik} + t_{ij} \leq T_{jk} \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (1.2)$$

De eerste voorwaarde zegt dat de starttijd binnen het tijdsvenster $[a_i, b_i]$ moet liggen. De tweede voorwaarde zegt dat de starttijd bij T_{jk} later of gelijk moet zijn aan de starttijd bij T_{ik} plus de tijd die nodig is om van i naar j te rijden.

Dit VRP kan ook uitgebreid worden om aan andere voorwaarden te voldoen. Ook voor de complexe beperkingen die de Europese regels met betrekking tot rij- en rusttijden met zich meebrengen zijn er aanpassingen mogelijk. Een voorbeeld hiervan kan gevonden worden in Kok et al. (2010).

2.3 Oplossingsmethoden

De meest geschikte oplossingsmethode zal voor iedere variant van het VRP anders zijn. Methodologisch kan het echter interessant zijn om één elementair VRP te beschrijven en de oplossingsmethodes hiervoor te beschrijven. Dit elementair VRP is het *Capacitated VRP (CVRP)*.

Het CVRP wordt als volgt beschreven. Gegeven zijn een set van identieke voertuigen in een depot met een gelimiteerde laadcapaciteit, en een set van geografisch verspreide klanten met een bepaalde vraag voor een homogeen goed. De taak is het vinden van een optimale (volgens een doelfunctie) rittenplanning, dus een set van voertuigroutes die aangeven welke klanten bezocht worden door welk voertuig en in welke volgorde deze bezoeken gebeuren zodat iedere klant exact één keer wordt bezocht, er voldaan is aan de vraag van iedere klant en de laadcapaciteit van de voertuigen niet overschreden wordt (Drexler, 2012).

Exacte algoritmes zijn nog niet in staat om consistent VRPs op te lossen met meer dan 50 klanten (Cordeau et al., 2002). Aangezien exacte aanpakken in de meeste gevallen niet adequaat zijn wordt in de praktijk meestal gebruik gemaakt van heuristieken. Deze heuristieken worden opgesplitst in de klassieke heuristieken en de metaheuristieken. Deze drie groepen van oplossingsmethoden worden hieronder besproken.

2.3.1 Exacte algoritmes

Tot het einde van de jaren tachtig van de vorige eeuw waren de meest effectieve exacte algoritmes voor het CVRP vooral *direct tree search algorithms* die gebaseerd waren op *Branch-and-Bound*. Deze initiële oplossingen waren in staat om CVRPs met ongeveer tien klanten optimaal op te lossen met de gelimiteerde computerhardware van die tijd (Toth en Vigo, 2014).

Een Branch-and-Bound algoritme zoekt in de gehele oplossingsruimte van een gegeven probleem naar de beste oplossing. Een complete opsomming en rangschikking van alle oplossingen is meestal onmogelijk doordat het aantal mogelijke oplossingen exponentieel stijgt met het aantal klanten. Door grenzen te stellen aan de oplossingsruimte samen met de huidige beste oplossing kan het algoritme delen van de oplossingsruimte slechts impliciet doorzoeken en is een complete rangschikking niet nodig (Clausen, 1999). Vooruitgang bij Branch-and-Bound algoritmes kwam er door het gebruik van meer gesofisticeerde grenzen zoals deze gebaseerd op *Lagrangian relaxations* en de *additive approach*. Hiermee konden instanties met iets minder dan 100 klanten binnen een redelijke termijn optimaal opgelost worden (Toth en Vigo, 2014).

Een alternatieve formulering voor het CVRP en zijn varianten is deze gebaseerd op *Set Partitioning* of *Set Covering*. Deze formulering gebruikt een mogelijks exponentieel aantal binaire variabelen.

Algoritmes die hierop gebaseerd zijn leiden meestal tot scherpe grenzen en presteerden een stuk beter dan de eerste Branch-and-Bound algoritmes (Toth en Vigo, 2014). Algoritmes van deze soort worden Branch-and-Cut-and-Price algoritmes genoemd. De huidige beste algoritmes behoren allemaal tot de Branch-and-Cut-and-Price familie. Dit betekent echter niet dat eerdere algoritmes, waarop Branch-and-Cut-and-Price algoritmes gebaseerd zijn, nu geen waarde meer hebben. Oudere algoritmes blijven in gebruik omdat ze veel makkelijker te implementeren zijn. Ze zijn dus nog steeds zeer nuttig voor nieuwe varianten van het VRP of voor VRPs op grotere schaal (Toth en Vigo, 2014).

Ondanks de vooruitgang in de laatste jaren kunnen nog steeds enkel kleine VRPs optimaal opgelost worden via exacte algoritmes. VRPs die in de praktijk voorkomen zijn echter vaak veel groter en moeten binnen veel kortere tijd opgelost kunnen worden. Daarom wordt er in de praktijk meer gebruik gemaakt van heuristieken (Toth en Vigo, 2014).

2.3.2 Klassieke Heuristieken

Een heuristiek is een procedure die een grote kans heeft om een zeer goede geldige oplossing te vinden maar niet noodzakelijk een optimale oplossing voor het specifieke probleem waarvoor het gebruikt wordt (Hillier en Lieberman, 2010).

Dantzig en Ramser (1959) stelden in hun paper die het VRP introduceerde al een simpele heuristiek voor. Hun methode werd niet verder uitgewerkt maar geldt wel als inspiratie voor ontwikkelaars van *matching-based* heuristieken (Toth en Vigo, 2014). Sindsdien is er een grote verscheidenheid aan *constructive* en *improvement* heuristieken ontstaan wat verder leidde tot het ontstaan van metaheuristieken die in staat zijn binnen enkele seconden een zeer degelijke oplossing te vinden (Toth en Vigo, 2014).

Het onderzoek naar VRP heuristieken is in de laatste jaren zo gegroeid dat een volledige opsomming niet meer mogelijk is (Toth en Vigo, 2014). Hier worden in de plaats enkele methodes en principes die al jaren meegaan opgenoemd. De Engelse benaming wordt weer gebruikt voor de duidelijkheid.

Constructive Heuristics. *Constructive heuristics* worden meestal gebruikt om een beginoplossing te vinden die dan verbeterd kan worden door een *improvement heuristic*. De meeste metaheuristieken zijn tegenwoordig echter zo robuust dat ze kunnen starten met eender welke willekeurige startoplossing (Toth en Vigo, 2014).

Eén zo klassieke methode is het *Clarke and Wright Savings Heuristic* (Clarke en Wright, 1964). Dit simpele algoritme heeft als voordeel dat het intuïtief, gemakkelijk te implementeren en snel is. Het wordt vaak gebruikt om een initiële oplossing te genereren in meer gesofisticeerde algoritmes (Toth en Vigo, 2014).

Classical Improvement Heuristics. *Classical improvement Heuristics* voeren intra- en inter-route bewegingen uit. In de praktijk zijn inter-route bewegingen essentieel om goede resultaten te bereiken. Dit kunnen bewegingen zijn zoals het verwijderen van k opeenvolgende klanten van hun huidige route en ze ergens anders terugsteken of het wisselen van klanten tussen twee routes (Toth en Vigo, 2014).

2.3.3 Metaheuristieken

Een methaheuristiek is een algemene oplossingsmethode die zowel een algemene structuur als strategierichtlijnen geeft voor het ontwikkelen van een specifieke heuristische methode die past bij een bepaald soort probleem (Hillier en Lieberman, 2010).

Huidige metaheuristieken voor het VRP kunnen onderverdeeld worden in *local search methods* en *population based heuristics*. *Local search methods* onderzoeken de oplossingsruimte door bij iedere iteratie van de ene oplossing naar een andere te gaan die in de buurt ligt. Deze nieuwe oplossing verschilt dan maar met bijvoorbeeld één parameter van de vorige oplossing. In deze categorie horen onder meer *simulated annealing*, *deterministic annealing*, *tabu search*, *iterated local search* en *variable neighborhood search* (Toth en Vigo, 2014).

Population based heuristics maken nieuwe oplossingen door eerdere oplossingen te combineren. Op deze manier wordt getracht betere oplossingen te bekomen. Enkele voorbeelden van deze categorie zijn *ant colony optimization*, *genetic algorithms*, *scatter search* en *path relinking* (Toth en Vigo, 2014).

Het onderscheid tussen de verschillende metaheuristieken is in de laatste tien jaar meer en meer vervaagd en er zijn zelfs verschillende hybrides van de verschillende methodes ontwikkeld. Eén van deze hybridefamilies is de *population-based search and local search*. Hierbij gaat een *local search method* zoals *tabu search* aangevuld worden met *population* en *recombination* concepten. Dit wordt *Adaptive Memory Programming* genoemd. Hiernaast bestaan er nog vele ander hybride-methoden maar een volledige opsomming zou hier te ver leiden.

3. Huidige situatie bij MTL

In deze sectie wordt besproken wat de huidige manier van werken bij MTL is. Eerst wordt gekeken naar de vloot vrachtwagens en de chauffeurs waarover MTL beschikt. Vervolgens worden de klanten en het type orders dat MTL vervoert besproken. Hierna wordt gekeken naar hoe MTL momenteel de planning opstelt. Ten slotte wordt een kort besluit geformuleerd waarin het type VRP waarmee MTL te maken heeft wordt vermeld.

3.1 Chauffeurs

Voor de dagelijkse planning beschikt MTL over een 75-tal chauffeurs. Al de chauffeurs beschikken over hun eigen trekker. Van deze 75 chauffeurs is ongeveer 50% in dienst bij een onderaannemer maar dit cijfer kan variëren. De chauffeurs in onderaanneming liggen contractueel vast voor meerdere maanden. Dit betekent dat ze ook betaald moeten worden tijdens periodes van minder werk. Dit is echter zelden het geval. Naast deze chauffeurs beschikt MTL nog over een 25-tal andere vrachtwagens maar deze doen altijd hetzelfde vaste werk en zijn dus niet beschikbaar voor de dagelijkse planning. Wat betreft de aard van de opdrachten die worden toegewezen aan de eigen chauffeurs of de chauffeurs van onderaannemers is er niet veel verschil. Een verschil is wel dat MTL niet verantwoordelijk is voor het respecteren van de rij- en rusttijden van de chauffeurs in onderaanneming. Desalniettemin worden opdrachten voor de chauffeurs in onderaanneming ook ingepland met de veronderstelling dat de wetgeving gerespecteerd wordt.

De trekkers zijn allemaal uitgerust met een tachograaf en staan voortdurend in verbinding met de dispatchers. De dispatchers kunnen op ieder moment de plaats waar de chauffeurs zich bevinden te weten komen. Zij kunnen ook door middel van korte sms-berichten via hun computersysteem communiceren met de chauffeurs.

De meeste chauffeurs kunnen internationaal rijden wat betekent dat zij meerdere dagen per week van huis kunnen zijn. Er zijn ook chauffeurs die iedere dag naar huis gaan maar dit is een kleine minderheid. De chauffeurs volgen over het algemeen het ritme van een normale werkweek. De wekelijkse rusttijd wordt dus genomen op zaterdag en zondag. Dit geldt ook voor de buitenlandse chauffeurs. Het kan voorkomen dat een chauffeur op zaterdagvoormiddag nog iets moet gaan leveren maar dit is niet de regel. Wat betreft de dagelijkse rusttijden is er wel wat verschil tussen verschillende chauffeurs. Zoals eerder gezegd beginnen de meeste tussen 8u en 9u maar er zijn er ook die later beginnen. Dit is om ervoor te zorgen dat er niet enkel tot 17u of 18u gewerkt kan worden maar dat er ook nog later leveringen kunnen gebeuren.

De chauffeurs worden per uur betaald. Dit betekent dat ze zoveel mogelijk uren willen werken. Er wordt daarom ook geprobeerd om de chauffeurs iedere dag zoveel mogelijk werk te geven. De reden dat dit vermeld wordt is dat er zich soms situaties kunnen voordoen waarbij het voor de planning voordeliger kan zijn om een chauffeur minder uren te laten werken. Bijvoorbeeld, er moet iets vervoerd worden naar het buitenland en dit zou vijf uur in beslag nemen. Indien een chauffeur deze opdracht krijgt toegewezen en dan blijkt dat er die dag geen ander werk is in de buurt van zijn levering kan hij die dag maar vijf uur werken. Indien men dus weet dat er geen ander werk

beschikbaar is in de buurt van deze buitenlandse levering zal deze chauffeur eerst enkele kleine opdrachten krijgen alvorens hij aan deze lange opdracht begint. Hierdoor komt hij toch aan zijn gewenste werkuren. MTL kan zich deze manier van werken veroorloven omdat ze altijd met een ondercapaciteit kampen. Er is momenteel te veel werk voor het aantal vrachtwagens dat ze hebben. Er worden daarom extra vrachtwagens aangekocht maar dit kost tijd waardoor ze voorlopig altijd werk genoeg hebben voor iedere chauffeur.

MTL kan hun personeelsbestand ook uitbreiden met een pool van 10 extra chauffeurs. Deze worden meestal ingezet voor onverwacht werk. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer een klant hen opbelt om te zeggen dat ze enkele extra vrachtwagens nodig hebben. Hier wordt dagelijks gebruik van gemaakt. De omgekeerde situatie waarbij er te weinig werk is voor de chauffeurs komt heel zelden voor. Één of twee dagen per jaar wordt er eens een chauffeur economisch werkloos gezet.

De extra chauffeurs kunnen ook ingezet worden indien een chauffeur niet op tijd bij zijn opdracht kan geraken. Indien deze situatie zich voordoet zal dit echter meestal opgelost worden door een andere chauffeur, die in de buurt is, naar deze opdracht te sturen. Hiervoor beschikt MTL over parkeerplaatsen in verschillende steden zoals Genk, Gent en Gingelom. Op deze parkeerplaatsen staan trailers die hiervoor gebruikt kunnen worden. De dichtstbijzijnde chauffeur kan daar een trailer gaan ophalen om de opdracht van de oorspronkelijk ingeplande chauffeur te gaan uitvoeren. Dit betekent dan wel dat de planning zo aangepast zal moeten worden zodat de chauffeur die nu deze opdracht uitvoert zijn oorspronkelijke opdracht ook nog uitgevoerd wordt, desnoods door weer een andere chauffeur.

3.2 Klanten en orders

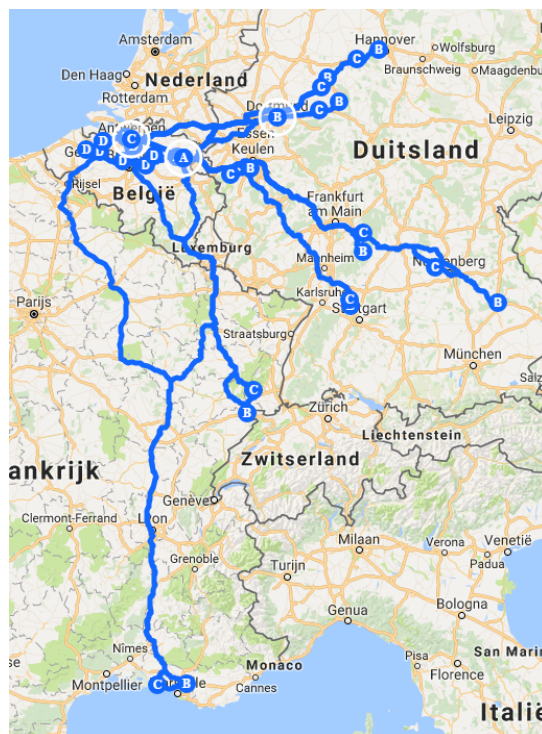
MTL is het meest actief in de regio Limburg, Antwerpen en Luik. De belangrijkste klanten van MTL zijn gelegen in Genk, Gent, Beringen, Geel en Antwerpen. In principe wordt er geleverd over heel Europa maar het meeste transport gaat naar gebieden in Frankrijk, Polen en Duitsland en dan vooral het Ruhrgebied. Enkele opdrachten per maand gaan ook naar landen zo ver als Portugal, Turkije of Griekenland maar dit aandeel is veel kleiner.

In België zijn er vaste klanten en kan er dus gerekend worden op een quasi zekere vraag maar dit is in het buitenland veel minder. De reden hiervoor is dat MTL geen vaste service kan aanbieden aan klanten in het buitenland. Het kan zijn dat tijdens een periode er iedere dag wagens naar een bepaalde regio in het buitenland moeten, en dus ook weer een lading kunnen terugnemen, maar eens deze periode voorbij is, kan het een hele tijd duren voor MTL weer beschikbaar is in deze regio. Op die manier is het moeilijk om een vaste klantrelatie op te bouwen. Met vaste klanten wordt bedoeld dat de pickup locatie wel gelijk is maar de plaats waar geleverd moet worden is dan verschillend.

Tabel 1 geeft 10 export- en bijhorende importritten van MTL. Deze zijn op figuur 1 op een kaart aangeduid.

Pickuplocatie (export)	Leveringslocatie (export)	Pickuplocatie (import)	Leveringslocatie (import)
B - 36 Genk	D - 33 Bielefeld	D - 33 Gutersloh	B - 17 Mollem
B - 90 Zelzate	D - 50 Bruehl	D - 52 Kreuzau	B - 91 Kallo
B - 36 Genk	D - 93 Regensburg	D - 90 Langenzenn	B - 3945 Ham
B - 90 Zelzate	D - 30 Seelze	D - 31 Obernkirchen	B - 30 Leuven
B - 90 Zelzate	D - 33 Paderborn	D - 59 Erwitte	B - 32 Langdorp
B - 36 Genk	D - 74 Sersheim	D - 74 Eibensbach	B - 25 Kontich
B - 36 Genk	D - 63 Buerstadt	D - 63 Bessenbach	B - 98 Aalter
B - 20 Antwerpen	FR - 25 Valentigney	FR - 68 Niederbrueck	B - 20 Antwerpen
B - 35 Zonhoven	FR - 13 Fuveau	FR - 13 Fos sur mer	B - 90 Zelzate
B - 36 Genk	D - 44 Dortmund	D - 44 Dortmund	B - 20 Antwerpen

Tabel 1 10 export- en importritten van MTL



Figuur 1 10 import- en exportritten van MTL

Vervoer vanuit het binnenland naar het buitenland gaat meestal om zwaar staal vervoer. Ongeveer 90% van de export is het vervoer van staal bobijnen. Er worden in de meeste gevallen een drietal bobijnen opgeladen die alledrie ongeveer 7 ton wegen. Het aantal gebruikte laadmeters is dan ongeveer 6 meter. Er wordt bijgeladen tot de wagen aan zijn maximum gewicht zit of er geen plaats

meer is. Bij het zwaar staal vervoer is telkens het gewicht van de goederen de bottleneck. De overige 10% bestaat uit vervoer op palletten. In dit geval wordt de vrachtwagen volledig volgeladen en is er geen probleem wat betreft het gewicht. Ook bij de import wordt zo goed als alles vervoerd op palletten.

Veel orders vereisen een speciaal soort vrachtwagen. De reden hiervoor kan het gewicht zijn, de afmetingen, het type product, etc. Ongeveer 50% van de export vereist een aangepaste vrachtwagen. In de meeste gevallen komt dit door het gewicht van de te vervoeren goederen. Indien er geen orders zijn die een speciaal soort vrachtwagen vereisen kunnen deze vrachtwagens ook ingezet worden voor gewone orders. De te vervoeren stalen goederen zoals bobijnen worden tegenwoordig ook zwaarder en zwaarder gemaakt waardoor er steeds meer en meer goederen een speciaal soort vrachtwagen vereisen. Het is dus noodzakelijk dat het planningsalgoritme een onderscheid kan maken tussen de goederen die een aangepaste vrachtwagen vereisen en goederen die door alle vrachtwagens vervoerd kunnen worden.

Wanneer er bij de klant opgehaald of geleverd kan worden staat vermeld op het order dat binnenkomt. Het is dus niet nodig dat klanten op voorhand nog eens verwittigd worden wanneer een vrachtwagen ter plaatse zal zijn. Indien een vrachtwagen niet op tijd beschikbaar zal zijn wordt de klant wel verwittigd. De tijdsvensters waartussen goederen geladen of gelost kunnen worden bij klanten zijn meestal zeer breed. Het gaat dan om een hele voor- of namiddag of op zijn minst om enkele uren. Het voordeel van deze brede tijdsvensters is dat het de dispatchers meer vrijheid geeft bij de verdeling van de opdrachten. Zo kan men een order dat bijvoorbeeld die dag moet gebeuren 's avonds pas doorgegeven worden aan een chauffeur omdat deze dan toch al in de buurt is. Indien er bij deze klant enkel geleverd zou kunnen worden tussen 12u en 13u kan het zijn dat deze opdracht moest toegewezen worden aan chauffeur die van verder moet komen en daardoor meer lege kilometers moet rijden.

MTL maakt ook deel uit van het palletdistributienetwerk Palletways. Dit is een netwerk van verschillende transportbedrijven dat er voor zorgt dat palletten doorheen heel Europa goedkoop vervoerd kunnen worden. MTL gebruikt hiervoor één vrachtwagen die goederen bevat van Luik, Limburg, en een deel van Antwerpen die bestemd zijn voor de rest van Europa. Deze vrachtwagen vertrekt iedere avond naar een depot in Nijmegen. In dat depot worden deze goederen uitgewisseld met wagens van andere transportbedrijven uit andere delen van Europa. De wagen van MTL wordt volgeladen met de goederen die bestemd zijn voor België. Deze vrachtwagen rijdt vervolgens terug naar een cross-dock in Lummen waar de verschillende palletten op kleinere wagens worden gezet en vervoerd worden naar de klanten. MTL is niet verantwoordelijk voor de planning van deze kleinere wagens.

3.3 Dispatch

De twee dispatchers beginnen 's ochtends rond 7u30. Ze verdelen het werk naargelang het om import of export gaat. Bij de export worden er goederen opgehaald in België om daarna vervoerd te worden naar het buitenland. Bij de import worden goederen opgehaald in het buitenland om vervolgens naar België vervoerd te worden. Binnenlands vervoer, met pickup en levering in België komt niet zo veel voor. Iedere dag worden er een 50-tal importorders en een 50-tal exportorders verwerkt.

Het aantal orders kan wel sterk verschillen per periode, vooral voor de import. De planning is een continu proces dat heel de dag verdergaat. 's Ochtends wordt eerst gekeken waar alle chauffeurs zich bevinden. Deze informatie is beschikbaar in hun IT-systeem. Daarna wordt geschat wanneer de chauffeurs hun huidige opdracht zal aflopen en ze vrij zullen zijn om een nieuwe opdracht aan te nemen. De meeste chauffeurs beginnen 's ochtends terug te werken tussen 8u en 9u. Tijdens deze periode wordt ook begonnen met het doorgeven van nieuwe opdrachten aan chauffeurs. Het is niet zo dat er een planning wordt opgesteld voor de volgende dag die dan gewoon gevolgd kan worden. 's Avonds wordt een planning opgesteld, en doorgegeven aan de chauffeurs, die ervoor zorgt dat de chauffeurs werk hebben tot de volgende ochtend. De volgende ochtend gaat het planningsproces dan gewoon verder.

In veruit de meeste gevallen (80-90%) zijn de exportorders enkele dagen op voorhand gekend. Dit betekent dat er wel mogelijkheid is om vooruit te plannen. Vooruitplannen is echter maar mogelijk tot hoogstens een dag, aangezien onvoorziene omstandigheden ervoor zorgen dat de planning aangepast moet worden. Uitzonderlijk komt er nog eens een expressorder binnen dat verwerkt moet worden binnen enkele uren. Dit is echter een kleine minderheid. Importorders zijn in het beste geval slechts 24 uur op voorhand gekend. De reden hiervoor is dat importorders slechts gezocht kunnen worden indien geweten is dat er een vrachtwagen op een bepaald tijdstip in een bepaalde regio in het buitenland zal zijn. Dus pas als er een vrachtwagen gepland staat om naar het buitenland te vertrekken, kan gezocht worden naar klanten in de buurt. Klanten in het buitenland worden op twee verschillende manieren gezocht. Er is een onlineplatform waarop gezocht kan worden naar een lading op basis van de regio, de lengte van de lading, het gewicht, etc. Hiernaast wordt er ook gebeld naar 'vaste' klanten in het buitenland. Dit zijn dan klanten waarvoor MTL al eerder opdrachten heeft uitgevoerd en waarmee ze een relatie trachten op te bouwen. Op de import wordt zo goed als geen winst gemaakt. De import wordt dus enkel gedaan zodat MTL geen vrachtwagen leeg moet terugsturen vanuit het buitenland.

De afstand tussen de pickup en leverplaats bedraagt gemiddeld 300 tot 400 kilometer. Er wordt geprobeerd om het aantal lege kilometers tot een minimum te beperken. Dit betekent dat een chauffeur die zonet zijn lading gelost heeft een nieuwe opdracht zal krijgen die redelijk dicht in de buurt ligt. Een nieuwe pickup kan meestal gevonden worden binnen 50 kilometer van de laatst bezochte leverplaats. Naast het vermijden van lege kilometers kijkt men ook naar hoelang de chauffeur nog van dienst zal zijn en waar deze zijn weekend doorbrengt. Zo zijn er bijvoorbeeld heel wat Poolse chauffeurs die om de vijf weken terug naar Polen gaan. Tegen het einde van deze vijf weken zal een Poolse chauffeur dus geen opdracht meer toegewezen krijgen waarvoor hij bijvoorbeeld naar Zuid-Frankrijk moet rijden. Het is belangrijk dat zij op tijd naar huis kunnen gaan. Hiernaast hebben veel chauffeurs een vaste routine wat betreft hun opdrachten. Zo zijn er chauffeurs die bijna iedere dag dezelfde leveringen voor bepaalde klanten uitvoeren. Er wordt dan ook geprobeerd om deze chauffeurs aan deze opdrachten toe te wijzen ook als het soms voordeliger kan zijn om iemand anders deze opdracht te geven.

Een manier om minder kilometers te rijden is het samenvoegen van verschillende orders in één vrachtwagen. Indien de leverplaatsen van twee orders vrij dicht in de buurt liggen kan dit voordelig zijn. Voorlopig gebeurt dit echter nog niet zoveel. Geschat wordt dat bij de export slechts een kleine

5% van de ritten goederen van meerdere orders in de vrachtwagens zit. Om gemixte orders mogelijk te maken moet niet alleen de locaties van de twee leveringen goed uitkomen, maar ook de eigenschappen van de twee orders. Zo moet het samengestelde gewicht en de afmetingen nog in de vrachtwagen passen. Ook bij de import wordt er zeer weinig gewerkt met bijladingen. De belangrijkste reden hiervoor is dat MTL de wagens zo snel mogelijk terug nodig heeft in België aangezien ze eigenlijk met een capaciteitstekort kampen. Indien er ladingen gecombineerd gaan worden gaat er tijd verloren worden door het extra laden en lossen waardoor de vrachtwagens nog later in België terug zijn en zo te laat gaan zijn bij andere klanten. Ook voor de chauffeurs is een bijlading niet interessant want voor hen betekent dit dubbel werk. Een bijlading betekent wel dat MTL twee keer betaald wordt voor dezelfde rit dus het is iets waar wel naartoe gestreefd wordt indien de capaciteit het toelaat. In de praktijk is een bijlading eerder nog uitzonderlijk.

3.4 Besluit

Uit al deze punten waarmee rekening wordt gehouden blijkt dat een simpel rittenplanningsalgoritme niet in staat zal zijn om een grote meerwaarde te betekenen voor de planners van MTL. Opdrachten moeten doorgegeven worden aan de chauffeurs wanneer zij vrijkomen voor een nieuwe opdracht. Men kan niet 's ochtends al het programma laten lopen dat de volledige planning voor die dag opstelt omdat er te veel variabelen in het spel zijn zoals files, ongevallen, ziekte van chauffeur, etc. en er telkens nieuwe orders binnenkomen. Het planningsalgoritme gaat gekenmerkt worden door de volgende factoren:

- Er moet met minstens een 75-tal wagens gewerkt kunnen worden;
- Een 100-tal orders moeten per dag verwerkt kunnen worden;
- Er wordt nooit vanuit een depot vertrokken;
- Chauffeurs moeten soms uitgesloten kunnen worden voor bepaalde opdrachten (Poolse chauffeurs die terug naar huis gaan, persoonlijke redenen, ...);
- Bepaalde chauffeurs komen eerder in aanmerking voor bepaalde opdrachten (chauffeurs met een vaste routine);
- Orders moeten samengevoegd kunnen worden;
- Het algoritme moet snel voor een nieuwe oplossing kunnen zorgen bij veranderende omstandigheden, deze oplossing moet niet optimaal zijn maar wel goed;
- De rij- en rusttijden moeten gerespecteerd kunnen worden;
- Er moet onderscheid gemaakt kunnen worden tussen de vrachtwagens naargelang hun laadcapaciteit.
- De tijdsvensters van de klanten moeten gerespecteerd worden

De belangrijkste doelstelling van het planningsalgoritme zijn de volgende:

- Beperken van het aantal lege kilometers;
- Voldoen aan zoveel mogelijk klantaanvragen;
- Chauffeurs willen zolang mogelijk werken;

Zoals al eerder beschreven in de literatuurstudie bestaan er zeer veel verschillende soorten VRPs. De verschillende karakteristieken van iedere bepaalde soort kunnen te maken hebben met het type van transportvraag, de verschillende beperkingen waarmee rekening moet worden gehouden, de doelfunctie, etc.

Uitgaande van deze kenmerken kan er besloten worden dat het bij MTL vooral gaat om **Point-to-Point Transportation**. Bij point-to-point transport bestaan de klantaanvragen uit vervoeren van goederen tussen twee bepaalde locaties. In het algemeen, en ook zo bij MTL, is geen van deze locaties een depot (Toth en Vigo, 2014). In de context van goederentransport wordt dit probleem een **pickup-and-delivery probleem** (met tijdsvensters) genoemd . In de volgende sectie wordt het pickup-and-delivery probleem nader besproken. Eerst worden theoretische problemen en oplossingen besproken. Daarna wordt er overgegaan tot een bespreking van oplossingen voor problemen in de praktijk.

4. Pickup-and-delivery probleem

De pickup-and-delivery problemen (PDPs) zijn een belangrijke familie van rittenplannings-problemen waarbij goederen en passagiers vervoerd moeten worden van verschillende plaatsen naar verschillende bestemmingen. PDPs kunnen ingedeeld worden op verschillende manieren. Een mogelijke indeling is deze op basis van het type vraag. In *Many-to-Many* problemen heeft ieder goed meerdere oorsprongen en bestemmingen en iedere locatie mag de oorsprong en bestemming zijn van meerdere goederen. Deze problemen doen zich voor bij de voorraadaanvulling van winkels bijvoorbeeld. Bij *one-to-many-to-one* problemen zijn er goederen die geleverd moeten worden van een depot naar klanten en andere goederen die moeten opgehaald worden bij klanten om vervolgens vervoerd te worden naar een depot. Dit doet zich bijvoorbeeld voor bij een brouwerij die volle flessen levert aan klanten en later de lege flessen weer komt ophalen. Bij *one-to-one* problemen heeft ieder goed één enkele oorsprong en een enkele bestemming (Toth & Vigo, 2014).

Veruit de meeste opdrachten van MTL vallen in de categorie van *one-to-one* problemen. Hieronder worden *one-to-one* problemen verder besproken. Daarna wordt de dynamische variant van dit soort problemen besproken.

4.1 One-to-one problemen

Bij *one-to-one* problemen maakt de literatuur een onderscheid tussen de problemen waarbij er één voertuig is en deze waar er meerdere voertuigen zijn. Omdat MTL beschikt over meerdere voertuigen wordt hier enkel de situatie met meerdere voertuigen besproken.

Het PDP met tijdsvensters vereist dat een groep voertuigen voldoet aan een collectie van klantaanvragen. Iedere klantaanvraag heeft nood aan één voertuig dat een hoeveelheid goederen komt ophalen om deze vervolgens op een bepaalde locatie te gaan afleveren. Aan alle aanvragen moet voldaan worden zonder de capaciteit van het voertuig te overschrijden en zonder de tijdsvensters, die aangegeven worden door de klant, te overschrijden (Nanry et al., 2000).

Aangezien de grootteorde van problemen die opgelost kunnen worden door exacte methodes redelijk klein is zijn er heuristieken ontwikkeld die niet als doel hebben om een globaal optimum te vinden maar wel om een bijna-optimale oplossing te vinden (Nanry et al., 2000).

4.2 Dynamische problemen

De meeste algoritmes die het PDP met tijdsvensters beschrijven bespreken de statische variant van het probleem. Bij de statische variant zijn alle aanvragen op voorhand gekend; dus voordat het algoritme begint te zoeken naar een oplossing. In tegenstelling tot de statische variant zijn bij de dynamische variant van het probleem nog niet alle klantaanvragen bekend (Toth & Vigo, 2014). De oplossing van een dynamisch probleem is geen statische output, maar een oplossingsstrategie die de nieuwe informatie gebruikt om te zeggen welke acties moeten uitgevoerd worden met verloop van tijd (Berbeglia et al., 2010).

Savelsbergh et al. (1998) hebben een optimalisatie algoritme in de praktijk toegepast. Dit deden ze bij het bedrijf 'Van Gend and Loos' (ondertussen overgenomen door DHL). Dit bedrijf was toen het grootste bedrijf in de Benelux op vlak van wegtransport. Het beschikte over ongeveer 1.400

voertuigen die 160.000 pakketjes per dag transporteerden tussen duizenden zenders en ontvangers. Hun planningsmodule heet DRIVE en is gebaseerd op een branch-and-price algoritme. Het algoritme werd getest over tien dagen met meer dan 200 actieve klantaanvragen op ieder moment. Wanneer er een groot aantal klantaanvragen waren was de oplossing van het algoritme beter dan die van de planners (Berbeglia et al., 2010).

Mitrovic-Minic et al. (2004) focusten in hun paper op het feit dat bij dynamische problemen, informatie pas na verloop van tijd beschikbaar wordt. Beslissingen die waren genomen op een eerder moment in de planningshorizon kunnen een invloed uitoefenen op de mogelijkheid van de planner om op een later moment goede beslissingen te nemen (Mitrovic-Minic et al., 2004). Oplossingsmethoden voor dynamische problemen moeten dus de mogelijkheid hebben om een eerder opgemaakte planning aan te passen (Mitrovic-Minic et al. 2004). In een andere paper presenteren Mitrovic-Minic et al. (2004) vier wachtstrategieën voor het dynamische PDP met tijdsvensters. Door de aanwezigheid van tijdsvensters moeten voertuigen soms wachten op verschillende locaties op hun routes. Het efficiënt verdelen van deze wachttijden kan een invloed hebben op de kwaliteit van de oplossing. De twee simpelste wachtstrategieën zijn de *drive-first* en de *wait-first* strategieën. Bij de *drive-first* strategie gaat een voertuig vertrekken naar een volgende locatie van zo snel dit mogelijk is. Bij de *wait-first* strategie gaat een voertuig pas vertrekken naar de volgende locatie wanneer dit voertuig moet vertrekken van zijn huidige locatie. De *wait-first* strategie zorgt voor kortere routes omdat er meer routes bekend zijn indien gewacht wordt met vertrekken dan wanneer er zo snel mogelijk wordt vertrokken. Hierdoor kunnen routes beter geoptimaliseerd worden. De *wait-first* strategie gebruikt wel een veel groter aantal voertuigen dan de *drive-first* strategie.

Gendreau et al. (2006) stelden een neighborhood search heuristiek voor, voor het plannen van routes voor voertuigen waarbij de klantaanvragen met een pickup- en leveringsplaats in real-time binnenkwamen. Zij toonden aan dat zowel de *adaptive descent* als de *tabu search* heuristieken nuttig kunnen zijn in complexe dynamische omgevingen. Zoals bijvoorbeeld bij lokale pickup-and-delivery diensten. Mits voldoende rekenkracht zorgden ze voor betere resultaten dan simpelere heuristieken (Gendreau et al., 2006). Deze resultaten werden wel bekomen onder sterk vereenvoudigde voorwaarden waardoor de resultaten nog ver verwijderd zijn van de praktijk. (Gendreau et al., 2006). Gendreau et al. (2006) gebruikten een *neighbourhood structure* gebaseerd op *ejection chains*. Er werd geen stochastische informatie over inkomende aanvragen verondersteld. Een aanpasbaar geheugen wordt gebruikt om een set van goede oplossingen voor de voertuigen te behouden. Om snel ten minste één goede nieuwe oplossing te produceren wanneer een nieuwe aanvraag binnenkomt, wordt de aanvraag in iedere oplossing in het aanpasbare geheugen ingevoerd via de *cheapest insertion* methode. De beste oplossing wordt geselecteerd aan de hand van een *snelle local search* procedure gebaseerd op *ejection chains*. Het aanpasbare geheugen wordt ook ge-update wanneer aan een aanvraag voldaan is. Zolang als er geen binnenkomende aanvragen zijn en er niet aan een aanvraag voldaan is, blijft de *tabu search* heuristiek verder zoeken in een poging om de bestaande routes te verbeteren (Berbeglia et al., 2010).

4.3 Relevante beperkingen

Voor de doelfunctie kan opgesteld worden moeten eerst de beperkingen waarmee rekening moet worden gehouden bekend zijn. Relevante beperkingen kunnen sterk verschillen tussen verschillende VRPs.

Beperkingen kunnen opgesplitst worden in twee groepen. De beperkingen waaraan moet voldaan worden om een oplossing te krijgen worden in de literatuur *hard constraints* (harde beperkingen) genoemd. Indien er niet voldaan is aan één of meer harde beperkingen is het geen geldige oplossing. Daarnaast zijn er ook nog de *soft constraints* (zachte beperkingen). Dit zijn beperkingen waaraan niet voldaan moet zijn maar die wel tot een betere oplossing leiden indien ze vervuld zijn. Hieronder worden de beperkingen besproken die van toepassing zijn bij de routeplanning van MTL.

4.3.1 Laadbeperkingen

Een eerste harde beperking is dat de goederen die opgehaald moeten worden nog moeten passen in de vrachtwagen die de goederen gaat ophalen. Deze beperking wordt de laadbeperking genoemd. Door deze beperking te negeren kan het zijn dat er last-minute veranderingen in de planning moeten aangebracht worden wat zorgt voor extra kosten. Om tot een efficiënte routeplanning te komen moet er dus rekening gehouden worden met deze laadbeperkingen (Pollaris et al., 2015). De inhoud van een trailer verandert iedere keer dat een lading wordt opgehaald of afgeleverd wat het noodzakelijk maakt dat de resterende ruimte wordt bijgehouden tijdens de rit en niet alleen bij de opmaak van de planning (Pollaris et al., 2015).

Pollaris et al. (2015) geven een overzicht van de bestaande literatuur over laadbeperkingen in VRPs. Zij verdelen de artikelen in categorieën op basis van het type routeprobleem en de laadbeperkingen waarmee rekening wordt gehouden. Dit leidt tot de volgende categorieën, de Engelse benaming wordt gebruikt:

- Two-dimensional loading CVRP (2L-CVRP)
- Three-dimensional loading CVRP (3L-CVRP)
- Multi-pile VRP
- Multi-compartments VRP
- Minimum multiple trip VRP (MMTVRP- with incompatible commodities)
- Traveling salesman with pickup-and-deliveries (TSPPD) with LIFO/FIFO constraints
- Double TSP with pickups and deliveries with multiple stacks (DTSPMS)
- Vehicle routing problem with pickups and deliveries (VRPPD) with additional loading constraints

Hieronder worden kort de voor MTL relevante categorieën verklaard.

Bij 2L-CVRP worden de klantaanvragen en de afmetingen van de voertuigen uitgedrukt in twee dimensies. Meestal worden de breedte en de lengte gebruikt maar wordt de hoogte buiten beschouwing gelaten. Dit probleem doet zich in de praktijk voor wanneer goederen niet op elkaar gestapeld mogen worden omwille van hun gewicht of breekbaarheid (Pollaris et al., 2015).

Bij 3L-CVRP wordt er rekening gehouden met de drie dimensies van zowel het voertuig als de te vervoeren goederen. Naast de breedte en de lengte wordt hier dus ook rekening gehouden met de hoogte. Dit komt voor in sectoren waarbij goederen wel op elkaar gestapeld mogen worden (Pollaris et al., 2015).

Bij het Multi-compartments VRP kunnen voertuigen met meerdere compartimenten heterogene producten vervoeren in verschillende compartimenten van hetzelfde voertuig. Een compartiment is soms niet compatibel met ieder type van product en bepaalde paren van producten kunnen niet samen in hetzelfde compartiment geladen worden (Pollaris et al., 2015).

In een VRPPD kunnen items zowel afgehaald als geleverd worden bij klanten in tegenstelling tot het gewone VRP waarbij items alleen geleverd kunnen worden bij klanten. In het TSPPD moet één route gemaakt worden. Het TSPPD doet zich onder meer voor bij less-than-truckload transportation. De artikelen over het TSPPD gaan allemaal uit van één-dimensionale lading aldus Pollaris et al. (2015). Dit betekent dat het bij de laadbepaling gaat om een LIFO- of FIFO-bepaling (Pollaris et al., 2015).

Bij het DTSPMS wordt het ophalen en leveren van de goederen uitgevoerd in twee verschillende netwerken. Alle goederen worden eerst opgehaald voor de leveringen beginnen. De goederen kunnen niet herschikt worden of verticaal gestapeld. De goederen worden geplaatst in horizontale rijen en iedere rij volgt het LIFO-principe (Pollaris et al., 2015).

De literatuur omtrent VRPPD met bijkomende laadbepalingen is eerder beperkt. Pollaris et al. (2015) vonden slechts zeven artikelen voor pickup-and-delivery problemen met meerdere voertuigen en laadbepalingen. Vijf van deze papers bekeken de situatie met één-dimensionale ladingen. Het VRPPD met meerdere voertuigen is een veralgemening van het TSPPD. Hierdoor kunnen alle toepassingen van het TSPPD gezien worden als een VRPPD met de mogelijkheid om gebruik te maken van meerdere voertuigen, wat vaak voorkomt in de praktijk (Pollaris et al., 2015).

Slechts een beperkt aantal papers geven een wiskundige formulering. Een verklaring hiervoor kan zijn dat laadbepalingen ervoor zorgen dat de probleemstelling veel complexer wordt. Hiernaast gaat het meestal ook om heuristische die niet noodzakelijk een probleemstelling nodig hebben (Pollaris et al., 2015). In de meeste modellen wordt de laadbepaling behandeld als een deelprobleem van het routing model. Eerst worden oplossingen voor de het routeprobleem berekend en daarna wordt gekeken of er aan de laadbepalingen is voldaan. Aangezien laadbepalingen vaak complex kunnen zijn kan er veel tijd bespaard worden door enkel de beste oplossingen van het routemodel na te gaan (Pollaris et al., 2015).

Momenteel gebeurt de toewijzing van ladingen aan de verschillende vrachtwagens van MTL volledig manueel. Hiervoor wordt gerekend op de ervaring van de planners, die weten hoeveel plaats er is in iedere vrachtwagen. Wat betreft de soort van de te vervoeren goederen gaat het bij de import voornamelijk om palletten en bij het binnenlands transport voornamelijk om zwaar metaal. De huidige verdeling van goederen is hoogstwaarschijnlijk niet optimaal. Een planningsalgoritme dat rekening houdt met laadbepalingen zal waarschijnlijk zorgen voor een verbeterde planning. Zoals echter aangegeven is het invoeren van een laadbepaling niet vanzelfsprekend. Indien MTL rekening wil houden met een laadbepaling is het aangewezen om deze laadbepaling als een deelprobleem te beschouwen en niet rechtstreeks te integreren in het planningsalgoritme

4.3.2 Rij- en rusttijden

In een poging de ongevallen door vermoeidheid van vrachtwagenchauffeurs te verminderen is er sinds 2007 een nieuwe wetgeving van toepassing in Europa die de rij- en rusttijden van vrachtwagenchauffeurs regelt. Op de website van de FOD Mobiliteit staat volgende informatie:

De bepalingen van verordening (EG) nr. 561/2006 inzake rij- en rusttijden in het wegvervoer zijn van toepassing op ieder verplaatsing die geheel of gedeeltelijk plaatsvindt op wegen die voor openbaar gebruik toegankelijk zijn, zowel in lege als in geladen toestand met een voertuig bestemd voor:

- *Vervoer van goederen waarbij de toegestane maximummassa van de voertuigen, aanhangwagens en opleggers inbegrepen, meer dan 3,5 ton bedraagt;*
- *Vervoer van personen door voertuigen die zijn gebouwd of permanent zijn toegerust om meer dan 9 personen, bestuurder inbegrepen, te kunnen vervoeren en daartoe bestemd zijn.*

Deze verordening is van toepassing op wegvervoer dat plaatsvindt binnen de EU en tussen de EU-lidstaten, Zwitserland en de landen van de Europese Economische ruimte. Aangezien MTL enkel goederen binnen Europa vervoert zijn zij verplicht om deze regelgeving na te volgen. Samengevat zijn de regels inzake rij- en rusttijden als volgt:

- Een maximale dagelijkse rijtijd van 9 uur, die maximaal 2 keer per week kan worden verlengd tot 10 uur;
- Een maximale wekelijkse rijtijd van 56 uur;
- Een maximale totale rijtijd gedurende twee opeenvolgende weken van 90 uur;
- Na een rijperiode van 4,5 uur moet een bestuurder een aaneengesloten onderbreking nemen van tenminste 45 minuten, tenzij hij een rusttijd neemt;
- Een minimale dagelijkse rusttijd van 11 uur, die niet meer dan 3 keer per week mag worden verkort tot 9 uur;
- Een regelmatige wekelijkse rusttijd van minimaal 45 uur en een verkorte wekelijkse rusttijd van minimaal 24 uur.

Het negeren van de wetgeving bij het opstellen van de planning en rijtijden van de chauffeurs kan leiden tot overtredingen of leveringen die te laat aankomen omdat er onvoorziene rustpauzes ingelast moeten worden (Goel, 2010). Hiernaast staan er ook zware boetes op het negeren van de verplichte rusttijden. Bedrijven hebben er dus alle baat bij om rekening te houden met de wetgeving (Goel, 2010).

Kok et al. (2010) stellen een dynamic programming heuristiek voor om rekening te houden met deze regelgeving bij het plannen van de routes. In tegenstelling tot eerdere artikels houden Kok et al. (2010) rekening met de volledige Europese regelgeving bij het opstellen van de routes. Kok et al. (2010) tonen aan dat hun methode zorgt voor een vermindering van het aantal benodigde voertuigen en een vermindering van het gemiddeld aantal gereden kilometers in vergelijking met andere methodes die rekening houden met de wetgeving. Hiernaast tonen Kok et al. (2010) ook aan dat de aangepaste regelgeving, die genegeerd wordt in andere methodes, ook een significante impact heeft op de oplossing. Deze speciale wetgeving moet daarom mee in rekening worden gebracht bij het

opstellen van de routes. De methode van Kok et al. (2010) houdt rekening met de volledige wetgeving maar ze kan niet garanderen dat ze een planning kan opstellen voor een route indien zo een planning bestaat (Goel, 2010). Goel (2010) daarentegen stelt een methode voor die gegarandeerd een planning kan opstellen voor de chauffeurs die rekening houdt met de wetgeving indien zo een planning bestaat.

De mogelijkheid om een planning te vinden die aan de regelgeving voldoet, indien zo een planning bestaat, is belangrijk om verschillende redenen (Goel, 2010). Het plannen van de rij- en rusttijden van de chauffeurs is een deelprobleem van de eigenlijke rittenplanning. Vaak is de manier om een VRP op te lossen een local search-based optimalisatie methode, die een reeks van mogelijke routes voor ieder voertuig plant tot er een goede oplossing is gevonden. Zonder een goede manier om de rij- en rusttijden van de chauffeurs te plannen zullen veel routes niet in aanmerking komen in het optimalisatieproces omdat er geen planning voor de chauffeurs voor kan worden gevonden (Goel, 2010). Een deel van de oplossingsruimte zal dus nooit onderzocht worden wat leidt tot een vermindering in de prestatie van het optimalisatieproces (Goel, 2010).

Een andere reden is dat indien een planningsalgoritme geen planning kan vinden die rekening houdt met de wetgeving, ondanks het feit dat zo een planning bestaat, gaan ervaren menselijke planners makkelijk manueel een betere oplossing te vinden. Als gevolg hiervan gaat het planningsalgoritme, en bij uitbreiding de gehele VRP-software, in vraag gesteld worden door de menselijke planner. Zo een systeem kan niet succesvol zijn in de praktijk (Goel, 2010). De methode van Goel (2010), die gegarandeerd een planning kan opstellen die rekening houdt met de wetgeving indien zo een planning bestaat, kan geïmplementeerd worden in andere optimalisatiemethodes voor rittenplanning.

De huidige planning gebeurt bij MTL volledig manueel. Er is wel software beschikbaar die aangeeft hoeveel iedere chauffeur nog mag rijden maar de toewijzing van opdrachten aan chauffeurs is volledig afhankelijk van de ervaring van de planners. Het kan daarom goed zijn dat de planning momenteel ver van optimaal is. Een goede rittenplanningsmethode gecombineerd met een methode die nagaat of de wetgeving wordt nageleefd zoals die van Kok et al. (2010) of Goel (2010) kan zorgen voor een optimalisatie van de rittenplanning.

4.3.3 Tijdvensters

Een derde relevante beperking zijn de tijdsvensteren waarin MTL goederen kan ophalen of afleveren bij klanten. Hier kan een onderscheid gemaakt worden tussen harde en zachte tijdsvensteren. De harde tijdsvensteren zijn vast, wat betekent dat er enkel goederen geleverd of opgehaald kunnen worden binnen dit tijdsvenster. Zachte tijdsvensteren zijn eerder een indicatie dan een verplichting. Er kunnen goederen opgehaald en geleverd worden buiten deze zachte tijdsvensteren maar indien mogelijk moeten de vrachtwagens bij de klant aanwezig zijn binnen deze tijdsvensteren. Een tweede praktisch onderscheid kan gemaakt worden tussen ruime en smalle tijdsvensteren. Smalle tijdsvensteren zijn de tijdsvensteren die klein zijn in vergelijking met de planningshorizon. Dit is bijvoorbeeld een tijdsvenster van 30 min indien er gepland wordt voor één werkweek. Ruime tijdsvensteren daarentegen zijn groter en zijn dus makkelijker in te plannen.

Éen van de eerste heuristieken voor het PDP met tijdsvensters werd beschreven door Nanry & Barnes (2000) (Toth & Vigo, 2014). Nanry & Barnes (2000) stellen een *reactive tabu search* heuristiek voor. Het probleem dat zij aankaarten is dat waar aan een aantal klantaanvragen voldaan moet worden door een groep van voertuigen die zich allemaal een depot bevinden; een situatie vergelijkbaar met die van MTL. Ieder klantaanvraag bestaat uit het ophalen van een goed op een bepaalde plaats tijdens het vastgelegde tijdsvensters en het leveren aan een locatie tijdens een ander vastgelegd tijdsvenster. Iedere route moet uiteraard ook voldoen aan de *coupling* beperking, dat wil zeggen, de levering moet gebeuren door hetzelfde voertuig dat de pickup heeft uitgevoerd. Hun methode werd later verbeterd door Lau et al. (2002) (Toth & Vigo, 2014).

Ropke et al. (2006) presenteerden een heuristiek die gebaseerd was op een uitbreiding van de large neighbourhood search heuristiek. De heuristiek bestaat uit een aantal subheuristieken die worden gebruikt naargelang hun historische performantie. De methode wordt *adaptive large neighbourhood search* genoemd. De heuristiek werd getest op 350 problemen die tot 500 aanvragen hadden. Ze waren in staat om de best bekende oplossingen uit de literatuur te verbeteren voor meer dan 50% van de problemen (Ropke et al., 2006). Hun resultaten toonden aan dat het voordelig kan zijn om verschillende concurrerende subheuristieken te gebruiken in plaats van slechts één.

Éen van de best presterende metaheuristieken is deze van Bent & Van Hentenryck (2006) (Toth & Vigo, 2014). In hun paper bespreken zij een *two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery with multiple vehicles and time windows*. Dit algoritme minimaliseert het aantal voertuigen door middel van simulated annealing in een eerste fase en minimaliseert de reiskost door middel van large neighbourhood search in een tweede fase. Hun experimentale resultaten bevestigden de effectiviteit van hun methode (Bent et al., 2006).

MTL moet bij iedere aanvraag die ze krijgen voldoen aan een tijdsvenster. Deze kunnen wel sterk verschillen naargelang het om ruime dan wel smalle tijdsvensters gaat. Voor heel wat 'vaste' klanten is het tijdsvenster heel breed en kan er de hele werkweek geladen en gelost worden. Echter sporadisch komen er ook opdrachten binnen die een smaller tijdsvenster hebben. Dit maakt het noodzakelijk dat de methode die voor MTL ontwikkeld wordt in staat is om met tijdsvensters rekening te houden.

4.4 Doelfunctie

De doelfunctie bepaalt wat het algoritme gaat proberen te minimaliseren of maximaliseren. Bij een VRP kan dit gaan om meerdere factoren die geminimaliseerd of gemaximaliseerd moeten worden. Verschillende papers gebruiken verschillende doelfuncties en gaan dus verschillende factoren proberen te optimaliseren. Zo gaan Bent et al. (2006) de optimalisatie van de routes opsplitsen in twee fases. In een eerste fase gaat hun algoritme het aantal routes minimaliseren. Dit komt er op neer dat er zo weinig mogelijk voertuigen gebruikt gaan worden. In een tweede fase gaan dan de routekosten geminimaliseerd worden. Gendreau et al. (2006) gaan voor een trade-off tussen de werkingskosten (totale rijtijd, overuren) en klanttevredenheid (de mate waarin voldaan wordt aan tijdsvensters). Hun doelfunctie is een gewogen som van drie factoren die geminimaliseerd moet worden. Deze drie factoren zijn: de totale rijtijd, de som van de 'laattijdigheid' over alle pick-up en leveringslocaties en de som van alle overuren van alle voertuigen. Lau et al. (2002) gaan twee

factoren minimaliseren. Het aantal gebruikte voertuigen, wat volgens hen meestal het grootste gedeelte van de kost is, en de totale afgelegde afstand van alle voertuigen samen. Er zijn echter ook simpelere doelfuncties die maar één factor proberen te optimaliseren. Een voorbeeld hiervan is de doelfunctie van Mitrovic-Minic et al. (2004). Zij gaan enkel proberen om de totale afgelegde afstand te minimaliseren.

Wat vooral belangrijk is voor MTL is dat de kosten geminimaliseerd worden maar er toch nog aan de wettelijke voorwaarden zoals de rij- en rusttijden en de eisen van de klant wordt voldaan. Om de kosten te drukken gaf MTL zelf al aan dat ze proberen om de inzet van de vloot te optimaliseren. Dit wil zeggen, minder kilometers rijden met lege vrachtwagens en minder afgelegde kilometers in het totaal. Er gaat enkel geprobeerd worden om het aantal afgelegde kilometers te minimaliseren en te voldoen aan de tijdsvensters.

5. Rittenplanningsalgoritme: constructieheuristiek

In deze sectie wordt de heuristiek om het *pickup-and-delivery problem with time windows* op te lossen uitgelegd. Eerst wordt de keuze voor de heuristiek verantwoord, hierna volgt een opsomming van de factoren waarmee de methode rekening houdt. Na deze korte inleiding wordt een eerste theoretisch voorbeeld uitgewerkt met een versimpelde versie van de methode om de basiswerking aan te tonen. Na dit voorbeeld wordt de volledige heuristiek uitgelegd. De volledige heuristiek wordt dan verschillende keren toegepast op een nieuw voorbeeld om aan te tonen wat de invloed is van de verschillende variabelen waarvan de heuristiek gebruik maakt. Tenslotte worden enkele nadelen van de methode besproken. Het hoofdstuk hierna probeert deze nadelen te verminderen door aanpassingen voor te stellen.

5.1 Nearest Neighbour zonder tijdvensters

Het rittenplanningsalgoritme is de nearest neighbour (NN) heuristiek. NN gaat vrije vrachtwagens doorsturen naar de dichtstbijzijnde beschikbare klant. Indien een klant momenteel bediend wordt, of een andere wagen al onderweg is naar deze klant, is deze klant niet meer beschikbaar voor andere wagens. Dit proces gaat door tot alle klanten bediend zijn. Om in de praktijk toepasbaar te zijn zal de NN-heuristiek op zijn minst in staat moeten zijn om rekening te houden met tijdvensters van klanten. Deze toevoeging maakt de heuristiek een stuk ingewikkelder. Het is niet langer zo dat een vrijgekomen vrachtwagen zomaar kan doorgestuurd worden naar de dichtstbijzijnde klant. Er moet nu rekening gehouden worden met de tijdvensters van alle klanten voor er een beslissing genomen kan worden.

Voor deze methode geldt dat een vrachtwagen onmiddellijk van de pickupplaats van een klant gaat dorrijden naar de leverlocatie van diezelfde klant. Het is dus niet mogelijk om goederen van verschillende klanten eerst op te halen om dan vervolgens naar de leverlocaties van deze klanten te rijden. De levering moet onmiddellijk na de pickup gebeuren.

De reden dat de NN methode gebruikt wordt en niet een andere methode die besproken werd in de literatuurstudie is dat NN een simpele methode is die toch vaak een goede oplossing gaat genereren. Omdat het om een relatief simpele methode gaat is het makkelijker om de methode aan te passen zodat deze met meerdere factoren en beperkingen rekening kan gaan houden. Dit is in tegenstelling tot andere methodes die al heel ingewikkeld zijn om een probleem met een klein aantal beperkingen op te lossen.

In de praktijk moet er ook met andere factoren en beperkingen naast de tijdvensters van de klanten rekening gehouden worden. Twee van de belangrijkste zijn onder meer de laadcapaciteiten, die kunnen verschillen tussen de vrachtwagens onderling, en de rij- en rusttijden van de chauffeurs. Met de rij- en rusttijden wordt in deze masterproef geen rekening gehouden. Met de laadcapaciteit van de vrachtwagens kan de methode wel rekening houden. In die zin dat de methode verschillende keren toegepast kan worden voor verschillende soorten vrachtwagens.

De belangrijkste doelstelling van MTL is een optimalisatie van de ritten. Dit is een tweeledige optimalisatie. Er wordt getracht om het aantal lege kilometers te beperken maar tegelijkertijd wordt er ook geprobeerd om zoveel mogelijk klanten te bedienen. Deze twee doelen kunnen in veel gevallen

tegenstrijdig zijn met elkaar. Bij MTL is het echter zo dat ze in de eerste plaats aan zoveel mogelijk klantaanvragen proberen te voldoen mits ze er de juiste prijs voor krijgen. Dit betekent dat indien een order wordt toegevoegd in de database, MTL heeft besloten dat het voor hun winstgevend is om deze klant te bedienen. Om die reden zal een oplossing die meer klanten bedient de voorkeur krijgen op een oplossing die minder klanten bedient en minder lege kilometers rijdt. Hierbij moet ook gezegd worden dat de oplossing van de heuristiek nog altijd maar een suggestie is en dat de dispatchers uiteindelijk nog aanpassingen kunnen doen of een oplossing in zijn geheel verwerpen. Ook, zoals hieronder zal blijken, kunnen de variabelen van de heuristiek verschillende waardes krijgen wat voor verschillende oplossingen gaat zorgen. Uit deze oplossingen kunnen de dispatchers dan de beste oplossing kiezen om mee verder te werken.

Het eerste voorbeeld hieronder met 4 chauffeurs en 10 klanten wordt uitgewerkt zonder rekening te houden met tijdsvensters. Daarna wordt de volledige methode uitgelegd en wordt er wel met tijdsvenster van klanten rekening gehouden. Vervolgens wordt gekeken hoe dit de routes van de vrachtwagens kan beïnvloeden.

5.1.1 Voorbeeld zonder tijdsvensters

Om de werking van het algoritme te verduidelijken volgt hier een kort fictief voorbeeld. In dit voorbeeld zijn er 4 chauffeurs die 10 verschillende klanten moeten bedienen. De klanten evenals de leverplaatsen van deze klanten bevinden zich allemaal op verschillende locaties.

Al de klantaanvragen zijn op voorhand bekend. Wat het een volledig statisch probleem maakt. Met tijdsvensters wordt er nog geen rekening gehouden. De klanten, leverplaatsen en chauffeurs bevinden zich allemaal in een Cartesiaans xy -vlak van 40-40, willekeurig verspreid. De reistijd per afstandseenheid bedraagt 1 minuut, d.w.z een chauffeur die rijdt van locatie (1,1) naar locatie (40,1) doet hier 39 minuten over. De bedientijd bij iedere klant en leverplaats bedraagt 10 minuten.

De routes worden parallel opgesteld, d.w.z. dat de chauffeurs om de beurt een nieuwe klant toegewezen krijgen van zodra ze vrij zijn. Een alternatieve manier zou zijn om de routes sequentieel te verdelen. Dit zou betekenen dat eerst een volledige route voor chauffeur A uitgestippeld zou worden, vervolgens een volledige route voor chauffeur B, enz. Het parallel verdelen van de routes heeft als voordeel dat de routes van de verschillende chauffeurs vanzelf ongeveer even groot zijn. Indien de routes sequentieel verdeeld zouden worden kan het zijn dat er op het einde niet meer genoeg klanten zijn voor de chauffeur wiens route als laatste wordt uitgestippeld. Door de routes parallel te verdelen wordt ook vermeden dat er een manier moet worden gevonden om te bepalen wanneer een route 'vol' is en aan de route van een volgende chauffeur moet worden begonnen. De startlocaties van de chauffeurs bevinden zich in tabel 2. De pickup- en leverlocaties van de tien klanten bevinden zich in respectievelijk tabel 3 en tabel 4.

Chauffeur	x	y
A	14	25
B	23	16
C	15	2
D	39	1

Tabel 2 Locaties van de vier chauffeurs voorbeeld 5.1.1

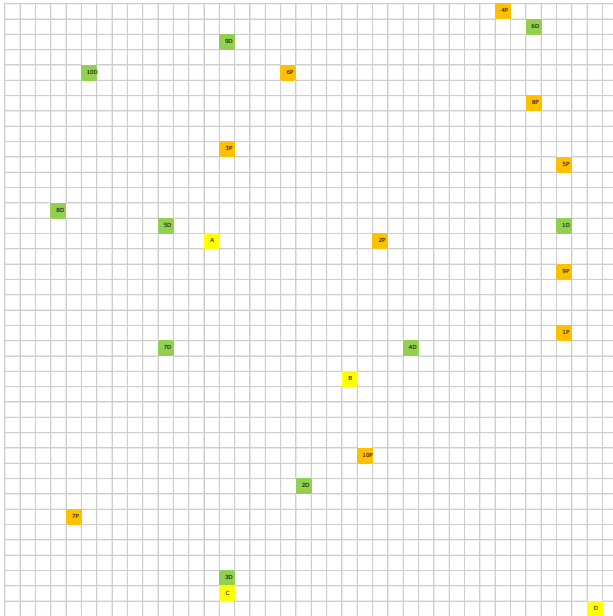
Pickup	x	y
1	37	19
2	25	25
3	15	31
4	33	40
5	37	30
6	19	36
7	5	7
8	35	34
9	37	23
10	24	11

Tabel 3 Pickuplocaties van de tien klanten voorbeeld 5.1.1

Levering	x	y
1	37	26
2	20	9
3	15	3
4	27	18
5	11	26
6	35	39
7	11	18
8	4	27
9	15	38
10	6	36

Tabel 4 Leverlocaties van de tien klanten voorbeeld 5.1.1

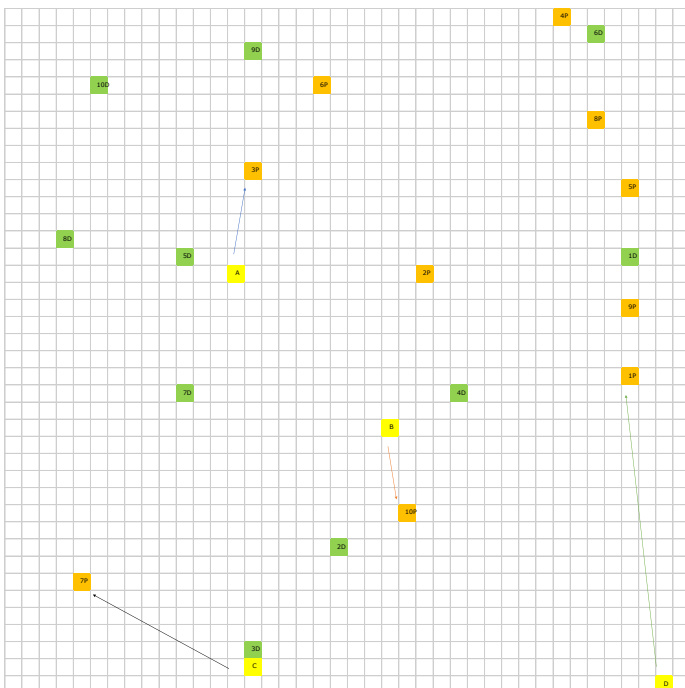
Alle chauffeurs, pickups en leveringen zijn hieronder in figuur 2 weergegeven. De chauffeurs zijn in het geel aangeduid, de pickuplocaties in het oranje en de leverlocaties in het groen. Het probleem is opgelost wanneer aan alle klantaanvragen voldaan is. Het is de bedoeling van de methode om de afgelegde afstand te minimaliseren.



Figuur 2 De locatie van ieder chauffeur, pickup- en leverplaats voorbeeld 5.1.1

In het begin, wanneer geen enkele chauffeur bezig is met een klant krijgt chauffeur A als eerste een opdracht toebedeeld, chauffeur B als tweede, enz.

Chauffeur B komt als eerste aan op zijn pickuplocatie en kan beginnen met laden. Even later komt ook chauffeur A aan op zijn pickuplocatie en begint eveneens te laden. Nog voor chauffeur B vertrekt komt ook chauffeur C aan op zijn pickuplocatie. Figuur 3 duidt de eerste klant van iedere chauffeur aan.



Figuur 3 De eerste klanten van iedere chauffeur

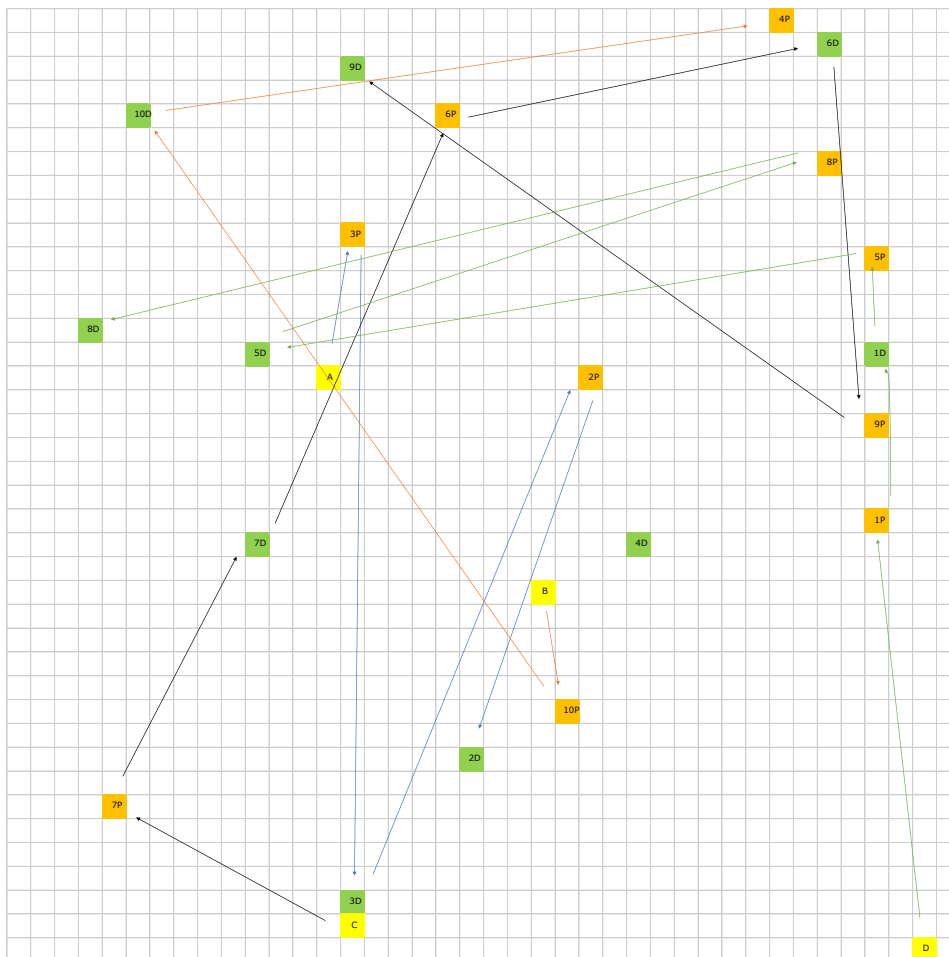
Chauffeur B is 15 minuten na de start klaar met inladen en kan vertrekken naar zijn leverlocatie. Een minuut later vertrekt ook chauffeur C naar zijn eerste leverlocatie. 18 minuten na de start komt chauffeur D aan op zijn eerste pickuplocatie. Chauffeur C is 3 minuten later klaar met inladen en vertrekt 21 minuten na de start naar zijn eerste leverlocatie. 28 minuten na de start is chauffeur D klaar om te vertrekken naar zijn eerste leverlocatie. Wanneer de chauffeurs klaar zijn met lossen wordt opnieuw gezocht naar hun dichtstbijzijnde klant. Dit proces waarbij een vrijgekomen chauffeur wordt doorgestuurd naar de dichtstbijzijnde klant gaat door totdat iedere klant bediend is.

Tabel 5 geeft de klanten weer die iedere chauffeur heeft bediend.

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	totale afstand (km)
A	3	2	-	74,1
B	10	4	-	86
C	7	6	9	102,44
D	1	5	8	112,5

Tabel 5 De bediende klanten van iedere chauffeur voorbeeld 5.1.1

De afgelegde routes zijn weergegeven in figuur 4:



Figuur 4 De route van iedere chauffeur voorbeeld 5.1.1

Het hele proces van de heuristiek is in bijlage 1 samengevat.

5.2 Nearest neighbour met tijdvensters

In deze sectie wordt de NN-heuristiek aangepast om ook met tijdvensters van klanten rekening te kunnen houden. Eerst wordt de heuristiek uitgelegd en daarna wordt de heuristiek verschillende keren toegepast met verschillende parameters op een klein theoretisch voorbeeld.

5.2.1 Methode

Om in de praktijk een meerwaarde te kunnen betekenen zal het algortime op zijn minst in staat moeten zijn om rekening te kunnen houden met de verschillende tijdvensters van klanten. Om dit te verwezenlijken gaat voor iedere klant j die aan nog geen enkele route is toegevoegd en pas vrijkomt op de leverlocatie van klant i een gewogen som, c_{ij} , worden opgesteld. De waarde van deze gewogen som hangt af van de afstand tussen punt i en de pickuplocatie van klant j en het tijdvenster van de klant. De NN-heuristiek gaat een route opstellen door te zoeken naar de klant wiens gewogen som het laagst is en aan nog geen enkele andere route is toegevoegd. De klant met de laagste gewogen som wordt dan toegevoegd aan de route van de huidige chauffeur. Dit proces wordt iedere iteratie herhaald en gaat door voor alle klanten die toegevoegd kunnen worden (rekening houdend met tijdvensters) (Solomon, 1987).

De methode die hier gebruikt gaat worden staat beschreven in Solomon (1987) en gaat als volgt. De laatste klant op de partiële route is klant i , en klant j is een onbezochte klant die potentieel bezocht kan worden. De gebruikt maatstaf, c_{ij} , meet dan de directe afstand, d_{ij} , tussen de leverlocatie van klant i en de pickuplocatie van klant j , het tijdsverschil tussen de voltooiing van de dienst (lossen) bij i en het begin van de dienst bij klant j , T_{ij} , en de urgentie van de levering aan klant j , v_{ij} , die uitgedrukt wordt als de resterende tijd tot de laatst mogelijke start van de dienst bij klant j . Wiskundig ziet dit er uit als volgt:

$$T_{ij} = b_j - (b_i + s_i),$$

$$v_{ij} = l_j - (b_i + s_i + t_{ij})$$

$$c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 v_{ij}$$

waarbij

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1 \text{ en } \delta_1, \delta_2, \delta_3 \geq 0$$

De variabele s_i is de duur van de dienst bij klant i . Het tijdvenster bij klant j wordt gekenmerkt door de starttijd e_j en de eindtijd l_j . De variabele t_{ij} is de reistijd tussen klant i en j . De variabele b_j staat voor het tijdstip waarop de dienst (laden of lossen) bij klant j kan starten. Dit betekent dat b_j afhankelijk is van e_j en dus:

$$b_j = \max\{e_j, b_i + s_i + t_{ij}\}$$

5.2.2 Interpretatie van de variabelen

Het tijdsverschil tussen de voltooiing van de dienst bij i en het begin van de dienst bij klant j , T_{ij} , kan twee verschillende waardes aannemen afhankelijk van de waarde van b_j . Indien $b_j = e_j$ betekent dit

dat de vrachtwagen die gelost heeft bij klant i niet onmiddellijk zal kunnen starten wanneer hij aankomt bij klant j omdat hij daar zal aankomen voor het tijdvenster van klant j . Hierdoor wordt:

$$T_{ij} = e_j - (b_i + s_i)$$

dit betekent dat het tijdsverschil tussen de voltooiing bij klant i en het begin van de dienst bij klant j gelijk is aan het verschil in tijd tussen het moment waarop de dienst bij klant i is afgelopen en de start van het tijdvenster bij klant j .

Indien $b_j = b_i + s_i + t_{ij}$ betekent dit dat de vrachtwagen na voltooiing van de dienst bij klant i kan doorrijden naar klant j en daar onmiddellijk kan beginnen. Concreet betekent dit dat het tijdvenster van klant j geopend zal zijn voordat de vrachtwagen bij klant j zal aankomen. Hierdoor wordt:

$$T_{ij} = b_i + s_i + t_{ij} - (b_i + s_i)$$

uitgewerkt geeft dit: $T_{ij} = t_{ij}$

het tijdsverschil tussen het moment waarop de dienst bij klant i eindigt en de dienst bij klant j begint, is de reistijd, t_{ij} , tussen klant i en j . Klanten waarvoor T_{ij} klein is zullen de voorkeur krijgen om als volgende toegevoegd te worden aan de route aangezien er dan zo weinig mogelijk tijd verloren gaat.

De vergelijking die de urgentie van de levering aan klant j weergeeft $v_{ij} = l_j - (b_i + s_i + t_{ij})$ kan ook intuïtief verklaard worden. Herinner dat l_j het laatste tijdstip weergeeft waarop de dienst bij klant j kan beginnen. De vergelijking $v_{ij} = l_j - (b_i + s_i + t_{ij})$ geeft dus eigenlijk de hoeveelheid tijd weer die nog zou over zijn om bij klant j aan te komen indien er na klant i voor gekozen wordt om te vertrekken naar klant j . Indien dit om een laag getal gaat betekent dit dat er niet veel tijd meer over is om een bezoek aan klant j uit te stellen. In dat geval zal klant j de voorkeur krijgen op andere klanten x waarvoor v_{ix} hoger is.

De vergelijking $c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 v_{ij}$ maakt dan een afweging op basis van de zojuist besproken maatstaven:

- d_{ij} : de afstand tussen klant i en klant j
- T_{ij} : het tijdsverschil tussen de voltooiing van de dienst (laden of lossen) bij klant i en het begin van de dienst bij klant j
- v_{ij} : de urgentie van de bediening bij klant j

Indien het tijdvenster van klant j nog niet gesloten is zullen deze variabelen alle drie positief zijn. Wanneer het tijdvenster van klant j gesloten is zal v_{ij} negatief zijn en zal klant j niet meer in aanmerking komen voor bediening.

De drie variabelen worden alle drie een gewicht toegewezen dat zal bepalen in hoeverre zij meebepalen wie de volgende klant wordt. Een goede start om te kijken naar de invloed van iedere maatstaf is om de extreme gevallen te bekijken waarin hun gewicht ofwel het maximum, 1, of het minimum, 0, is. Tabel 6 geeft deze extreme gevallen weer:

δ_1	δ_2	δ_3	Omschrijving
1	0	0	Een gewone NN heuristiek zonder rekening te houden met tijdvensters
0	1	0	Vrachtwagens beginnen zo snel mogelijk aan hun volgende order, zonder rekening te houden met tijdvensters
0	0	1	Er wordt telkens voldaan aan het meest dringende order, zonder rekening te houden met afstand

Tabel 6 Invloed van de gewichten

In het eerste geval is $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = 0$, en $\delta_3 = 0$. In dit geval wordt de heuristiek herleid tot een simpele NN heuristiek waarbij enkel de afstand tot de volgende klant de bepalende factor wordt. Met tijdvensters wordt er in dat geval geen rekening gehouden. De praktische beperkingen van zo een heuristiek zijn vanzelfsprekend.

In het tweede geval is $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 1$, en $\delta_3 = 0$. Nu is de doelstelling van de heuristiek minder vanzelfsprekend. Door T_{ij} als enige bepalende factor over te houden gaan de volgende klanten gekozen worden op basis van hoe snel er bij deze klant gestart kan worden met het laden of lossen. Onrechtstreeks wordt er hier ook rekening gehouden met de afstand aangezien een klant die veraf ligt ook een grote t_{ij} gaat hebben en bijgevolg een grote T_{ij} . In dit geval kunnen er zich echter wel ongunstige situaties voordoen waarbij een vrachtwagen naar een verafgelegen klant gestuurd gaat worden terwijl hij eigenlijk beter zou wachten op een nabijgelegen klant wiens tijdvenster nog niet geopend is. Hiernaast wordt er in dit geval ook geen rekening gehouden met de urgentie van de bediening. Dit kan ook voor ongunstige situaties zorgen waarbij een klant met nog een groot resterend tijdvenster de voorkeur gaat krijgen op een iets verder gelegen klant met een klein resterend tijdvenster. De reden dat er überhaupt rekening wordt gehouden met T_{ij} is dat dit gaat voorkomen dat vrachtwagens veel tijd gaan verliezen bij nabijgelegen klanten waarvan het tijdvenster nog lang niet geopend is. Door T_{ij} mee op te nemen in de vergelijking zullen chauffeurs eerst andere klanten gaan bedienen en geen tijd verliezen met wachten bij een klant met ongeopend tijdvenster.

In het derde geval is $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0$, en $\delta_3 = 1$. Hierbij gaat alle aandacht naar de urgentie van de bediening en wordt er geen rekening gehouden met de afstand van de klanten. In dit geval gaat er geen aandacht uit naar een optimalistie van de routes betreffende de gereden kilometers.

Uit bovenstaande blijkt dat alle drie de variabelen een gewicht moeten hebben groter dan 0 maar kleiner dan 1. Deze gewichten hoeven niet noodzakelijk hetzelfde te zijn. Naargelang het beoogde resultaat kan er meer nadruk gelegd worden op een bepaalde variabele. Indien bijvoorbeeld de doelstelling is om zo weinig mogelijk kilometers af te leggen kan er een hoger gewicht gegeven worden aan δ_1 . Indien er geprobeerd wordt om aan zoveel mogelijk klantaanvragen te voldaan kan er een hoger gewicht gegeven worden aan δ_3 .

5.2.3 Invloed gewichten

Hier wordt een voorbeeld verschillende keren uitgewerkt om de invloed van het gewicht van iedere variabele duidelijk maken. Dit voorbeeld is het basisvoorbeeld. Het basisvoorbeeld bestaat uit twee vrachtwagens die samen zes klanten moeten bedienen. Alles gebeurt in een XY-vlak van 20 op 20. Net zoals in het vorige voorbeeld bedraagt de reistijd per afstandseenheid 1 minuut.

De startlocaties van de chauffeurs staan in tabel 7:

Chauffeur	X	Y
A	3	4
B	16	17

Tabel 7 Locaties chauffeurs basisvoorbeeld

De tien pickup- en leverlocaties staan in tabel 8:

Pickup	X	Y
1	3	2
2	5	2
3	9	15
4	15	19
5	11	3
6	13	17

Levering	X	Y
1	6	17
2	3	16
3	8	1
4	19	3
5	18	17
6	16	5

Tabel 8 Locaties klanten basisvoorbeeld

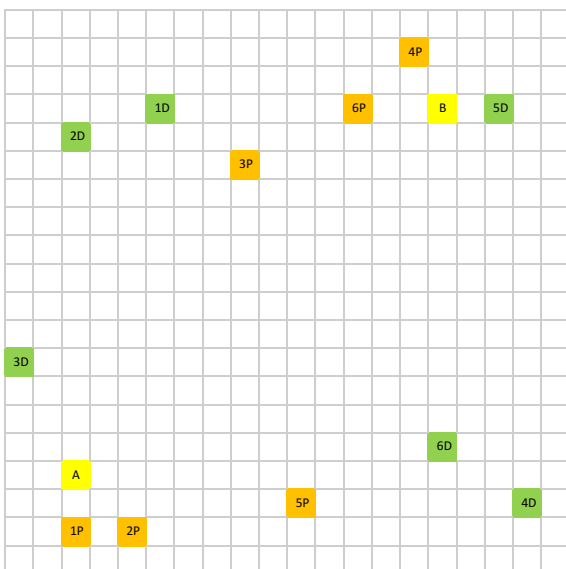
De tijdvensters van de verschillende klanten staan in tabel 9:

Klant	Open	Gesloten
1	15	60
2	0	50
3	20	35
4	0	65
5	15	80
6	0	10

Tabel 9 Tijdvensters klanten basisvoorbeeld

Deze tijdvensters gelden voor de pickuplocatie van de klant. Er wordt geen rekening gehouden met de tijdvensters van de leverlocatie aangezien wordt aangenomen dat de vrachtwagen onmiddellijk vertrekt na de pickup en dus altijd op tijd zal aankomen bij de leverlocatie. Om het basisvoorbeeld eenvoudig te houden wordt er hier geen rekening gehouden met de bedientijd.

Figuur 5 toont het basisvoorbeeld:



Figuur 5 Basisvoorbeeld

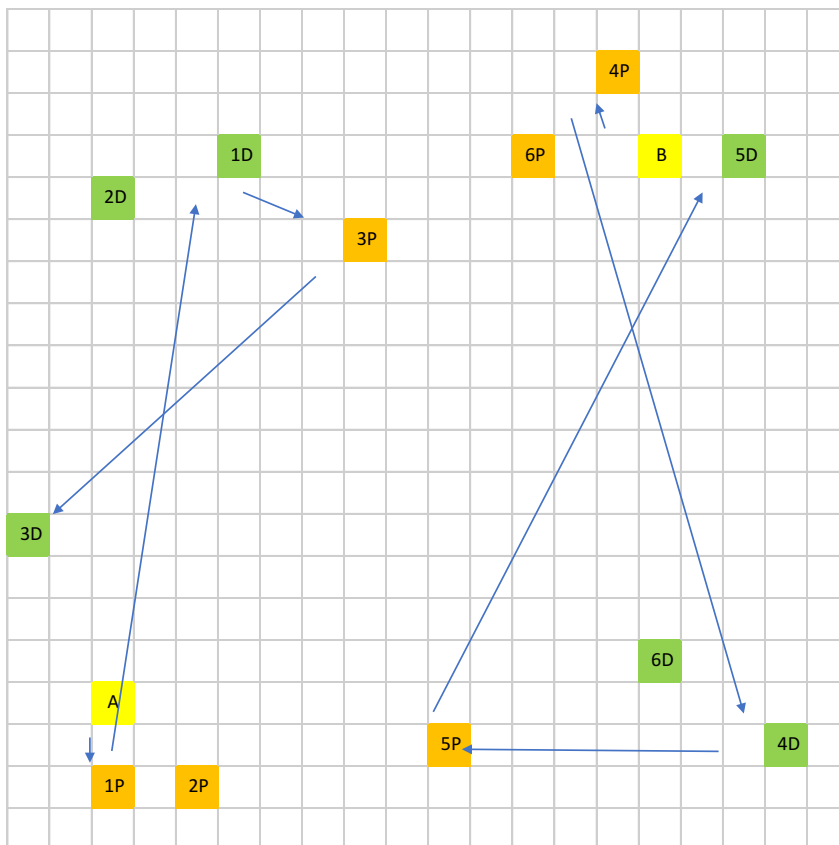
5.2.3.1 $\delta_1=1, \delta_2=0$ en $\delta_3=0$

In de eerste uitwerking van het basisvoorbeeld is $\delta_1=1$ terwijl $\delta_2=0$ en $\delta_3=0$. Dit betekent dat net zoals in het voorbeeld van sectie 5.1.1 enkel rekening gehouden worden met de afstand. Het eindresultaat van deze methode staat in tabel 10.

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Totale Afstand (km)
A	1	3	-	34,95
B	4	5	-	42,38

Tabel 10 Klantenverdeling met $\delta_1=1, \delta_2=0, \delta_3=0$

Deze oplossing minimaliseert de afgelegde afstand maar voldoet niet aan de tijdvensters van klant 2 en klant 6. De reden hiervoor is onder meer dat chauffeur A aankomt bij klant 1 voordat deze zijn tijdvenster geopend is en hierdoor lang moet wachten en dat chauffeur B eerst naar klant 4 gaat in plaats van naar klant 6 wiens tijdvenster veel kleiner is. Het eindresultaat hiervan is dat de tijdvensters van klant 2 en klant 6 al gesloten zijn wanneer deze methode er een vrachtwagen naar toe stuurt. Figuur 6 toont de afgelegde routes.



Figuur 6 $\delta_1=1, \delta_2=0$ en $\delta_3=0$

Het is duidelijk dat dit geen optimale oplossing is aangezien er bij dit kleine basisvoorbeeld met maar zes klanten al twee klanten zijn die niet bediend kunnen worden. In de volgende uitwerking van het basisvoorbeeld zal niet de afstand maar wel de niet-werktijd van chauffeurs het criteria zijn.

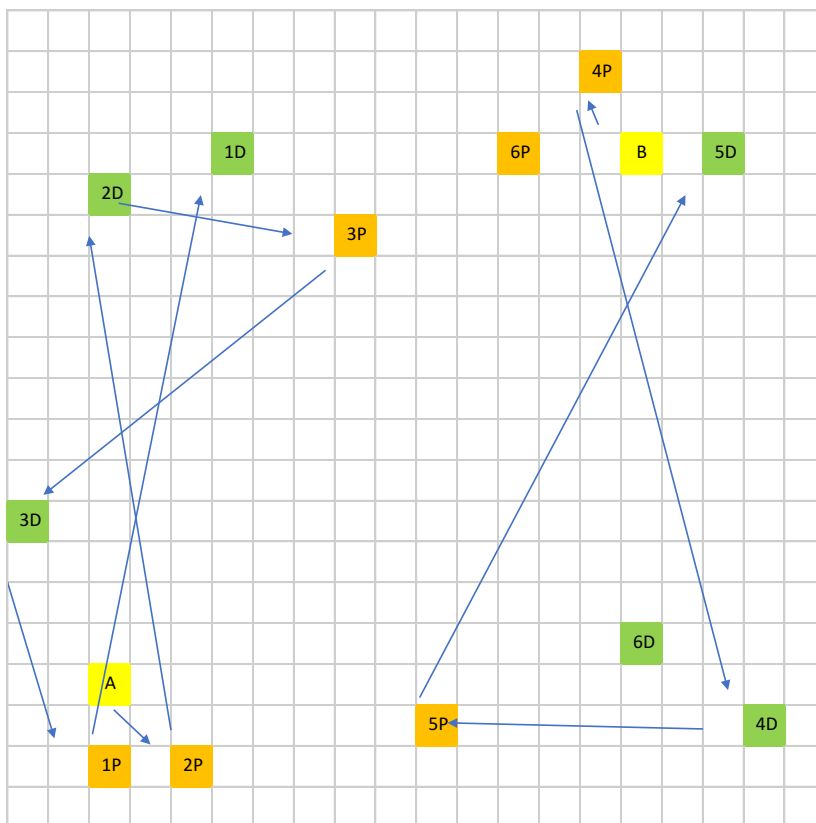
5.2.3.2 $\delta_1=0, \delta_2=1$ en $\delta_3=0$

In de tweede uitwerking is $\delta_1=0, \delta_2=1$, en $\delta_3=0$. Dit betekent dat T_{ij} de enige variabele is die van tel is. Zoals eerder gezegd meet T_{ij} het tijdsverschil tussen de voltooiing van het lossen bij klant i en het begin van het laden bij klant j . De tijd die chauffeurs niet werken wordt hier geminimaliseerd. Het eindresultaat van deze methode staat in tabel 11.

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Totale Afstand (km)
A	2	3	1	57,49
B	4	5	-	42,38

Tabel 11 Klantenverdeling met $\delta_1=0, \delta_2=1, \delta_3=0$

Het enige verschil met de vorige oplossing is hier dat chauffeur A eerst naar klant 2 vertrekt in plaats van naar klant 1. De reden hiervoor is dat de heuristiek nu rekening houdt met het feit dat het tijdvenster van klant 1 pas na 15 minuten opengaat en chauffeur A daardoor sneller kan beginnen laden indien hij eerst naar klant 2 vertrekt. Chauffeur B zijn uitgestippelde route verandert niet in vergelijking met het vorige voorbeeld. Het eindresultaat is dat deze heuristiek ervoor zorgt dat er een klant meer bediend wordt. Figuur 7 toont de afgelegde routes.



Figuur 7 $\delta_1=0, \delta_2=1$ en $\delta_3=0$

Opnieuw is dit geen optimale oplossing aangezien klant 6 nog steeds niet bediend is. In de volgende uitwerking wordt er enkel gekeken naar de urgentie van de orders.

5.2.3.3 $\delta_1=0, \delta_2=0$ en $\delta_3=1$

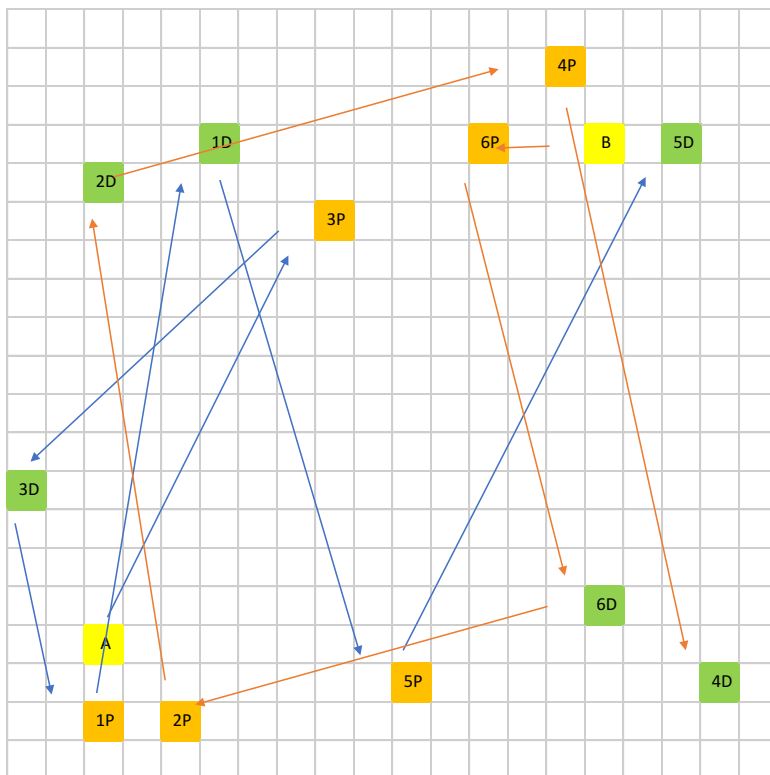
In de derde uitwerking is $\delta_1=0, \delta_2=0$, en $\delta_3=1$. Hier wordt dus enkel gekeken naar de urgentie van de orders. Dit betekent dat vrachtwagens doorgestuurd zullen worden naar de klant wiens tijdvenster als eerste zal sluiten. Ook hier wordt enkel het eindresultaat van de heuristiek besproken.

De volgorde van de klanten van iedere chauffeur staat in tabel 12:

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Totale Afstand (km)
A	3	1	5	77,49
B	6	2	4	69,77

Tabel 12 Klantenverdeling met $\delta_1=0, \delta_2=0, \delta_3=1$

Indien de chauffeurs deze volgorde in acht nemen kan er voldaan worden aan alle orders. Wat hier wel bij opvalt is dat de totale gereden afstand een stuk hoger ligt dan bij de vorige uitwerking. Ter vergelijking, de afstand van de twee chauffeurs samen bedraagt hier 147,26 km en in het vorige voorbeeld 99,87 km. In het vorige voorbeeld bedroeg de gemiddelde afstand per bediende klant dus 19,97 km terwijl de gemiddelde afstand hier 24,54 km bedraagt, een verhoging van 22,88%. Een aanzienlijke verhoging zeker als het voorbeeld zou uitgebreid worden naar meer klanten. De vraag of dit wel een betere oplossing is kan dus gesteld worden. Figuur 8 geeft de gereden routes weer.



Figuur 8 $\delta_1=0, \delta_2=0$ en $\delta_3=1$

In de volgende uitwerking zullen de drie variabelen alle drie hetzelfde gewicht meekrijgen, namelijk $1/3$.

5.2.3.4 *Gelijke gewichten*

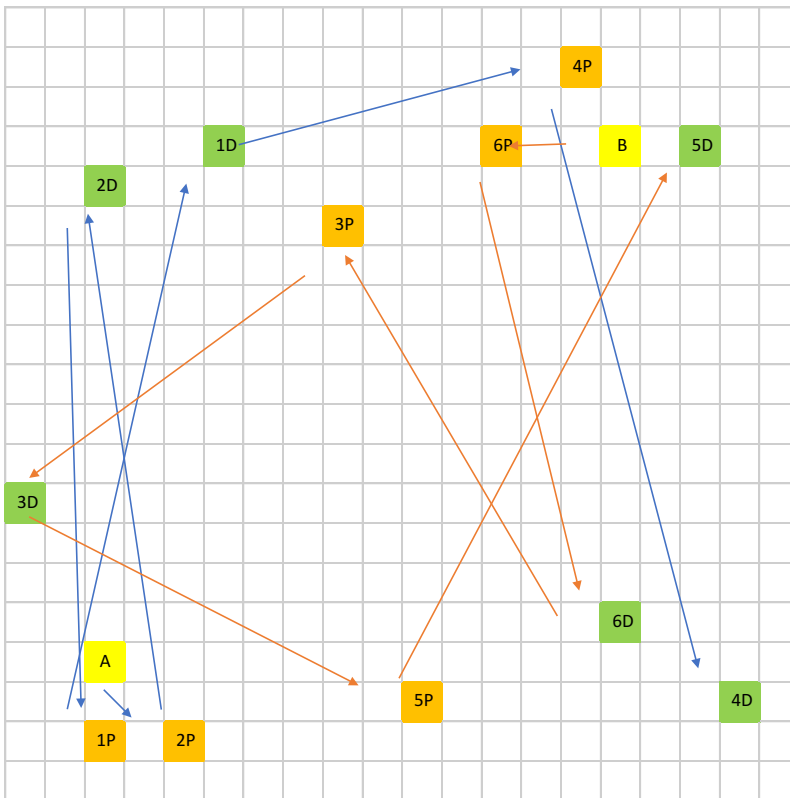
In de vierde uitwerking zijn de gewichten als volgt, $\delta_1=1/3, \delta_2=1/3$, en $\delta_3=1/3$. Dit betekent dat iedere variabele, d_{ij} , T_{ij} , en v_{ij} een even grote invloed heeft op waar een vrijgekomen vrachtwagen

naar toe gestuurd zal worden. De vrijgekomen vrachtwagen zal doorgestuurd worden naar de klant waarvoor de som $c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 v_{ij}$ het kleinst is. Het eindresultaat van de heuristiek staat in tabel 13.

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Totale Afstand (km)
A	2	1	4	71,98
B	6	3	5	60,88

Tabel 13 Klantenverdeling met gelijke gewichten

Op deze manier is er ook aan ieder order voldaan en het totaal aantal afgelegde kilometers bedraagt hier 132,86 km ofwel per klant een gemiddelde afstand van 22,14 km. In vergelijking met de tweede uitwerking van het basisvoorbeeld waarbij $\delta_1=0$, $\delta_2=1$ en $\delta_3=0$ was, is dit een verhoging van slechts 10,86% terwijl er tegelijkertijd toch aan ieder order is voldaan. In vergelijking met de tweede uitwerking van het basisvoorbeeld waarbij het enige criteria de afstand tot de klant was hebben we hier een verhoging van 14,54% terwijl er toch voldaan is aan ieder order. Figuur 9 toont de afgelegde routes.



Figuur 9 Gelijke verdeling van gewichten

Wat hier opvalt is dat het aandeel van v_{ij} erg hoog is bij de bepaling van naar welke klant de vrachtwagen doorgestuurd gaat worden. Onderstaande tabellen 14 t.e.m. 16 tonen de som c_{ij} en de afzonderlijke termen waaruit deze som bestaat voor iedere iteratie van dit voorbeeld.

Chauffeur	Klant	c_{ij}	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}
A	2	18,55	0,94	0,94	16,67
B	6	5,27	1,00	1,00	3,33

Tabel 14 iteratie 1 met $\delta_1=1/3$, $\delta_2=1/3$ en $\delta_3=1/3$

Chauffeur	Klant	c_{ij}	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}
A	1	24,22	4,67	4,67	14,88
B	3	23,68	4,07	4,07	14,34

Tabel 15 iteratie 2 met $\delta_1=1/3$, $\delta_2=1/3$ en $\delta_3=1/3$

Chauffeur	Klant	c_{ij}	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}
A	4	12,39	3,07	3,07	6,24
B	5	15,20	1,20	1,20	12,80

Tabel 16 iteratie 3 met $\delta_1=1/3$, $\delta_2=1/3$ en $\delta_3=1/3$

Hieruit blijkt dat de variabele v_{ij} verantwoordelijk is voor gemiddeld 67% van de som c_{ij} voor chauffeur A en 69% voor chauffeur B. Wat dit wil zeggen is dat er een relatief grote waarde wordt gegeven aan het op tijd aankomen bij klanten en er minder wordt gekeken naar de afstand die overbrugd moet worden. Indien het de doelstelling is om aan zoveel mogelijk klantaanvragen te voldoen kan dit een goede verdeling zijn. Echter, indien er een eerder getracht wordt om het aantal lege kilometers te verminderen kan er een zwaarder gewicht worden gegeven aan d_{ij} , wat in de volgende uitwerking gebeurt.

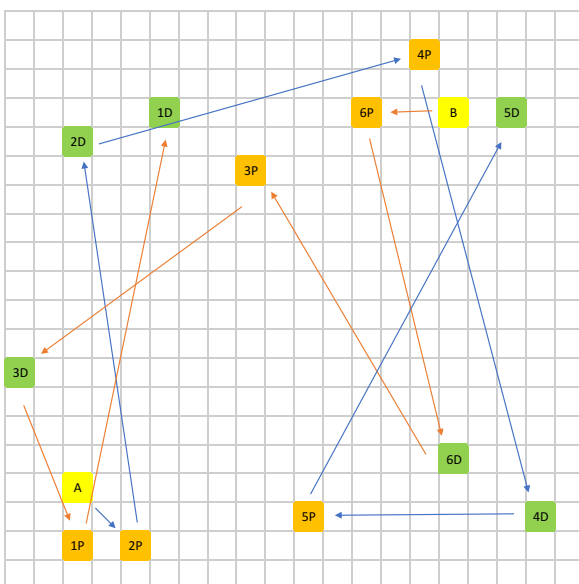
5.2.3.5 Vermijden van lege kilometers

In deze uitwerking is $\delta_1=1/2$, $\delta_2=1/3$, en $\delta_3=1/6$. Het resultaat hiervan is weergegeven in tabel 17:

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Totale Afstand (km)
A	2	4	5	69,48
B	6	3	1	62,02

Tabel 17 Klantenverdeling met $\delta_1=1/2$, $\delta_2=1/3$, $\delta_3=1/6$

Figuur 10 toont de afgelegde routes:



Figuur 10 $\delta_1=1/2$, $\delta_2=1/3$, en $\delta_3=1/6$

Ten opzichte van de vorige uitwerking in 5.2.3.4 gaat het hier maar om een kleine verbetering. De totale afgelegde afstand daalt maar met 1,36 km, wat een verbetering is van 1,02%. Bij het bekijken van de som c_{ij} bij iedere iteratie (zie tabellen 17 t.e.m. 19) valt opnieuw op dat het aandeel van v_{ij} nog steeds disproportioneel groot is.

Chauffeur	Klant	c_{ij}	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}
A	2	10,69	1,41	0,94	8,33
B	6	4,17	1,5	1,00	1,67

Tabel 17 iteratie 1 met $\delta_1=1/2$, $\delta_2=1/3$, en $\delta_3=1/6$

Chauffeur	Klant	c_{ij}	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}
A	4	18,31	6,18	4,12	8,01
B	3	18,60	6,10	6,67	5,83

Tabel 18 iteratie 2 met $\delta_1=1/2$, $\delta_2=1/3$, en $\delta_3=1/6$

Chauffeur	Klant	c_{ij}	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}
A	5	12,36	4,00	2,67	5,70
B	1	8,58	2,55	1,70	4,33

Tabel 19 iteratie 3 met $\delta_1=1/2$, $\delta_2=1/3$, en $\delta_3=1/6$

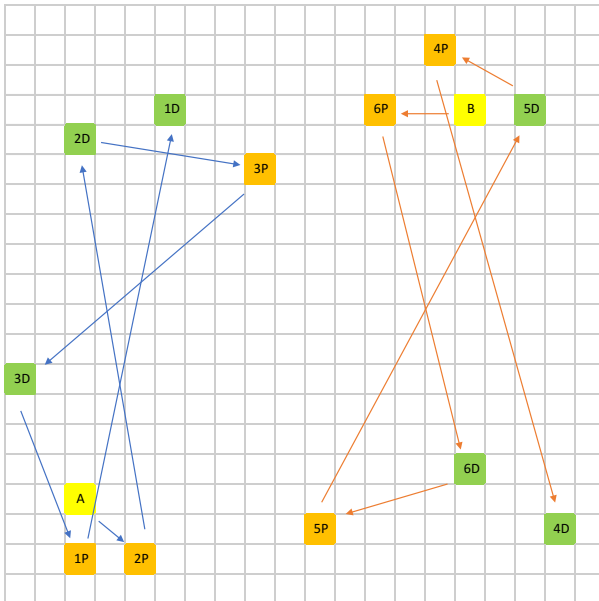
Hieruit blijkt dat de variabele v_{ij} gemiddeld nog steeds verantwoordelijk is voor 56% van de som c_{ij} voor chauffeur A en 36% voor chauffeur B. Dit is ondanks het toegekende gewicht van 1/6 of 17%.

In de volgende uitwerking is het gewicht van v_{ij} daarom nogmaals verlaagd ten voordele van v_{ij} . De gewichten zijn nu als volgt verdeeld: $\delta_1=5/9$, $\delta_2=3/9$, en $\delta_3=1/9$. Dit zorgt voor het resultaat in tabel 21:

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Totale Afstand (km)
A	2	3	1	57,49
B	6	5	4	56,51

Tabel 20 Klantenverdeling met $\delta_1=5/9$, $\delta_2=3/9$, en $\delta_3=1/9$

Deze keer is er wel sprake van een substantiele verbetering. De totale afgelegde afstand bedraagt nu 114 km, wat gemiddeld 19 km per klant is. Vergelijken met het vorige voorbeeld is de totale gereden afstand gedaald met 15,35%. Figuur 11 toont de afgelegde routes.



Figuur 11 $\delta_1=5/9$, $\delta_2=3/9$, en $\delta_3=1/9$

Dit terwijl er nog steeds aan ieder order voldaan is. Het aandeel van iedere term in de som $c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 v_{ij}$ ziet er iedere iteratie als volgt uit (zie tabellen 21 t.e.m. 23):

Chauffeur	Klant	c_{ij}	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}
A	2	8,07	1,57	0,94	5,56
B	6	3,78	1,67	1,00	1,11

Tabel 21 iteratie 1 met $\delta_1=5/9$, $\delta_2=3/9$, en $\delta_3=1/9$

Chauffeur	Klant	c_{ij}	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}
A	3	7,41	3,38	2,03	2,00
B	5	11,97	2,99	1,80	7,18

Tabel 22 iteratie 2 met $\delta_1=5/9$, $\delta_2=3/9$, en $\delta_3=1/9$

Chauffeur	Klant	c_{ij}	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}
A	1	7,08	2,83	1,70	2,55
B	4	6,38	2,00	1,20	3,18

Tabel 23 iteratie 3 met $\delta_1=5/9$, $\delta_2=3/9$, en $\delta_3=1/9$

De variabele v_{ij} is nu gemiddeld goed voor 44% van de som $c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 v_{ij}$ voor chauffeur A en 46% voor chauffeur B. Dit is een daling van 12% voor chauffeur A en een stijging van 10% voor chauffeur B in vergelijking met de vorige uitwerking waarbij $\delta_1=1/2$, $\delta_2=1/3$, en $\delta_3=1/6$ was.

5.2.3.6 Conclusie

Het simpele basisvoorbeeld is hierboven op zes verschillende manieren opgelost wat heeft gezorgd voor zes verschillende oplossingen. Deze oplossingen verschilden sterk in kwaliteit. Zo voldeed de eerste oplossing waarbij enkel gekeken werd naar de afstand aan slecht vier van de zes orders terwijl de laatste oplossing aan alle zes kon voldoen zonder gemiddeld verder te moeten rijden. Hieruit blijkt dat de gewichten van de drie variabelen een grote invloed hebben op het eindresultaat van de heuristiek. Deze gewichten moeten verdeeld worden met de doelstelling van de heuristiek en de gegevens van het probleem in het achterhoofd. Indien er aan zoveel mogelijk klantaanvragen voldaan moet worden en het aantal afgelegde kilometers van geen of weinig belang is zal er een groot gewicht gegeven worden aan v_{ij} . Omgekeerd, indien het de bedoeling is om zo weinig mogelijk (lege) kilometers te rijden en tijdvensters van klanten geen rol spelen kan er een hoger gewicht gegeven worden aan d_{ij} .

Deze heuristiek kan verschillende keren uitgevoerd worden op hetzelfde probleem met telkens verschillende gewichten voor de verschillende variabelen. De oplossingen die hieruit voorkomen kunnen dan met elkaar vergeleken worden om er uiteindelijk de beste uit te selecteren.

5.2.4 Nadelen

Deze methode is simpel en intuïtief wat het tot een aantrekkelijke optie maakt om een planning mee op te stellen. Door zijn eenvoud heeft de methode echter ook enkele nadelen. Zo gaat deze heuristiek niet 'vooruitkijken'. Hiermee wordt bedoeld dat het kan zijn dat een chauffeur naar een bepaalde klant gestuurd kan worden omdat de som c_{ij} voor die klant het kleinst is, maar dat een chauffeur die 5 minuten later vrijkomt eigenlijk beter gepositioneerd is om naar deze klant gestuurd te worden. Indien de heuristiek in staat was om vooruit te kijken zou de chauffeur die als eerste vrijkwam dan naar een andere klant gestuurd worden. Een ander nadeel is dat deze methode in veel gevallen een degelijke planning zal opstellen, maar dat er geen enkele garantie is dat deze planning optimaal is. Hiermee hangt ook samen dat deze methode niet gaat zoeken naar verbeteringen; er wordt niet gekeken of kleine wijzigingen in de voorgestelde planning tot betere oplossingen leiden.

Uit bovenstaande blijkt dat er nog ruimte is voor verbetering wat betreft het eindresultaat van deze heuristiek. In de volgende sectie zullen enkele aanpassingen aan de heuristiek voorgesteld worden en zal er gekeken worden of dit enige invloed heeft op de prestatie van deze heuristiek.

6. Rittenplanningsmethode: vooruitplannen & verbeteringsheuristiek

In deze sectie worden enkele mogelijke verbeteringen van de nearest neighbour with time windows heuristiek voorgesteld en zullen de resultaten hiervan besproken worden.

6.1 Vooruitplannen

Één van de grootste nadelen van de heuristiek is dat deze niet vooruitkijkt. Dit heeft tot gevolg dat de heuristiek soms beslissingen gaat nemen die duidelijk suboptimaal zijn en door een menselijke planner nooit genomen zouden worden. Zo kan er bijvoorbeeld een vrachtwagen doorgestuurd worden naar een klant die 100 kilometer verder ligt, terwijl er 2 minuten later een andere vrachtwagen zou vrijkomen die maar enkele kilometers van deze klant verwijderd is. Een menselijke planner zou dan de vrachtwagen die 2 minuten later vrijkomt naar deze klant sturen en een andere opdracht zoeken voor de vrachtwagen die 100 kilometer verwijderd is. Omdat de heuristiek momenteel niet vooruit kan kijken, zelfs geen 2 minuten, wordt deze suboptimale beslissing genomen.

Een remedie voor dit probleem kan als volgt geformuleerd worden:

Wanneer vrachtwagen A aan wordt toegewezen aan klant X. Ga dan eerst na of er geen andere vrachtwagens gaan vrijkomen bij de volgende iteratie die dichterbij klant X liggen dan vrachtwagen A en nog op tijd gaan zijn om klant X te bedienen. Indien dit het geval is zal vrachtwagen A een andere klant toegewezen krijgen waarvoor deze controle opnieuw zal gebeuren en zal klant X aan de vrachtwagen die dichterbij ligt en nog op tijd kan zijn worden toegewezen. Iedere chauffeur krijgt wel iedere iteratie een opdracht toegewezen om te voorkomen dat een verafgelegen chauffeur van alle opdrachten wordt uitgesloten.

Deze methode gaat voor minder lege kilometers zorgen dan wanneer de heuristiek zou toegepast worden zonder deze aanpassing.

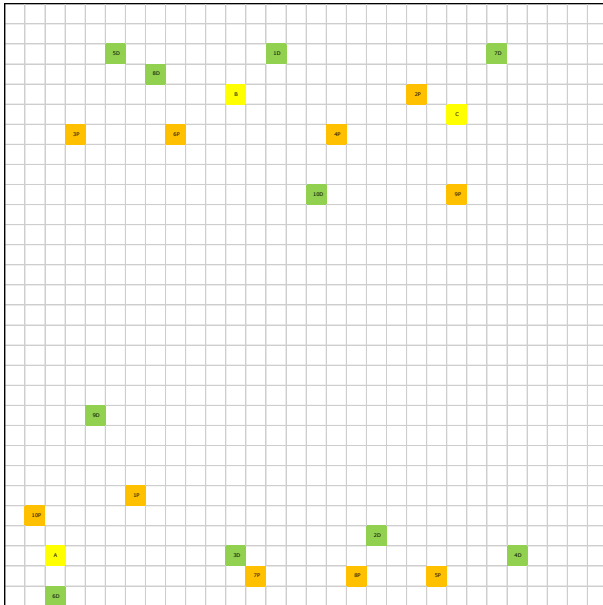
6.1.1 Voorbeeld met vooruitplannen

De aangepaste heuristiek wordt hier toegepast op een uitgebreider voorbeeld en het resultaat daarvan zal vergeleken worden met het resultaat van de onaangepaste heuristiek. Het voorbeeld bestaat uit 3 chauffeurs en 10 klanten die telkens een pickup- en leverplaats hebben. De gewichten zijn $\delta_1=5/9$, $\delta_2=1/3$ en $\delta_3=1/9$. De tijdvensters van de 10 klanten staan in tabel 24. Figuur 12 toont de locaties van de chauffeurs en de klanten.

Klant	Open	Gesloten
1	15	90
2	0	90
3	40	120
4	20	100
5	0	70

Klant	Open	Gesloten
6	90	150
7	10	80
8	70	150
9	60	100
10	10	110

Tabel 24 Locaties klanten voorbeeld 6.1.1



Figuur 12 Voorbeeld met 3 chauffeurs en 10 klanten

De onaangepaste heuristiek geeft de oplossing in tabel 25, tabel 26 toont het totaal aantal gereden kilometers voor deze oplossing:

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Klant 4
A	10	3	1	8
B	2	5	9	-
C	4	7	6	-

Tabel 25 Oplossing zonder vooruitplannen

Chauffeur	Afstand
A	140,5
B	104,71
C	112,85
Totaal	358,06

Tabel 26 Totaal aantal gereden kilometers zonder vooruitplannen

De eerste iteratie van de aangepaste heuristiek geeft al een ander resultaat. De eerste klant van chauffeur A is nog steeds klant 10. Echter, voor chauffeur B is de eerste klant die wordt bediend klant 4 in plaats van klant 2. De waarde c_{ij} is voor chauffeur B het kleinst bij klant 2, maar klant 2 ligt dicht bij chauffeur C en chauffeur C is nog in staat om op tijd te zijn bij klant 2, dus wordt chauffeur C naar klant 2 gestuurd en wordt de klant met de tweede laagste c_{ij} , namelijk klant 4, aan chauffeur B toegewezen.

Tabel 28 toont de eindoplossing van de aangepaste heuristiek en tabel 29 toont het totaal aantal gereden kilometers.

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Klant 4
A	10	3	1	-
B	4	7	9	-
C	2	5	6	8

Tabel 28 Oplossing met vooruitplannen

Chauffeur	Afstand
A	87,26
B	98,3
C	131,96
Totaal	317,52

Tabel 29 Totaal aantal gereden kilometers met vooruitplannen

Het totaal aantal gereden kilometers daalt met 40,54. Deze daling komt enkel door een vermindering van het aantal lege kilometers dat wordt gereden. Dit is een daling van 35,14%, wat een zeer significante daling is. De aangepaste heuristiek zorgt hier dus voor een verbeterde oplossing.

6.1.2 Uitgebreid voorbeeld

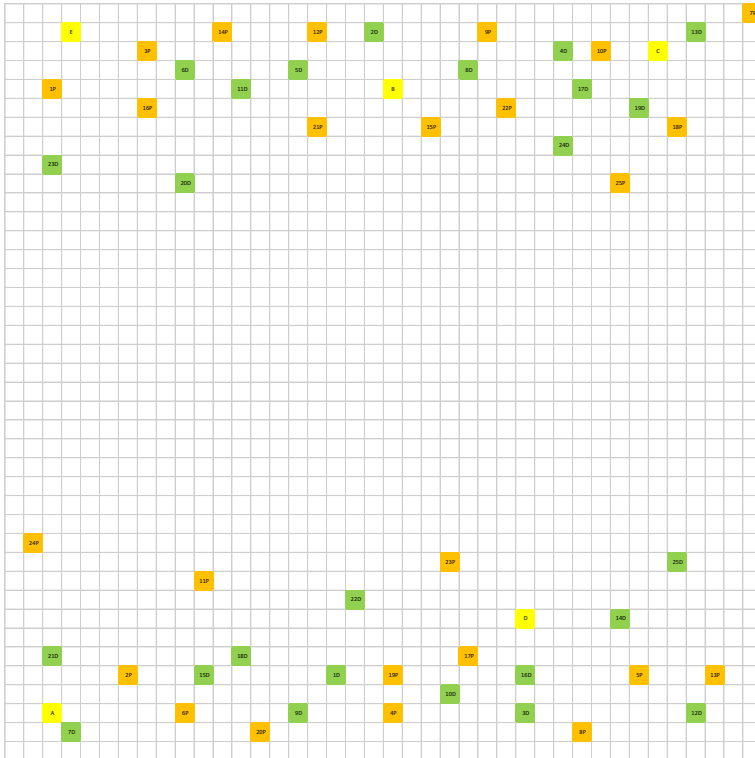
Hier wordt een nog groter voorbeeld gegeven om de methode te testen in een situatie waarbij er veel verschillende keuzes zijn. Er zijn 5 chauffeurs en 25 klanten met telkens een pickup- en leverlocatie. De tijdvensters van de klanten staan in tabel 30:

Klant	Open	Gesloten
1	10	100
2	0	200
3	90	200
4	0	80
5	110	200
6	30	90
7	50	150
8	150	300
9	70	180
10	0	120
11	15	90
12	25	190
13	0	70

Klant	Open	Gesloten
14	5	90
15	90	160
16	160	300
17	50	150
18	90	280
19	160	300
20	80	280
21	40	100
22	180	300
23	90	280
24	130	260
25	100	170

Tabel 3019 Locaties klanten voorbeeld 6.1.2

De chauffeurs en klanten bevinden zich allemaal op een XY-vlak van 40 op 40 weergegeven in figuur 13. Het vlak is verdeeld in twee delen en de pickup- en leverplaats van iedere klant bevinden zich in overstaande delen, dit om import/export na te bootsen.



Figuur 13 (40,40) vlak met 25 klanten en 5 chauffeurs

De heuristiek zonder vooruitplannen geeft de oplossing in tabel 31:

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Klant 4	Klant 5	Totaal km
A	11	21	2	12	8	198.77
B	14	17	15	24	18	214.12
C	10	13	25	5	16	202.49
D	4	7	20	9	19	239.9
E	1	6	3	23	22	212.43

Tabel 31 Totaal aantal gereden kilometers zonder vooruitplannen

Het totaal aantal gereden kilometers bedraagt 1067,71. Het aantal lege kilometers dat gereden wordt is 211,17. De aangepaste heuristiek geeft de oplossing in tabel 32:

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Klant 4	Klant 5	Totaal km
A	11	21	2	15	19	192.91
B	14	13	25	5	18	215.43
C	10	17	9	24	22	196.4
D	4	7	20	12	8	239.96
E	1	6	3	23	16	202.93

Tabel 32 Totaal aantal gereden kilometers met vooruitplannen

Het totaal aantal gereden kilometers bedraagt hier 1047,63. Dit betekent dat het aantal lege kilometers hier 191,09 bedraagt. In vergelijking met het vorige voorbeeld is dit een daling van 9,5%. Ook is er nog steeds voldaan aan alle klantaanvragen. Hieruit blijkt dat er wel degelijk sprake is van een verbeterde oplossing

6.1.3 Conclusie

In de bovenstaande voorbeelden zorgde de aangepaste heuristiek telkens voor een verbetering van de oplossing. Het aantal lege kilometers daalde terwijl toch nog steeds iedere klant op tijd bedient

werd. In zulke situaties is het duidelijk dat de nieuwe oplossing van hogere kwaliteit is. Er kan echter ook een situatie ontstaan waarbij het aantal lege kilometers van de nieuwe oplossing lager zal zijn maar dat er ook minder klanten bediend zullen worden. Het is dan aan de dispatchers om te beslissen wat de beste oplossing is en eventuele aanpassingen door te voeren.

6.2 Verbeteringen van initiële oplossing

De huidige methode genereert één oplossing en zoekt daarna niet meer verder naar verbeteringen. Door de methode met verschillende gewichten te proberen kunnen er wel verschillende oplossingen bekomen worden die in kwaliteit verschillen maar dit vereist dat de methode verschillende keren opnieuw wordt gestart wat veel tijd vereist. Wat beter zou zijn is dat de methode een initiële oplossing gaat proberen te verbeteren door kleine veranderingen door te voeren. In deze sectie wordt een manier om zulke veranderingen uit te voeren besproken.

6.2.1 Simulated annealing

Om de initiële oplossing te verbeteren zal simulated annealing (SA) worden toegepast in navolging van de paper van Li & Lim (2003). Kort gezegd gaat SA zoeken naar een betere oplossing door kleine veranderingen door te voeren in een initiële oplossing. De veranderingen die kunnen doorgevoerd worden zijn overgenomen uit Li & Lim (2003):

- Shift: waarbij een klant weggenomen wordt uit de route van een chauffeur en wordt toegevoegd bij een andere chauffeur;
- Exchange: waarbij twee klanten van twee verschillende chauffeurs met elkaar gewisseld worden;
- Rearrange: waarbij twee klanten van dezelfde chauffeur van plaats veranderen.

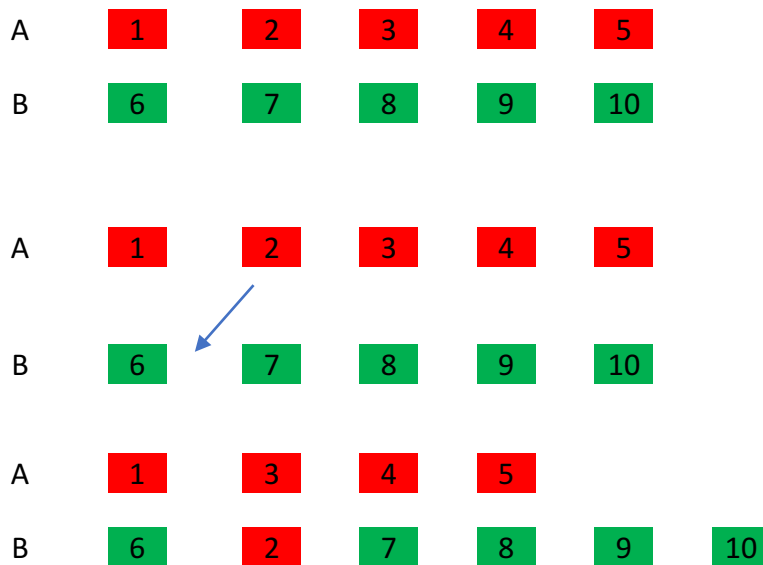
In iedere iteratie zal een willekeurig getal tussen 0 en 1 bepaald worden. Dit getal bepaalt welke verandering wordt doorgevoerd.

- 0,001 - 0,333: Shift
- 0,334 - 0,666: Exchange
- 0,667 - 0,999: Rearrange

Het verdere verloop van de procedure hangt af van welke verandering doorgevoerd wordt:

- Shift:
 1. Een willekeurig getal kiest de route waarvan er een klant zal weggenomen worden, bv. Route A
 2. Een willekeurig getal kiest de route waar de klant bijgevoegd zal worden, bv. Route B
 3. Een willekeurig getal kiest de klant die zal verplaatst worden van de ene naar de andere route, bv. Klant 2 van route A
 4. Een willekeurig getal kiest de klant waarachter de klant die verplaatst wordt zal gezet worden, bv. Klant 1 van route B

In deze nieuwe planning is klant 2 van route A nu dus klant 2 van route B geworden. Figuur 14 toont deze shift.

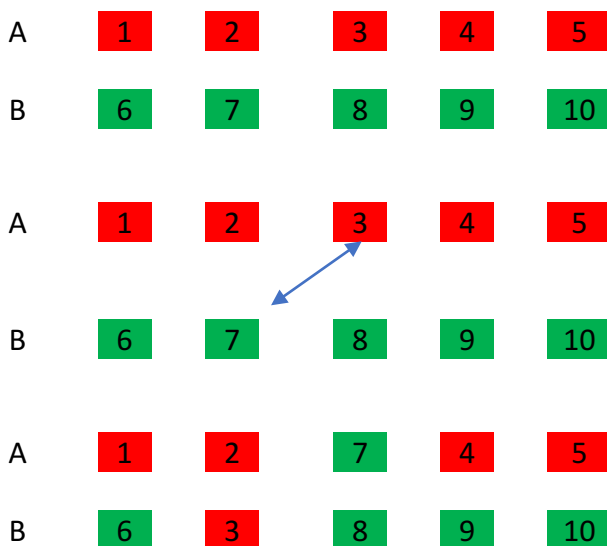


Figuur 14 Shift

- Exchange:

1. Een willekeurig getal kiest de route waarvan een klant verwisseld zal worden, bv. Route A
2. Een willekeurig getal kiest de andere route waarvan een klant verwisseld zal worden, bv. Route B
3. Een willekeurig getal kiest welke klant van de eerst gekozen route verwisseld zal worden, bv. Klant 3 van route A
4. Een willekeurig getal kiest welke klant van de tweede gekozen route verwisseld zal worden, bv. Klant 2 van route B

In deze nieuwe planning zijn klant 3 van route A en klant 2 van route B van plaats veranderd. Figuur 15 toont deze exchange.

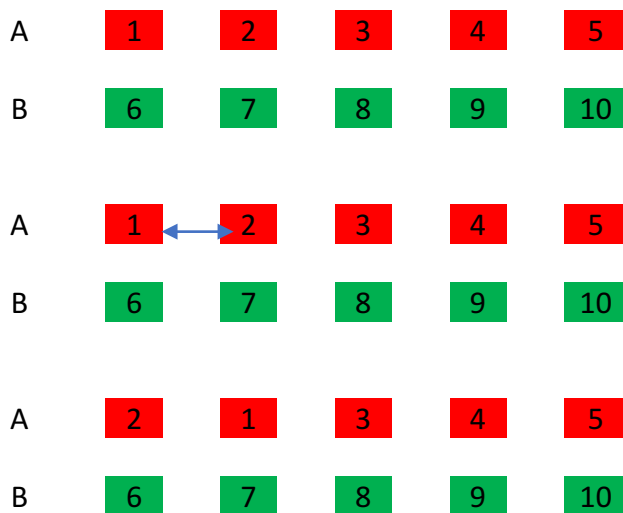


Figuur 15 Exchange

- Rearrange:

1. Een willekeurig getal kiest de route waarin twee klanten van plaats zullen wisselen, bv. Route A
2. Een willekeurig getal kiest een eerste klant die van plaats zal verwisselen, bv. Klant 2 van route A
3. Een willekeurig getal kiest een tweede klant die van plaats zal verwisselen, bv. Klant 1 van route A

In deze nieuwe planning zijn klant 1 en klant 2 van route A van plaats veranderd. Figuur 16 toont deze rearrange.



Figuur 16 Rearrange

Wanneer de verandering is doorgevoerd moet eerst gekeken worden of de nieuwe planning uitvoerbaar is wat betreft de tijdvensters van de klanten. Indien dit niet het geval is start men bovenstaande procedure opnieuw met de eerder opgestelde planning die wel uitvoerbaar was. Indien de nieuwe planning echter wel uitvoerbaar is zal het totaal aantal gereden kilometers van de nieuwe planning vergeleken worden met het totaal aantal gereden kilometers van de eerder opgestelde planning. Het totaal aantal kilometers van de eerder opgestelde planning wordt aangeduid met KM_0 en het totaal aantal kilometers van de nieuwe planning met KM_n . Nu zijn er twee situaties mogelijk:

- a) $KM_n < KM_0$

In dit geval zal er verder gegaan worden met deze nieuwe verbeterde planning. Het proces begint dan opnieuw met een keuze tussen shift, exchange, en rearrange.

- b) $KM_n > KM_0$

In dit geval komt SA pas echt aan bod. De idee achter SA is dat er af en toe ook naar slechtere oplossingen gegaan moet worden omdat deze dichterbij een betere of zelfs beste oplossing kunnen liggen.

De kans dat er nu verder gegaan wordt met KM_n is als volgt:

$$Prob\{aanvaarding\} = e^x \text{ met } x = \frac{KM_o - KM_n}{T}$$

hierbij is T de temperatuur, dit is een coëfficiënt die gebruikt wordt bij simulated annealing. Of de oplossing KM_n nu aanvaard wordt hangt af van een volgend willekeurig getal:

- Indien *willekeurig getal* $< e^x$ aanvaard de oplossing
- Indien *willekeurig getal* $> e^x$ verwerp de oplossing en begin opnieuw met KM_n

De waarde van T moet zelf bepaald worden. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden, maar de eerste startwaarde die in deze methode aan T_1 gegeven zal worden is $0,2 * KM_o$. Iedere iteratie waarin er een uitvoerbare planning wordt bekomen is de volgende waarde van $T_n = 0,2 * T_{n-1}$. Op die manier wordt de kans dat een slechtere oplossing aanvaard wordt kleiner en kleiner. SA kan toegepast worden voor een vooraf bepaald aantal iteraties. Uiteindelijk zal de beste oplossing die gevonden kan worden gebruikt worden.

6.2.2 Toepassing SA

SA zal nu toegepast worden op het voorbeeld uit 6.1.1 met 10 klanten en 3 chauffeurs. De oplossing van de aangepaste heuristiek is herhaald in tabel 33:

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Klant 4
A	10	3	1	-
B	4	7	9	-
C	2	5	6	8

Tabel 33 Startoplossing SA

Dit is de startoplossing waarop SA zal toegepast worden. Het totaal aantal gereden kilometers is $KM_o = 317,52$. De beginwaarde van T is dan $T = KM_o * 0,2 = 63,504$.

- Iteratie 1:
 1. Willekeurig getal (WG): 0,608 → exchange
 2. WG: 0,577 → chauffeur B
 3. WG: 0,347 → chauffeur A
 4. WG: 0,933 → klant 3 van chauffeur B
 5. WG: 0,581 → klant 2 van chauffeur A

Dit betekent dat klant 3 van chauffeur B van plaats zal verwisselen met klant 2 van chauffeur A. Deze oplossing heeft als totaal aantal kilometers: $KM_n = 325,59$ km. Dit betekent dat $e^x = 0,881$. Indien het volgende willekeurige getal dus lager is dan 0,881 zal er met KM_n verder worden gegaan. Het volgende willekeurige getal is 0,173, dit betekent dat KM_n nu de oplossing is waarop SA verder wordt toegepast. Deze oplossing is weergegeven in tabel 34.

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Klant 4
A	10	9	1	-
B	4	7	3	-
C	2	5	6	8

Tabel 34 Oplossing na exchange

- Iteratie 14

13 iteraties later is SA tot de oplossing in tabel 35 gekomen met $KM_0 = 335,01$:

Chauffeur	Klant 1	Klant 2	Klant 3	Klant 4
A	7	9	1	-
B	4	10	3	-
C	2	5	6	8

Tabel 35 Oplossing vóór iteratie 14

De volgende willekeurige getallen worden verkregen:

1. WG: 0,123 → shift
2. WG: 0,699 → chauffeur C
3. WG: 0,761 → chauffeur B
4. WG: 0,717 → klant 3 van chauffeur C
5. WG: 0,912 → klant 3 van chauffeur B

Dit betekent dat klant 3 van chauffeur C achter klant 3 van chauffeur B gezet zal worden. Deze oplossing heeft als totaal aantal kilometers: $KM_n = 363,53$. De waarde van T is ondertussen: $T = 15,876$. Hierdoor is $e^x = 0,166$. Het volgende willekeurige getal is 0,604. Aangezien dit getal groter is dan 0,166 zal deze nieuwe oplossing niet aanvaard worden.

- Iteratie 15

Deze iteratie geeft de volgende willekeurige getallen:

1. WG: 0,894 → rearange
2. WG: 0,238 → chauffeur A
3. WG: 0,144 → klant 1 van chauffeur A
4. WG: 0,870 → klant 3 van chauffeur A

Dit betekent dat de eerste en de derde klant van chauffeur A van plaats verwisselen. Deze oplossing is echter niet uitvoerbaar omdat het tijdsvenster van de derde klant van chauffeur A dan al gesloten is wanneer chauffeur A hier aan komt. Met deze oplossing wordt dus niet verder gegaan.

Na 35 iteraties is er nog altijd geen betere oplossing dan de beginoplossing gevonden. Dit komt voor een groot deel door de hoge kwaliteit van de beginoplossing. Indien SA toegepast wordt op een beginoplossing van mindere kwaliteit wordt er wel een verbetering van de oplossing bekomen.

Dit is het geval wanneer gestart wordt vanaf de beginoplossing die de onaangepaste heuristiek in sectie 6.1.1 oplevert. Deze oplossing rijdt in totaal 358,06 kilometer. Na slechts 5 iteraties vindt de SA-methode al een betere oplossing die in totaal 350,37 kilometer bedraagt. De SA-methode werd hier gestart met een lagere temperatuur T , namelijk $T = 0,05 * KM_0$. Dit heeft tot gevolg dat slechtere oplossingen minder kans maken om aanvaard te worden ten opzichte van wanneer er met een grotere T gestart wordt. Hierdoor is het gebied dat met SA verkend wordt kleiner maar wordt er meer in de buurt van waar er een vermoedelijk een betere oplossing ligt gezocht.

6.2.3 Besluit

Met SA werden geen betere oplossingen gevonden dan de beginoplossing die bekomen werd met de heuristiek die vooruitplant. Dit komt langs de ene kant door het feit dat het aantal iteraties die zijn uitgevoerd enigszins beperkt is. Dit komt omdat ze met de hand zijn uitgevoerd; een automatisch proces kan gemakkelijk veel meer iteraties uitvoeren waardoor er een grotere kans is op het vinden van een betere oplossing. Langs de andere kant zegt dit ook iets over de kwaliteit van de beginoplossing. Doordat de methode die een beginoplossing voorstelt al zeer nadrukkelijk rekening houdt met de afgelegde afstand is een verdere vermindering van het aantal afgelegde kilometers niet vanzelfsprekend.

SA vond wel een betere oplossing dan de beginoplossing van de onaangepaste heuristiek. Dit toont aan dat SA een goede manier is om oplossingen die relatief "ver" van de optimale oplossing liggen te verbeteren. Ook voor oplossingen die dichterbij een optimale oplossing liggen is het voor SA mogelijk om een verbeterde oplossing te vinden mits er genoeg iteraties gebeuren.

7. Toepassing op planning van MTL

Om de methode in de praktijk te testen wordt in dit hoofdstuk getracht een rittenplanning voor MTL op te stellen door enkel gebruik te maken van de methode. Het resultaat van de methode wordt vergeleken met de werkelijk opgestelde planning van MTL.

7.1 Planning MTL

In bijlagen 2 en 3 staan respectievelijk 20 exportorders en 20 importorders die MTL heeft uitgevoerd. Deze 40 orders zijn uitgevoerd door 20 vrachtwagens die elk één export- en één importorder hebben uitgevoerd.

De drie verschillende kleuren geven aan dat het om verschillende types vrachtwagens gaat die niet elkaars opdrachten kunnen uitvoeren. Hiernaast zijn de tijdvensters voor het laden en lossen van de verschillende klanten, de startlocaties van de verschillende vrachtwagens en de uren waarop de vrachtwagens beschikbaar worden bekend.

In vergelijking met de voorbeelden komen hier enkele extra eigenschappen van het praktijkprobleem aan het licht waarmee de methode rekening moet houden. Zo zijn er verschillende pickups nodig op dezelfde locatie. Dit is in tegenstelling tot de voorbeelden waarbij iedere klant een unieke pickuplocatie had. Hiernaast moeten ook de gewichten van δ_1 , δ_2 en δ_3 , in de voorbeelden (respectievelijk 5/9, 3/9 en 1/9) aangepast worden tot 8/12, 3/12 en 1/12 om tot een realistische planning te komen, dit bleek uit trial & error.

Zoals eerder gezegd geven de drie verschillende kleuren aan dat de opdrachten daar verschillende soorten vrachtwagens uitgevoerd moeten worden. Dit betekent in principe dat de methode voor drie losstaande routeplanningsproblemen gebruikt zal worden. Hieronder worden de stappen overlopen voor de "gele" opdrachten. Daarna wordt de volledige oplossing gegeven.

7.2 Toepassing methode

De methode wordt hier uitgevoerd voor de gele wagens. Om verwarring te voorkomen worden deze wagens in tabel 36 benoemd en wordt hun startlocatie gegeven. Indien er dus gesproken wordt over "wagen 1" gaat het om de wagen die in Zolder start, "wagen 2" start in Brugge enz.

Wagen	Startuur	Startlocatie
1	5	Zolder
2	6	Brugge
3	5	Zutendaal
4	10	Evergem
5	11	Wachtebeke
6	7	Mechelen
7	12	Evergem

Tabel 36 "Gele" wagens

De wagens krijgen een opdracht toegewezen wanneer ze vrijkomen. De eerste wagen die vrijkomt is wagen 1. De waarden van de gewogen som voor de verschillende pickuplocaties staan in tabel 37.

	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}	C_{ij}
Genk-Bielefeld	20	30	990	103.33
Zelzate-Bruehl	120	0	1020	165.00
Genk-Regensburg	20	30	450	58.33
Zelzate-Seelze	120	360	480	210.00
Zelzate-Paderborn	120	180	480	165.00
Antwerpen-Le Havre	70	120	540	121.67
Zelzate-Dudelange	120	0	1020	165.00

Tabel 37 Gewogen sommen voor wagen 1

De laagste waarde wordt bekomen voor "Genk-Regensburg". Echter, wagen 3, die in Zutendaal ook vrij is ligt dicht in de buurt van Genk 2. De methode stuurt wagen 3 dus naar "Genk-Regensburg". De laagste gewogen som van wagen 1 ligt dan bij "Genk-Bielefeld". Geen enkele andere wagen ligt dicht in de buurt van Genk, dus wordt wagen 1 naar "Genk-Bielefeld" gestuurd. Deze eerste iteratie van de methode zorgt voor de rittenplanning in tabel 38.

Wagen	Pickup	Levering
1	Genk	Bielefeld
3	Genk	Regensburg

Tabel 38 Invulling "gele" wagens na eerste iteratie

De volgende wagen die vrijkomt is wagen 2 in Brugge. De gewogen sommen voor de verschillende locaties staan in tabel 39.

	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}	C_{ij}
Zelzate-Bruehl	50	0	1020	118.33
Zelzate-Seelze	50	360	480	163.33
Zelzate-Paderborn	50	180	480	118.33
Antwerpen-Le Havre	90	30	450	105.00
Zelzate-Dudelange	50	0	1020	118.33

Tabel 39 Gewogen sommen voor wagen 2

De laagste waarde wordt bekomen voor "Antwerpen-Le Havre". Echter, indien een andere wagen na zijn huidige opdracht dicht in de buurt van Antwerpen ligt en nog op tijd is voor deze opdracht zal deze andere wagen naar "Antwerpen-Le-Havre" gestuurd worden. Wagen 6, die in Mechelen over een uur zal vrijkomen ligt dicht bij Antwerpen en zal hier dus naartoe gestuurd worden. Nu ligt de laagste gewogen som bij "Zelzate-Bruehl", "Zelzate-Paderborn" en "Zelzate-Dudelange". In principe moet nu gekeken worden of Evergem en Wachtebeke niet dicht liggen bij Zelzate en deze wagens de klanten nog op tijd kunnen bedienen. Dit is wel degelijk het geval maar de enige pickuplocatie waar wagen 2 nog naartoe gestuurd kan worden is Zelzate. Daarom kan er willekeurig gekozen worden tussen "Zelzate-Bruehl", "Zelzate-Paderborn" en "Zelzate-Dudelange". Er wordt gekozen om wagen 2 naar "Zelzate-Bruehl" te sturen. De huidige rittenplanning staat in tabel 40.

Wagen	Pickup	Levering
1	Genk	Bielefeld
2	Zelzate	Bruehl
3	Genk	Regensburg
6	Antwerpen	Le Havre

Tabel 40 Invulling "gele" wagens na tweede iteratie

De volgende wagen die vrijkomt is wagen 4 in Evergem. Deze wagen wordt naar Zelzate-Paderborn gestuurd. Opnieuw, de wagen in Wachtebeke ligt eigenlijk dichterbij maar aangezien Zelzate de enige overgebleven pickuplocatie is moet de controle op een dichtergelegen wagen niet gebeuren. Tabel 41 toont de gewogen sommen.

	d_{ij}	T_{ij}	v_{ij}	c_{ij}
Zelzate-Seelze	15	150	270	70.00
Zelzate-Paderborn	15	0	270	32.50
Zelzate-Dudelange	15	0	810	77.50

Tabel 41 Gewogen sommen voor wagen 4

De volgende iteraties voor de "gele" wagens zijn vanzelfsprekend. De exportorders die de methode heeft opgesteld staan in bijlage 4, de importorders in bijlage 5. De "gele" wagens 6 en 7 zijn hier respectievelijk wagen 17 en 18.

Het enige verschil met de planning opgesteld door MTL, weergegeven in bijlagen 2 en 3, is dat wagens 4 en 5 van route verwisseld zijn en wagens 7 en 10 van route verwisseld zijn. Deze routes hebben echter telkens dezelfde startlocatie dus deze wijziging heeft geen invloed gehad op het aantal kilometers. Wat de importorders betreft, deze worden zoals eerder gezegd pas opgezocht wanneer geweten is waar een exportorder naar toe gaat. Dit betekent dat de dispatchers op voorhand al bepalen welk importorder terug meegenomen zal worden door de uitgaande vrachtwagen. Dit wordt ook meteen duidelijk wanneer gekeken wordt naar de afstand tussen een locatie uit de kolom 'Levering (1)' en een locatie uit de kolom 'Pickup (2)' van twee verschillende rijen. De methode zal daarom niet gebruikt moeten worden voor het zoeken van importorders aangezien hier maar één locatie voor in aanmerking komt omwille van de afstand.

De uren waarop de wagens vrijkwamen zorgden ervoor dat aan ieder order voldaan werd. Door onvoorziene omstandigheden kan het echter ook voorkomen dat de starturen minder gunstig zijn en het niet vanzelfsprekend is om aan ieder order te voldoen. Om de methode te testen in deze situatie zal aan iedere wagen een willekeurig startuur gegeven worden tussen 8u en 20u. De volledige tabel met de nieuwe starturen staat in bijlage 6. De importorders staan hier niet bij omdat hun toewijzing al bepaald is bij de toewijzing van het exportorder. De oplossing voor de orders met deze nieuwe starturen staat in bijlage 7.

De methode vindt nu voor 4 wagens geen klant meer die dezelfde dag nog bedient kan worden. Indien enkel gekeken zou worden naar de dichtstbijzijnde klant zonder rekening te houden met de

urgentie van de orders wordt er voor 7 chauffeurs geen klant meer gevonden die dezelfde dag nog bediend kan worden. Deze opmerking wordt gemaakt om aan te tonen dat hoewel $\delta_3 = 1/12$ het nog steeds belangrijk is om rekening te houden met de urgentie van de orders.

7.3 Besluit

De rittenplanningsmethode levert een rittenplanning op die bijna volledig overeenkomt met de rittenplanning die opgesteld werd door MTL zelf. Er was geen verhoging van het aantal kilometers dat gereden moets worden maar er was wel een vermindering van de wachttijd van de chauffeurs.

De belangrijkste factor is de afstand. Ondanks het lage gewicht van δ_2 en δ_3 zijn deze twee nog steeds van belang als *tiebraker* en kunnen ze niet gewoon genegeerd worden. Dit werd aangetoond door het praktijkprobleem met willekeurige starturen op te lossen.

Bij deze toepassing van de methode is er willekeurig gekozen tussen klanten indien de locaties en de gewogen sommen hetzelfde waren. In de praktijk kan een meer berekende beslissing worden genomen op basis van het aantal resterende rij-uren van de chauffeur of individuele voorkeuren van chauffeurs. De methode kan hier geen rekening mee houden.

Het probleem dat MTL moet oplossen is simpeler dan de problemen die in de voorbeelden aan bod kwamen. MTL moet per dag maar één klant zoeken voor iedere vrachtwagen aangezien het om exportritten gaat die lang duren. De importrit die hiermee gepaard gaat moet niet bepaald worden door de methode aangezien deze speciaal wordt gezocht om in overeenstemming te zijn met de exportrit. Dit heeft gevolgen voor hoe de methode gebruikt kan worden. In de theoretische voorbeelden heeft de methode telkens een volledige planning opgesteld voor alle chauffeurs die alle klanten bedienden. Hiervoor was het vereist dat de methode perfect wist om hoe laat iedere chauffeur aankwam op een locatie of klaar was voor een nieuwe opdracht. Om een planning voor een volledige dag (of meerdere dagen) op te stellen is het dus nodig dat de verschillende aankomsttijden en tijden waarop een vrachtwagen vrijkomt voor alle klanten zeer nauwkeurig bepaald kan worden. In de praktijk is dit meestal niet mogelijk. Indien een aankomsttijd van een vrachtwagen verandert door onvoorziene omstandigheden zijn ook al zijn volgende tijden verkeerd en moet de planning dus volledig aangepast worden. De methode kan daarom ook op een andere manier gebruikt worden: laat deze een volgende klant voorstellen telkens wanneer een vrachtwagen effectief vrij is. Dit heeft tot gevolg dat enkel het moment waarop de vrachtwagen klaar is met zijn huidige klant bepaald moet worden en dus niet het moment waarop deze klaar is na bijvoorbeeld vijf opeenvolgende opdrachten. Hierdoor zijn de gegevens waarover de methode beschikt veel nauwkeuriger waardoor de planning van veel hogere kwaliteit is.

8. Conclusies & aanbevelingen voor verder onderzoek

8.1 Conclusies

Deze masterproef zocht naar een antwoord op de vraag: “*Welk algoritme is het meest geschikt om de rittenplanning van Multimodal Transports & Logistics op te stellen?*”. Om deze vraag te beantwoorden werd er eerst gezocht naar variabelen en beperkingen waarmee MTL rekening moet houden bij het opstellen van hun rittenplanning. De belangrijkste beperkingen waren de tijdvensters van de klanten, de laadcapaciteiten van de vrachtwagens, en de rij- en rusttijden van de chauffeurs.

Met deze factoren in het achterhoofd werd er gezocht naar een geschikte methode voor het opstellen van de rittenplanning. Hiervoor werd eerst een indeling gemaakt van verschillende soorten *vehicle routing problems* (VRPs), de problemen die een optimale route zoeken voor één of meerdere voertuigen, aangezien er een grote variatie is tussen VRPs zelf. Uit deze indeling bleek dat MTL te maken heeft met pickup-and-delivery problems. Een verder onderscheid in pickup-and-delivery problemen is dan weer mogelijk op basis van het type transportvraag. Meer bepaald ging het bij MTL om one-to-one problemen waarbij één enkel goed vervoerd moet worden naar één enkele klant. De vrachtwagen die het goed ophaalt vertrekt ook onmiddellijk naar de leverlocatie. Het is dus niet zo dat een wagen eerst verschillende goederen kan ophalen om deze vervolgens aan verschillende klanten te leveren.

Met het probleem duidelijk omschreven en geclassificeerd kon specifieker gezocht worden naar oplossingsmethoden. In het vierde hoofdstuk is eerst gezocht naar oplossingsmethoden voor dynamische problemen waarbij niet alle klantaanvragen op voorhand bekend zijn. Onder deze methoden zaten zowel praktische die reeds toegepast waren bij bedrijven, zoals de methode van Savelsbergh et al. (1998), als puur theoretische. Het probleem bij de praktische methodes was dat ze specifiek gemaakt waren voor het probleem dat ze probeerden op te lossen. Een omzetting voor het probleem van MTL was niet mogelijk. Bij de theoretische methodes was er het probleem dat ze ontwikkeld waren onder sterk vereenvoudigde assumpties die in de praktijk niet langer geldig zijn. Geen van deze methodes kwam dus in aanmerking. Verder zijn er nog oplossingsmethoden gevonden voor problemen waarbij er rekening werd gehouden met rij- en rusttijden, zoals Goel et al. (2010). Deze methodes waren echter zo complex dat besloten is om met deze beperking geen rekening te houden. Laadbeperkingen werden in dit hoofdstuk ook besproken. Uit het literatuuronderzoek bleek dat er hier ook gesofisticeerde manieren bestonden om rekening te houden met allerlei soorten ladingen. Voor MTL is het echter genoeg om enkel een onderscheid te maken tussen de verschillende wagens en daarom moet er met laadbeperkingen geen extra rekening gehouden worden. Verder werd in dit hoofdstuk bepaald wat de doelfunctie van de methode zou optimaliseren. Namelijk voldoen aan alle tijdvensters en het aantal gereden kilometers minimaliseren.

De gebruikte rittenplanningsmethode voor het probleem van MTL is een *nearest neighbour* methode die ook rekening houdt met tijdvensters. Enkel nearest neighbour wil zeggen dat de methode een vrijgekomen vrachtwagen gaat doorsturen naar de dichtstbijzijnde vrije klant. De volledige methode *nearest neighbour with time windows* houdt echter ook rekening met tijdvensters. De volgende klant van een chauffeur wordt bepaald door een gewogen som die is opgesteld uit: de afstand tot de volgende klant, de tijd tussen het einde van de huidige opdracht van de chauffeur en het moment

waarop hij zijn nieuwe opdracht kan starten, en de urgentie van het order. Op kleine theoretische voorbeelden levert deze methode goede resultaten mits de gewichten van de drie variabelen juist zijn ingesteld. Voor de beste resultaten wordt een hoger gewicht gegeven aan de factor "afstand naar de volgende klant" en het laagste gewicht aan "urgentie".

Deze methode had nog enkele tekortkomingen. Zo werd er niet vooruitgepland, het kan zijn dat een vrachtwagen doorgestuurd wordt naar een klant terwijl een andere vrachtwagen die later vrijkomt hier beter voor geplaatst is. Ook levert deze methode één oplossing waarna er niet meer naar verbeteringen van de oplossing wordt gezocht. Deze tekortkomingen zijn weggewerkt met de aanpassingen in hoofdstuk 6. De eerste aanpassing was dat wanneer de gewogen som een nieuwe klant heeft toegewezen aan een chauffeur, er gekeken wordt of er een andere chauffeur is die dichterbij deze klant is (of gaat zijn) en deze klant nog op tijd kan bedienen. Indien dit het geval is zal de chauffeur die dichterbij de klant ligt ernaartoe gestuurd worden en zal de verder afgelegen chauffeur een nieuwe klant toegewezen krijgen waarvoor dezelfde controle opnieuw gebeurt. Om naar verbeteringen van de oplossingen te zoeken wordt simulated annealing gebruikt waarbij willekeurige veranderingen in de routes van de chauffeurs gebeuren. Belangrijk bij simulated annealing is dat de begintemperatuur T niet te hoog is. Beide aanpassingen waren in staat om betere oplossingen te produceren.

Uiteindelijk is de methode ook toegepast op 40 orders van MTL. De methode genereerde ongeveer dezelfde rittenplanning als degene die de dispatchers van MTL hadden opgesteld. Het aantal afgelegde kilometers was hetzelfde voor de twee plannings. Simulated annealing is niet toegepast op deze planning omdat duidelijk was dat dit niet voor een betere oplossing ging zorgen. De manier waarop de methode het best gebruikt kan worden staat in hoofdstuk 7.

8.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

De rittenplanningsmethode die in deze masterproef is gemaakt is getest op een klein voorbeeld van de rittenplanning van MTL. Het is goed denkbaar dat deze methode soms onverwachte slechte resultaten oplevert wanneer ze toegepast wordt in de praktijk. Een opvolging van de resultaten is daarom noodzakelijk om aanpassingen te kunnen uitvoeren wanneer blijkt dat de geleverde resultaten minder zijn dan de verwachte resultaten. Hieraan verbonden is dat er door inzet in de praktijk wellicht nog belangrijke factoren waarmee rekening gehouden moet worden aan het licht zullen komen. Indien blijkt dat deze van grote invloed zijn op de resultaten zal de methode hier rekening mee moeten houden

Verder zijn er factoren, waarvan nu al is geweten dat ze van belang zijn, waar deze methode geen rekening mee houdt. Enkele belangrijke zijn de rij- en rusttijden van de chauffeurs en de persoonlijke voorkeuren van de chauffeurs. Zo kan het zijn dat sommige chauffeurs altijd dezelfde rit uitvoeren en daar niet van willen afwijken. Daar houdt deze methode uiteraard geen rekening mee. Het feit dat deze methode geen rekening houdt met rij- en rusttijden hoeft niet te betekenen dat deze methode niet ingezet kan worden in de praktijk. Wel is het zo dat de methode betere resultaten kan opleveren indien hier rekening mee gehouden kan worden. Zoals eerder gezegd is dat hier niet gebeurt omwille van de complexiteit. Verder onderzoek kan dit wel proberen te implementeren.

Referenties

- Battara, M., Monaci, M., Vigo, D., (2009). An adaptive guidance approach for the heuristic solution of a minimum multiple trip vehicle routing problem. *Computer & Operations Research* (pp. 3041-3050)
- Bektas, T., Laporte, G., (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B* (pp. 1232-1250)
- Bent, R., Van Hentenryck, P., (2006). A two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problems with time windows. *Computers & Operations Research* (pp. 875-893)
- Berbeglia, G., Cordeau, J., Laporte, G., (2010). Dynamic pickup and delivery problems. *European Journal of Operational Research* (pp. 8-15)
- Bräysy, O., Gendreau, M., (2002). Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms. *Transportation Science* (pp. 104 – 118)
- Clarke, G., Wright, J., (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research* (pp. 568-581)
- Clausen, J., (1999). Branch and Bound Algorithms – Principles and Examples. *Department of Computer Science, University of Copenhagen*
- Cordeau, J., Gendreau, M., Laporte, G., (1997). A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi-Depot Vehicle Routing Problems. *Networks* (pp. 105-119)
- Cordeau, J., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J., Semet, F., (2002). A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society* (pp. 512-522)
- Dantzig, G., Ramser, H., (1959). The truck dispatching problem. *Management Science* (pg.80)
- Drexl, M., (2012). Rich vehicle routing in theory and practice. *Logistics Research* (pp. 47-63)
- Dror M., Trudeau, P., (1989). Savings by Split Delivery Routing. *Centre de recherche sur les transports* (pp. 141-145)
- Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J., Séguin, R., (2006). Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries. *Transportation Research Part C* (pp. 157-174)
- Goel, A., (2010). Truck Driver Scheduling in the European Union. *Transportation Science* (pp. 429-441)
- Hillier, F., Lieberman, G., (2010). Introduction to Operations Research. 9th ed. NY: McGraw-Hill
- Iori, M., Martello, S., (2010). Routing problems with loading constraints. *Top* (pp. 4-27)
- Kok, A., Meyer, C., Kopfer, H., Schutten, J., (2010). A Dynamic Programming Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and European Community Social Legislation. *Transportation Science* (pp. 442-454)

- Lau, H., Liang, Z., (2002). Pickup and Delivery Problem with Time Windows, Algorithms and Test Case Generation. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*. (pp. 455-472)
- Li, H., Lim, A., (2003). A Metaheuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*
- Mitrovic-Minic, S., Krishnamurti, R., Laporte, G., (2004). Double-horizon based heuristics for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Research Part B* (pp. 669-685)
- Mitrovic-Minic, S., Laporte, G., (2004). Waiting strategies for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Research Part B* (pp. 635-655)
- Nanry, W., Barnes, W., (2000). Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search. *Transportation Research Part B* (pp. 107-121)
- Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., Bräysy, O., (2006). Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications* (pp. 223-232)
- Parragh, S., Doerner, K., Hartl, R., (2008). A survey on pickup and delivery problems, Part II: Transportation between pickup and delivery locations. *Journal für Betriebswirtschaft* (pp. 81-117)
- Pollaris, H., Braekers, K., Caris, A., Janssens, G., Limbourg, S., (2015). Vehicle routing problems with loading constraints: state-of-the-art and future directions. *OR Spectrum* (pp. 297-330)
- Psaraftis, H., Wen, M., Kontovas, C., (2015). Dynamic Vehicle Routing Problems: Three Decades and Counting. *Networks* (pp. 3-31)
- Ropke, S., Pisinger, D., (2006). An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Transportation Science* (pp. 455-472)
- Savelsbergh, M., Sol, M., (1998). DRIVE: Dynamic Routing of Independent Vehicles. *Operations Research* (pp. 474-490)
- Solomon, M., (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research* (pp. 254-265)
- Toth, P., Vigo, D., (2014). *Vehicle Routing Problems, Methods, and Applications*. 2nd ed. MOS-SIAM

Bijlagen

Minuut	Actie
0	A naar pickup 3; B naar pickup 10; C naar pickup 7; D naar pickup 1
5	B laadt bij 10
6	A laadt bij 3
11	C laadt bij 7
15	B naar levering 10
16	A naar levering 3
18	D laadt bij 1
21	C naar levering 7
28	D naar levering 1
32	A lost bij 3
33	C lost bij 7
35	D lost bij 1
42	A naar pickup 2
43	C naar pickup 6
45	D naar pickup 5; B lost bij 10
49	D laadt bij 5
55	B naar pickup 4
59	D naar levering 5
63	C laadt bij 6
66	A laadt bij 2
73	C naar levering 6
76	A naar levering 2
83	B laadt bij 4
85	D lost bij 5
89	C lost bij 6
93	A lost bij 2; B naar levering 4
95	D naar pickup 8
99	C naar pickup 9
103	A is klaar
115	C laadt bij 9
116	B lost bij 4
120	D laadt bij 8
125	C naar levering 9
126	B is klaar
130	D naar levering 8
152	C lost bij 9
162	D lost bij 8; C is klaar
172	D is klaar

Bijlage 1 Volledig uitgewerkte heuristiek voorbeeld 5.2

Wagen	start	Startlocatie	Pickup(1)	Laaduren	Levering(1)	losuren
1	5	Zolder	B - 36 Genk	6;22	D - 33 Bielefeld	6;21
2	6	Brugge	B - 90 Zelzate	24;24	D- 50 Bruehl	8;15
3	5	Zutendaal	B - 36 Genk	6;13	D - 93 Regensburg	8;12
4	10	Evergem	B - 90 Zelzate	13;15	D - 30 Seelze	6;19
5	11	Wachtebeke	B - 90 Zelzate	10;15	D - 33 Paderborn	6;21
6	12	Beringen	B - 36 Genk	14;22	D - 74 Sersheim	8;15
7	10	Zolder	B- 36 Genk	10;14	D - 63 Buerstadt	8;14
8	12	Turnhout	B - 20 Antwerpen	8;15	FR - 25 Valentigney	6
9	6	Beringen	B - 35 Zonhoven	5;22	FR - 13 Fuveau	6;13
10	6	Maastricht	B - 36 Genk	6;22	D - 44 Dortmund	8;14
11	14	Poperinge	B - 90 Zelzate	15;16	D - 59 Werl	8;21
12	6	Brussel	B - 90 Zelzate	6;22	D - 33 Delbrueck	8;14
13	8	Hoogstraten	B- 20 Antwerpen	8;15	FR - 55 Ancerville	7;15
14	6	Spiere	B - 90 Zelzate	24;24	D - 57 Siegen	8;17
15	8	Angleur	B -44 Flemalle	8;15	D - 09 Lichtenstein	9;17
16	4	Hasselt	B - 35 Zonhoven	5;22	D - 38 Goslar	11
17	7	Mechelen	B - 20 Antwerpen	8;15	FR - 76 Le havre	8;15
18	12	Evergem	B - 90 Zelzate	24;24	LU- 3 Dudelange	8;22
19	8	Antwerpen	B -20 Antwerpen	8;15	FR - 63 Issoire	8;15
20	6	Gingelom	B- 34 Landen	6;14	D - 56 Koblez	8;22

Bijlage 2 Exportorders MTL opgesteld door MTL

Wagen	Pickup(2)	laaduren	Levering(3)	losuren
1	D - 33 Gutersloh	11	B - 17 Mollem	8;14
2	D - 52 Kreuzau	6;22	B - 91 Kallo	8;15
3	D - 90 Langenzenn	8;15	B- 3945 Ham	8;15
4	D - 31 Obernkirchen	6;22	B - 30 Leuven	8
5	D - 59 Erwitte	6;21	B - 32 Langdorp	6;18
6	D - 74 Eibensbach	8;14	B - 25 Kontich	8;15
7	D - 63 Bessenbach	8;16	B- 98 Aalter	9;15
8	FR - 68 Niederbrueck	8;14	B - 20 Antwerpen	8;15
9	FR - 13 Fos sur mer	8;12	B - 90 Zelzate	24;24
10	D - 44 Dortmund	7;17	B -20 Antwerpen	8;15
11	D - 59 Beckum	6;21	B - 36 Maasmechelen	6;18
12	D - 59 Lippstadt	8;15	B - 22 Herentals	8;14
13	FR - 55 Contrisson	6;21	B - 24 Geel	7;15
14	D - 57 Kreutztal	8;15	B - 20 Antwerpen	8;15
15	D - 07 Rudolstadt	7;17	FR - 62 Lumbres	6;15
16	D- 37 Herzberg	8;22	B - 28 Mechelen	8;17
17	FR - 76 Yainville	8;15	B - 35 Ham	9;15
18	FR - 57 Florange	6;21	B - 24 Geel	6;22
19	FR - 63 Volvic	6;15	B - 83 Zeebrugge	8;15
20	D - 56 Neuwied	8;17	B - 25 Duffel	10;17

Bijlage 3 Importorders opgesteld door MTL

Wagen	start	Startlocatie	Pickup (1)	Levering (1)
1	5	Zolder	B - 36 Genk	D - 33 Bielefeld
2	6	Brugge	B - 90 Zelzate	D- 50 Bruehl
3	5	Zutendaal	B - 36 Genk	D - 93 Regensburg
4	10	Evergem	B - 90 Zelzate	D - 33 Paderborn
5	11	Wachtebeke	B - 90 Zelzate	D - 30 Seelze
6	12	Beringen	B - 36 Genk	D - 74 Sersheim
7	10	Zolder	B- 36 Genk	D - 44 Dortmund
8	12	Turnhout	B - 20 Antwerpen	FR - 25 Valentigney
9	6	Beringen	B - 35 Zonhoven	FR - 13 Fuveau
10	6	Maastricht	B - 36 Genk	D - 63 Buerstadt
11	14	Poperinge	B - 90 Zelzate	D - 59 Werl
12	6	Brussel	B - 90 Zelzate	D - 33 Delbrueck
13	8	Hoogstraten	B- 20 Antwerpen	FR - 55 Ancerville
14	6	Spiere	B - 90 Zelzate	D - 57 Siegen
15	8	Angleur	B -44 Flemalle	D - 09 Lichtenstein
16	4	Hasselt	B - 35 Zonhoven	D - 38 Goslar
17	7	Mechelen	B - 20 Antwerpen	FR - 76 Le havre
18	12	Evergem	B - 90 Zelzate	LU- 3 Dudelange
19	8	Antwerpen	B -20 Antwerpen	FR - 63 Issoire
20	6	Gingelom	B- 34 Landen	D - 56 Koblez

Bijlage 4 Exportorders opgesteld door methode

Wagen	Pickup (2)	Levering (2)
1	D - 33 Gutersloh	B - 17 Mollem
2	D - 52 Kreuzau	B - 91 Kallo
3	D - 90 Langenzenn	B- 3945 Ham
4	D - 59 Erwitte	B - 32 Langdorp
5	D - 31 Obernkirchen	B - 30 Leuven
6	D - 74 Eibensbach	B - 25 Kontich
7	D - 44 Dortmund	B -20 Antwerpen
8	FR - 68 Niederbrueck	B - 20 Antwerpen
9	FR - 13 Fos sur mer	B - 90 Zelzate
10	D - 63 Bessenbach	B- 98 Aalter
11	D - 59 Beckum	B - 36 Maasmechelen
12	D - 59 Lippstadt	B - 22 Herentals
13	FR - 55 Contrisson	B - 24 Geel
14	D - 57 Kreutztal	B - 20 Antwerpen
15	D - 07 Rudolstadt	FR - 62 Lumbres
16	D- 37 Herzberg	B - 28 Mechelen
17	FR - 76 Yainville	B - 35 Ham
18	FR - 57 Florange	B - 24 Geel
19	FR - 63 Volvic	B - 83 Zeebrugge
20	D - 56 Neuwied	B - 25 Duffel

Bijlage 5 Importorders opgesteld door methode

Wagen	startuur	Startlocatie	Pickup(1)	Laaduren	Levering(1)
1	14	Zolder	B - 36 Genk	6;22	D - 33 Bielefeld
2	14	Brugge	B - 90 Zelzate	24;24	D- 50 Bruehl
3	8	Zutendaal	B - 36 Genk	6;13	D - 93 Regensburg
4	19	Evergem	B - 90 Zelzate	13;15	D - 30 Seelze
5	13	Wachtebeke	B - 90 Zelzate	10;15	D - 33 Paderborn
6	11	Beringen	B - 36 Genk	14;22	D - 74 Sersheim
7	16	Zolder	B- 36 Genk	10;14	D - 63 Buerstadt
8	20	Turnhout	B - 20 Antwerpen	8;15	FR - 25 Valentigney
9	17	Beringen	B - 35 Zonhoven	5;22	FR - 13 Fuveau
10	20	Maastricht	B - 36 Genk	6;22	D - 44 Dortmund
11	18	Poperinge	B - 90 Zelzate	15;16	D - 59 Werl
12	12	Brussel	B - 90 Zelzate	6;22	D - 33 Delbrueck
13	13	Hoogstraten	B- 20 Antwerpen	8;15	FR - 55 Ancerville
14	9	Spiere	B - 90 Zelzate	24;24	D - 57 Siegen
15	18	Angleur	B -44 Flemalle	8;15	D - 09 Lichtenstein
16	10	Hasselt	B - 35 Zonhoven	5;22	D - 38 Goslar
17	18	Mechelen	B - 20 Antwerpen	8;15	FR - 76 Le havre
18	19	Evergem	B - 90 Zelzate	24;24	LU- 3 Dudelange
19	17	Antwerpen	B -20 Antwerpen	8;15	FR - 63 Issoire
20	12	Gingelom	B- 34 Landen	6;14	D - 56 Koblez

Bijlage 6 Orders met nieuwe starturen

Wagen	Startlocatie	Pickup	Levering
1	Zolder	B - 36 Genk	D - 33 Bielefeld
2	Brugge	B - 90 Zelzate	D - 30 Seelze
3	Zutendaal	B - 36 Genk	D - 93 Regensburg
4	Evergem	B - 90 Zelzate	D- 50 Bruehl
5	Wachtebeke	B - 90 Zelzate	D - 33 Paderborn
6	Beringen	B - 36 Genk	D - 63 Buergrstadt
7	Zolder	B - 35 Zonhoven	FR - 13 Fuveau
8	Turnhout	/	/
9	Beringen	B - 36 Genk	D - 74 Sersheim
10	Maastricht	B - 36 Genk	D - 44 Dortmund
11	Poperinge	/	/
12	Brussel	B - 90 Zelzate	D - 33 Delbrueck
13	Hoogstraten	B- 20 Antwerpen	FR - 55 Ancerville
14	Spiere	B - 90 Zelzate	D - 57 Siegen
15	Angleur	B - 35 Zonhoven	D - 38 Goslar
16	Hasselt	B -44 Flemalle	D - 09 Lichtenstein
17	Mechelen	/	/
18	Evergem	B - 90 Zelzate	LU- 3 Dudelange
19	Antwerpen	/	/
20	Gingelom	B- 34 Landen	D - 56 Koblez

Bijlage 7 Oplossing voor nieuwe starturen

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
**Analyse en optimalisatie van de rittenplanning bij Multimodal Transports
& Logistics**

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur-technologie-, innovatie- en milieumanagement**
Jaar: **2017**

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,

Houberechts, Kaj

Datum: **31/05/2017**