

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

Masterproef

*Uitdagingen voor het beheer van lege
containertransporten*

Promotor :
Prof. dr. An CARIS

Copromotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Aline Croonen

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

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

Masterproef

*Uitdagingen voor het beheer van lege
containertransporten*

Promotor :
Prof. dr. An CARIS

Copromotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Aline Croonen

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

Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn studies handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management en logistiek. Doorheen mijn studies en bij het vervolledigen van deze masterproef heb ik de kans gekregen om bij te leren, mijn interesses te verruimen en te ontdekken wat ik graag doe. De keuze voor het onderwerp van deze masterproef berustte dan ook op mijn interesse die ik doorheen mijn studies heb verworven voor logistieke en analytische problemen. Toch vereiste deze masterproef naast heel wat inzet, de steun, begeleiding en inzicht van heel wat anderen. Ik zou dan ook graag in dit voorwoord deze mensen willen bedanken.

In het bijzonder gaat mijn dank uit naar mijn promotor dr. An Caris voor haar deskundige begeleiding, advies en inspiratie. Dhr. Kris Braekers, om telkens de tijd te nemen mijn vragen te beantwoorden en waardevolle inzichten in het probleem rond lege containertransporten aan te reiken. Heel wat interessante ideeën zou ik niet hebben kunnen uitvoeren zonder zijn hulp. Ook copromotor dr. Katrien Ramaekers zou ik graag willen bedanken voor de kritische feedback tijdens het masterproefseminarie.

Verder zou ik graag iedereen willen bedanken die mij tijdens mijn studies onvoorwaardelijk gesteund heeft. Hierbij denk ik in het bijzonder aan mijn ouders, die ik wil bedanken voor de financiële steun die ik zomaar gekregen heb om mijn studies tot een goed einde te brengen. Verder hebben zij mij telkens gemotiveerd elke aangeboden kans met beide handen te grijpen. Mijn zus wil ik bedanken om naast een geweldige zus ook een goede vriendin te zijn. Mijn medestudente en beste vriendin Hanne om tijdens momenten dat ik het moeilijk had steeds naar mij te luisteren. Bovendien zorgde zij er telkens voor dat naar de les gaan geen opgave werd en dat samen groepswerken maken leuk was. Daarnaast wil ik haar ook bedanken voor de ontelbare leuke momenten. Niet veel mensen kennen het geluk om zo'n goede vriendin te hebben. Tot slot wil ik mijn vriend bedanken om er voor mij te zijn wanneer dat nodig is. Samen gaan we een mooie toekomst tegemoet.

Deze masterproef geeft een overzicht van het verrichte onderzoek naar dit onderwerp en gaat na op welke manier lege containertransporten in het hinterland beter georganiseerd kunnen worden. Onderzoek binnen dit vakgebied blijft belangrijk. De logistieke sector staat namelijk onder een enorme druk om klanten zo goed mogelijk te bedienen op de meest efficiënte manier.

Aline Croonen
mei 2012, Kermt

Samenvatting

Lege containertransporten in het hinterland worden op dit ogenblik vaak niet op de meest efficiënte wijze georganiseerd. Hierdoor is het aantal lege containerverplaatsingen hoger dan nodig om klanten een optimale dienstverlening te geven. Bovendien zorgt de jaarlijkse stijging in het gebruik van containers ervoor dat het aantal lege containertransporten in het hinterland blijft toenemen. Deze lege containerverplaatsingen in het hinterland genereren heel wat kosten voor transportbedrijven. Verder zorgt elk onnodig containertransport voor een verhoging van de negatieve gevolgen van wegtransport. Natuurlijk zullen transportbedrijven deze transporten nooit helemaal kunnen vermijden. Ze kunnen echter wel hun uiterste best doen om deze lege containertransporten zo veel mogelijk te beperken. Het doel van deze masterproef is dan ook om na te gaan welke modellen gebruikt kunnen worden om de dagelijkse herpositionering van lege containers in het hinterland te plannen.

In eerste instantie wordt nagegaan welke strategieën, om lege containers in het hinterland efficiënter te verplaatsen, in de wetenschappelijke literatuur worden voorgesteld. De strategieën die in hoofdstuk twee van deze masterproef worden beschreven, omvatten directe wissels, het bouwen van binnenlandse containerdepots, substitutie tussen verschillende types containers en het gebruik van opvouwbare containers. Vooral het toevoegen van directe wissels zou de mogelijkheid bieden om containers efficiënter te verplaatsen tegen een relatief lage investeringskost: bij een directe wissel worden containers – na het uitladen ervan op de site van de klant – niet teruggebracht naar de haven, maar verplaatst naar een nieuwe klant die een lege container nodig heeft. Als transportbedrijven gebruik zouden maken van deze directe wissel zou telkens één lege containerrit uitgespaard kunnen worden. Toch wordt zo'n directe wissel vaak bekritiseerd omdat de implementatie ervan in de praktijk, heel wat extra werk met zich mee zou brengen. Bovendien zijn rederijen vaak niet te winnen voor dit initiatief. (Jula et al., 2006)

Om de efficiëntie van dergelijke strategieën na te gaan en snel de meest efficiënte dagelijkse planning voor containertransporten op te stellen, maken beslissingsmakers gebruik van operationele planningsmodellen. Tot voor kort werden deze operationele planningsmodellen steeds opgesplitst in twee optimalisatiemodellen: een containerallocatie- en een rittenplanningsmodel. Een containerallocatiemodel bepaalt hoe lege containers optimaal verdeeld kunnen worden, zodat zowel aan gekende als aan voorspelde vraag voldaan kan worden. Vervolgens wordt een rittenplanningsmodel gebruikt om de vooropgestelde containertransporten volgens de meest efficiënte routes te transporteren. (Crainic et al., 1993b) In hoofdstuk drie van deze masterproef worden de belangrijkste containerallocatiemodellen uit de wetenschappelijke literatuur rond lege containertransporten

beschreven. Verder wordt het rittenplanningsmodel, dat gebruikt wordt door Braekers et al. (2009, 2012), uitvoerig toegelicht.

De laatste jaren verschuift de focus van deze sequentiële oplossingsaanpak naar het oplossen van een integratiemodel. Bij geïntegreerde optimalisatie wordt het operationele planningsmodel niet meer verdeeld in twee deelmodellen: de optimale verdeling van lege containers wordt nu gelijktijdig met de routes bepaald. (Braekers et al., 2012) In het laatste deel van hoofdstuk drie worden de integratiemodellen, voorgesteld in Deidda et al. (2008), Huth en Mattfeld (2009), Zhang et al. (2009), Zhang et al. (2010) en Braekers et al. (2012), kort samengevat. Hoewel de integratiemethode complexer is, zou deze tot betere resultaten leiden dan de sequentiële oplossingsaanpak (Braekers et al., 2012).

Om het effect van de gebruikte oplossingsmethode op de resultaten van operationele planningsmodellen na te gaan, wordt in hoofdstuk vier het containerallocatie-, rittenplannings- en integratiemodel, voorgesteld door Braekers et al. (2012), gebruikt. Deze recente modellen die werden beschreven in hoofdstuk drie, omvatten de mogelijkheid om een directe wissel uit te voeren en de resultaten van de sequentiële en integratiemethode te evalueren. Dit experiment toont aan dat, wanneer een directe wissel toegelaten is, de geïntegreerde oplossingsaanpak tot significant betere (d.i. lagere) resultaten leidt dan de sequentiële oplossingsmethode. Dit zowel op het vlak van afgelegde afstand als op het vlak van het aantal ingezette voertuigen. Indien een directe wissel niet toegelaten is, neemt de efficiëntie van de geïntegreerde oplossingsaanpak af: de integratiemethode doet het in dat geval enkel op het vlak van afgelegde afstand, significant beter.

Tevens wordt in hoofdstuk vier het effect van een directe wissel op de resultaten van operationele planningsmodellen nagegaan. Hierbij wordt opnieuw gebruik gemaakt van de modellen voorgesteld door Braekers et al. (2012). Om een realistisch beeld te schetsen van de efficiëntie van een directe wissel, wordt voor elke directe wissel vijftien minuten extra tijd gegeven. Vijftien minuten extra is in de meeste gevallen genoeg tijd om het extra werk, gerelateerd aan een directe wissel, uit te voeren. Resultaten tonen aan dat een directe wissel tussen import- en exportklant – zelfs indien rekening gehouden wordt met het extra werk gerelateerd aan zo'n directe wissel – tot significant betere resultaten leidt dan wanneer geen directe wissel mag uitgevoerd worden. Dit voordeel van een directe wissel ten opzichte van geen directe wissel verkleint drastisch wanneer de tijd, nodig om het extra werk uit te voeren, zou oplopen tot dertig minuten. Verwacht wordt echter dat de benodigde tijd onder normale omstandigheden ruim onder dertig minuten zal blijven.

Uit deze masterproef kan geconcludeerd worden dat om de dagelijkse herpositionering van lege containers in het hinterland te plannen, integratiemodellen overwegend tot significant

betere resultaten leiden dan sequentiële modellen. Daarnaast kan besloten worden dat het toelaten van een directe wissel in een operationeel planningsmodel tot significant betere resultaten leidt dan wanneer een directe wissel niet is toegelaten. Tot slot kan uit de resultaten van het praktijkonderzoek opgemerkt worden, dat de efficiëntste dagelijkse planning voor (lege) containertransporten opgesteld wordt met behulp van een integratiemodel waarbij de mogelijkheid om een directe wissel uit te voeren, toegelaten is. Dit model leidt in het praktijkonderzoek gemiddeld tot betere resultaten dan modellen waarbij geen directe wissel toegelaten is of de sequentiële oplossingsmethode gehanteerd wordt. Dit zowel op het vlak van het aantal ingezette voertuigen als op het vlak van de totale afgelegde afstand.

Inhoudsopgave

Woord vooraf

Samenvatting

Inhoudsopgave

Lijst van figuren

Lijst van tabellen

1	Probleemstelling en onderzoekopzet	1
1.1	Omschrijving en situering van het praktijkprobleem	1
1.2	Centrale onderzoeksvraag	3
1.3	Deelvragen	4
1.4	Definitie van regionaal herpositioneren van lege containers	5
1.5	Verschil tussen transportbedrijf en rederij	5
1.6	Beschrijving en verantwoording van de onderzoeksmethode	6
2	Efficiënte herpositionering van lege containers	9
2.1	Hergebruiken van lege containers	9
2.1.1	Directe wissel tussen importeur en exporteur	9
2.1.2	Binnenlandse containerdepots	10
2.1.3	Moeilijkheden bij het hergebruik van lege containers	11
2.2	Containerssubstitutie	12
2.3	Opvouwbare containers	13
3	Planningsmodellen	15
3.1	Strategisch, tactisch en operationeel planningsniveau	15
3.2	Strategisch planningsmodel	18
3.3	Tactisch planningsmodel	19
3.4	Operationele planningsmodellen	19
3.4.1	Containerallocatiemodellen	19
3.4.2	Rittenplanningsmodellen	24
3.4.3	Sequentiële optimalisatie van operationele planningsproblemen	29
3.4.4	Geïntegreerde optimalisatie van operationele planningsproblemen	32

3.4.5	Vergelijking tussen sequentiële en geïntegreerde optimalisatie	36
4	Praktijkstudie	37
4.1	Deterministic annealing	37
4.1.1	Werking van het deterministic annealing algoritme	37
4.1.2	Definiëren van de initiële oplossing	40
4.1.3	Werking van de lokale zoekoperatoren	40
4.2	Effect van de oplossingsaanpak en een directe wissel	44
4.2.1	Opzet en robuustheid van het experiment.....	44
4.2.2	Experimentele resultaten	46
4.2.2.1	Overzicht resultaten	46
4.2.2.2	Sequentiële versus geïntegreerde oplossingsmethode	47
4.2.2.3	Directe wissel versus geen directe wissel.....	49
4.2.2.4	Invloed van de factoren	50
4.2.2.5	Kwaliteit van de oplossingen.....	52
4.2.3	Hypothesetest	54
4.2.4	Conclusie	58
4.3	Praktische implementatie van een directe wissel	59
4.3.1	Opzet van het experiment.....	59
4.3.2	Experimentele resultaten	61
4.3.3	Verdubbeling van de extra tijd.....	63
4.3.4	Conclusie	65
5	Algemene conclusies en verder onderzoek	67
	Lijst van geraadpleegde werken	69
	Bijlagen	73

Lijst van figuren

1	Import- en exportbewegingen	2
2	Werking van een directe wissel	9
3	Gebruik van een binnenlands containerdepot i.p.v. het havendepot.....	10
4	Aanbieden van lege containers op Eurotranscon.com.....	12
5	Eén 'gewone' container versus vier opvouwbare containers	13
6	Overzicht planningsniveaus en -modellen.....	17
7	Relaties tussen onderlinge rittenplanningsproblemen.....	25
8	Vergelijking tussen TSP, FT-VRPPD en de uitvoering van transporttaken in een FT-VRPPD.....	26
9	Voorbeeld van een FT-VRPPD geformuleerd als TSP	28
10	Schematische voorstelling van de gegevens en het fysieke netwerk	30
11	Oplossing van het containerallocatieprobleem.....	31
12	Oplossing van het rittenplanningsmodel	31
13	Oplossing van het geïntegreerde model	32
14	Werkwijze van een klassieke heuristiek.....	37
15	Werkwijze van een metaheuristiek	38
16	Voorbeeld van een 'relocate' operator	41
17	Voorbeeld van een 'swap' operator	42
18	Voorbeeld van een '2-opt*' operator.....	43
19	Voorbeeld van een zoekoperator om het aantal voertuigen te verlagen	44
20	Oplossing van het geïntegreerde model zonder directe wissel	49

Lijst van tabellen

1	Overzicht containerallocatiemodellen	20
2	Notatie per deelverzameling van N	34
3	Berekening van dij	35
4	Een 2 ⁴ -factorieel ontwerp	46
5	Vergelijking van de gemiddelde resultaten	46
6	Vergelijken van de sequentiële en geïntegreerde oplossingsaanpak	47
7	Vergelijking zonder directe wissel en met directe wissel	49
8	Hoofdeffecten (%) van factoren F1 t.e.m. F4 op het aantal voertuigen	50
9	Hoofdeffecten (%) van factoren F1 t.e.m. F4 op de afgelegde afstand	50
10	Fragmentweergave van de berekende ondergrenzen	53
11	Gemiddeld verschil tussen de gevonden oplossing en de ondergrens	54
12	Overzicht van de resultaten van de Wilcoxon rangtekenprocedure	57
13	Vergelijking van de gemiddelde resultaten	61
14	Vergelijking zonder directe wissel en met directe wissel	62
15	Vergelijking van de gemiddelde resultaten	64
16	Vergelijking zonder directe wissel en met directe wissel	65

Hoofdstuk 1: Probleemstelling en onderzoeksopzet

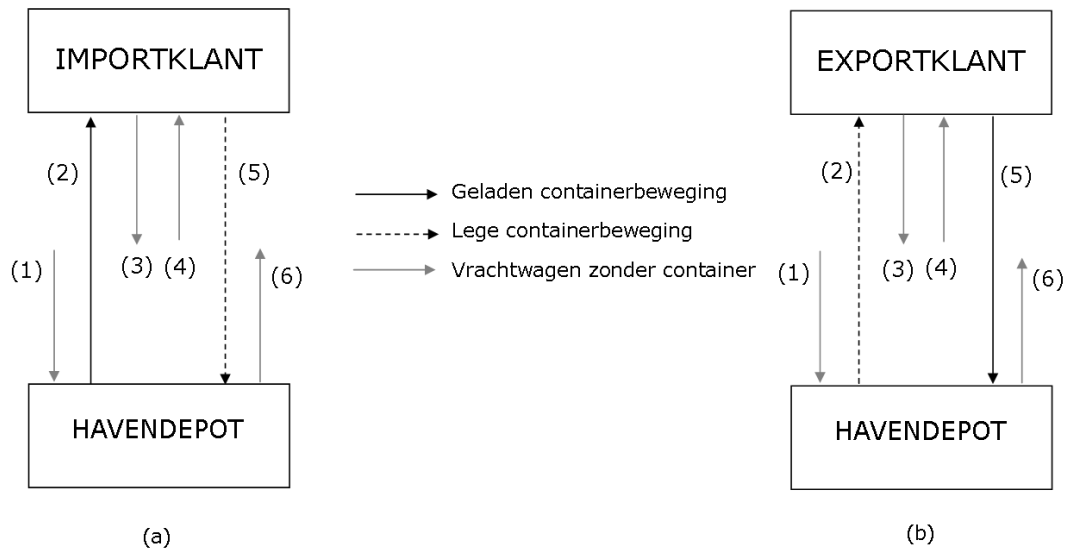
1.1 Omschrijving en situering van het praktijkprobleem

De voorbije decennia deed de containertrafiek het uitstekend. Zo behandelde de haven van Antwerpen van januari tot juni 2010 iets meer dan vier miljoen containers (uitgedrukt in standaardcontainers). Hiermee is Antwerpen de tweede belangrijkste containerhaven van Europa. ("Containertrafiek in Antwerpse haven stijgt twintig procent", 2010) Bovendien mag volgens Coeck et al. (2006) aangenomen worden dat de containerisatie tot 2025 jaarlijks met gemiddeld zes procent zal toenemen.

Volle containers die toekomen in de haven moeten echter ook op hun plaats van bestemming geraken. In de meeste gevallen worden containertransporten in het hinterland georganiseerd zoals schematisch wordt weergegeven in figuur 1 (a): vrachtwagens halen volle containers op (1) en brengen ze vervolgens naar importklanten verspreid in het hinterland van de haven (2). Importklanten zijn klanten van transportbedrijven die goederen geïmporteerd hebben en waarvoor een volle container in het havendepot wacht. Na het afleveren van een volle container bij een importklant vertrekt de vrachtwagen – tenzij op dat moment bij de importklant een lege container klaarstaat – zonder container naar het vrachtwagendepot of naar een volgende taak (3). Indien op dat moment wel een lege container bij de importklant beschikbaar is, laadt de vrachtwagen deze container op en wordt de container naar het havendepot gebracht (5). (Jula et al., 2006) Daarenboven dient de net afgezette volle container door de importklant vervolgens zo snel mogelijk leeggemaakt te worden. De rederij eist namelijk dat (een) container(s) binnen een bepaalde tijdslimiet weer terug moet(en) keren naar de haven. Dit om de controle over deze containers niet te verliezen. (Theofanis en Boile, 2008) Hierdoor wordt de kans om een lege container bijvoorbeeld naar een exportklant in de buurt te brengen, zeer klein. Dit zorgt ervoor dat vrachtwagens na het ophalen ervan met een lege container, moeten terugkeren naar de haven (resp. (4) en (5)) (Ooms, 2009). Na het afleveren van de lege container in het havendepot vertrekt de vrachtwagen opnieuw naar het vrachtwagendepot of naar een volgende taak (6) (Jula et al., 2006).

Net het omgekeerde geldt voor bedrijven die willen exporteren. De huidige organisatie van containertransporten voor deze exportklanten wordt schematisch weergegeven in figuur 1 (b): een vrachtwagen haalt een lege container op (1) en brengt deze naar de exportklant (2). Indien – op dat moment – reeds een volle container klaarstaat, neemt de vrachtwagen deze weer mee (5). Vervolgens vertrekt de vrachtwagen na het afleveren van de volle

container aan de haven naar het vrachtwagendepot of – indien nodig – naar een volgende taak (6). Wanneer geen volle container beschikbaar is, vertrekt de vrachtwagen zonder container naar het vrachtwagendepot of naar een volgende taak (3). Eens de afgeleverde lege container volgeladen is, haalt een vrachtwagen de volle container op (4) en brengt deze naar de haven (5). Na het afleveren van de volle container in het havendepot, vertrekt de vrachtwagen naar het vrachtwagendepot of naar een nieuwe taak (6). (Jula et al., 2006)



Figuur 1: Import- en exportbewegingen (uit Jula et al., 2006)

Uit het bovenstaande kan afgeleid worden dat transportbedrijven – in de huidige praktijk – per volle container ook vaak één lege container transporteren. Meer concreet wil dit zeggen dat ongeveer vijftig procent van de containerverplaatsingen lege containerverplaatsingen zijn. (Boni, 2009) Bovendien zorgt de jaarlijkse stijging in het gebruik van containers ervoor dat het aantal lege containertransporten in het hinterland blijft toenemen. Deze lege containerverplaatsingen zijn onder meer het gevolg van een gebrek aan evenwicht in de handel. Bij evenwicht zouden import en export in balans zijn waardoor het aantal aangekregen lege containers gelijk zou zijn aan het aantal verstuurde lege containers. Dit is helaas niet het geval: klanten die meer exporteren dan importeren hebben een tekort aan lege containers. Om aan de vraag van lege containers te kunnen blijven voldoen, moeten transportbedrijven regionaal lege containers herpositioneren. (Olivo et al., 2005) Verder zorgen ook andere factoren ervoor dat lege containertransporten toenemen. Zoals hierboven reeds uitgelegd, hebben rederijen strenge eisen bij het uitlenen van hun containers. Hierdoor kunnen importcontainers niet blijven staan op de site van de importklant. Ook de samenwerking tussen importeur en exporteur – waardoor lege containerritten zouden uitgespaard kunnen worden – verloopt vaak moeizaam (Boni, 2009). Verder eisen import- en

exportklanten vaak onredelijke leverfrequenties waardoor het efficiënt beheren van lege containertransporten zeer moeilijk wordt (Racquet, 2010).

De kosten voor lege containertransporten kunnen transportbedrijven – in tegenstelling tot volle containertransporten – niet volledig doorrekenen aan klanten (Olivo et al., 2005). Omwille van de hevige concurrentie in de transportsector zijn transportbedrijven daarenboven vaak genoodzaakt om betrouwbare en hoge kwaliteitsdiensten aan te bieden tegen lage prijzen. Kosten drukken door het efficiënt beheren van lege containerstromen is dus noodzakelijk. (Commission of the European Communities [CEC], 2001)

Lege containerstromen genereren echter niet alleen problemen voor transportbedrijven. Ze veroorzaken ook heel wat externe kosten¹. Zo zorgt het telkens terugkeren naar de haven voor een onnodige verhoging van de congestie in en rond de haven, onderhoudskosten aan wegen en lucht- en lawaai-pollutie. (Boile et al., 2008; Boni, 2009; Jula et al., 2006) Verder nemen levertijden van (lege) containers aan klanten toe en/of worden deze levertijden onvoorspelbaar. Dit als gevolg van de toenemende congestie. (Boile et al., 2008; Boni, 2009)

Tot slot neemt ook de finale kost van goederen toe: een verhoging van de totale afgelegde afstand zorgt immers voor stijgende transportkosten (toename van brandstof, manuren,...). Deze kost zal – zij het niet volledig – doorgerekend worden aan de klant. Wederom is deze klant – afhankelijk van de competitiviteit van de markt – vaak genoodzaakt een stijging in transportkosten (gedeeltelijk) door te rekenen aan de consument, waardoor de kost van de finale goederen langzaamaan toeneemt. (Deidda et al., 2008) Naast een reductie van de operationele kosten van een transportbedrijf heeft het minimaliseren van lege containertransporten dus ook voordelen voor de hele bevolking. Bovendien bevordert het de efficiëntie van rederijen, terminaloperatoren, havenautoriteiten, vrachtwagenchauffeurs en depotoperatoren (Boile et al., 2008).

1.2 Centrale onderzoeksvraag

Uit bovenstaand praktijkprobleem wordt duidelijk dat lege containertransporten heel wat problemen veroorzaken. Natuurlijk zullen transportbedrijven deze transporten nooit helemaal kunnen vermijden. Ze kunnen echter wel hun uiterste best doen om deze lege containertransporten zo veel mogelijk te beperken. Het doel van deze masterproef is dan ook

¹ Externe kosten of negatieve externaliteiten zijn kosten die gedragen worden door een partij die ze niet veroorzaakt heeft (Lipsey en Chrystal, 2007).

om na te gaan welke modellen gebruikt kunnen worden om de dagelijkse herpositionering van lege containers in het hinterland te plannen. De centrale onderzoeksvraag luidt daarom als volgt:

“Welke modellen kunnen gebruikt worden om de dagelijkse herpositionering van lege containers in het hinterland te plannen?”

1.3 Deelvragen

Om een gestructureerd en volledig antwoord te geven op bovenstaande onderzoeksvraag zal deze masterproef ingaan op verschillende deelaspecten van deze vraag. Hiertoe worden volgende deelvragen opgesteld:

- Welke strategieën om lege containers in het hinterland efficiënter te verplaatsen worden in de wetenschappelijke literatuur voorgesteld?
- Welke operationele planningsmodellen, die ontworpen zijn om lege containertransporten in het hinterland te minimaliseren, bestaan reeds?
- Wat is het effect van de gebruikte oplossingsmethode (d.i. sequentiële of integratiemethode) op de resultaten van operationele planningsmodellen?
- Wat is het effect van een directe wissel op de resultaten van operationele planningsmodellen?

In paragraaf 1.4 wordt verduidelijkt wat deze masterproef verstaat onder regionale herpositionering van lege containers of het herpositioneren van lege containers in het hinterland. Tevens wordt het verschil met globale herpositionering van lege containers aangehaald. Om verwarring tussen de transportmogelijkheden van verschillende entiteiten te voorkomen, worden in paragraaf 1.5 de termen transportbedrijf en rederij gedefinieerd. Op de eerste deelvraag wordt een antwoord geformuleerd in hoofdstuk twee van deze masterproef. Deelvraag twee wordt behandeld in hoofdstuk drie. Vervolgens worden deelvragen drie en vier beantwoord in hoofdstuk vier, het praktijkgedeelte van deze masterproef. Dit aan de hand van het model voorgesteld door Braekers et al. (2012). In het laatste hoofdstuk, hoofdstuk vijf, worden de conclusies van deze masterproef geformuleerd.

1.4 Definitie van regionaal herpositioneren van lege containers

Regionaal herpositioneren van lege containers wordt door Theofanis en Boile (2008) gedefinieerd als de beweging van lege containers tussen importklanten, exportklanten en havendepots. Havendepots zijn containerdepots die gelinkt zijn aan de haven. In deze havendepots komen volle containers, bestemd voor importklanten of verzonden door exportklanten, toe. Daarnaast vormen deze havendepots samen met binnenlandse containerdepots de belangrijkste opslagruimte voor lege containers. Binnenlandse containerdepots zijn containerdepots gesitueerd in het hinterland of het achterland van de haven. Deze depots zijn dus niet rechtstreeks verbonden aan de haven. (Crainic et al., 1993b) Zoals uitgelegd in het praktijkprobleem en zoals de definitie van Theofanis en Boile (2008) doet vermoeden, zullen rederijen veelal verkiezen om gebruik te maken van havendepots in plaats van binnenlandse containerdepots. Dit om de controle over containers te behouden (Theofanis en Boile, 2008).

Om met het wereldwijde gebrek aan evenwicht in de handel om te gaan, moeten lege containers natuurlijk ook globaal verplaatst worden. Dit definieert Boile et al. (2008) als de beweging van lege containers tussen twee zeehavens. Deze masterproef zal enkel het regionale herpositioneringsprobleem van naderbij bekijken. Om de complexiteit te verminderen zal er bovendien van uitgegaan worden dat regionale verplaatsingen enkel per vrachtwagen zullen verlopen. Dit sluit nauw aan met de werkelijkheid waar hoofdzakelijk vrachtwagens gebruikt worden om containers regionaal te verplaatsen (Boile et al., 2008; Zhang et al., 2009). De mogelijkheid om een containertransport te regelen via spoor-, lucht-, binnenvaart- of intermodaal vervoer (zoals een combinatie van spoor-, en vrachtwagentransport, binnenvaart- en vrachtwagentransport of spoor-, binnenvaart- en vrachtwagentransport) zal dus niet besproken worden.

1.5 Verschil tussen transportbedrijf en rederij

Deze masterproef gaat ervan uit dat regionale verplaatsingen enkel per vrachtwagen zullen verlopen. Als hiervan uitgegaan wordt, kan – om verwarring tussen de transportmogelijkheden van verschillende entiteiten te vermijden – een duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen de termen transportbedrijf en rederij. Een transportbedrijf is dan namelijk enkel verantwoordelijk voor regionale verplaatsingen terwijl een rederij steeds zal zorgen voor de globale herpositionering van lege containers tussen verschillende zeehavens. Er wordt dus verondersteld dat de regionale herpositionering van lege containers niet behoort tot de transporttaken van een rederij, wel tot de transporttaken van een transportbedrijf.

Rederijen en containerleasingmaatschappijen zijn de grootste containereigenaars. Theofanis en Boile (2008) stellen vast dat rederijen sinds 2000 steeds meer geïnvesteerd hebben in het aankopen van eigen containers. Toch maken rederijen nog steeds frequent gebruik van leasingovereenkomsten met containerleasingmaatschappijen. Hierdoor kunnen rederijen – tegen betaling en voor een bepaalde tijd – containers die eigendom zijn van de leasingmaatschappijen, gebruiken. (Theofanis en Boile, 2008)

Rederijen en transportbedrijven hebben hierdoor vaak tegengestelde belangen: een rederij wil namelijk dat uitgeleende containers zo snel mogelijk weer terug in de haven zijn. Dit om het overzicht aan beschikbare containers te behouden en te vermijden dat een aangevraagde container niet beschikbaar zou zijn, indien nodig. (Boile et al., 2008) Een transportbedrijf wil lege containertransporten minimaliseren waardoor liever iets langer wordt gewacht om uitgeleende containers terug naar de haven te brengen. Langer wachten geeft een transportbedrijf bijvoorbeeld de kans om een lege container pas te verplaatsen wanneer een exportklant in de buurt een gelijkaardige lege container aanvraagt. Hierdoor zou de lege container direct naar de exportklant gebracht kunnen worden, wat één lege rit uitspaart (cfr. directe wissel, paragraaf 2.1.1).

1.6 Beschrijving en verantwoording van de onderzoeksmethode

Na het opstellen van bovenstaand onderzoeksprobleem wordt overgegaan tot een grondige analyse van de tot nu toe verschenen wetenschappelijke literatuur. Deze wetenschappelijke artikels worden opgevraagd via elektronische databases zoals Ebscohost (toegankelijk via Universiteit Hasselt) en Limo (toegankelijk via Katholieke Universiteit Leuven). Deze databases laten toe om snel en van thuis uit toegang te verkrijgen tot heel wat wetenschappelijke artikels. Ook tertiaire bronnen, zoals literatuurlijsten van reeds doorgenomen wetenschappelijke artikels en wetenschappelijke overzichtsartikels zoals dat van Braekers et al. (2011), worden grondig doorzocht. AtoZ E-Journals geeft de mogelijkheid om wetenschappelijke tijdschriften, zoals Transportation Research Part E, door te nemen.

Om deze elektronische databases te doorzoeken worden onder meer volgende trefwoorden gebruikt: "empty container", "regional repositioning", "container allocation" en "container management". Aangezien Crainic et al. (1993b) aangeven dat het onderzoek naar het regionaal herpositioneren van lege containers voor 1970 slechts van 'marginaal belang' was, wordt als zoekperiode voor wetenschappelijke artikels van 1970 tot heden opgegeven.

Verder worden andere secundaire bronnen, zoals boeken, gebruikt als achtergrondinformatie of bij het definiëren van begrippen. Bovendien wordt de persdatabank Mediargus maandelijks gecontroleerd om populaire en vulgariserende artikels over lege containertransporten op te

volgen en eventueel te gebruiken om bovenstaand praktijkprobleem te actualiseren. Dit wordt gedaan door middel van de volgende (Nederlandse) zoekterm: lege container(verplaatsingen). Na dit kwalitatief onderzoek kan een antwoord geformuleerd worden op deelvragen één en twee (cfr. paragraaf 1.3).

Om het effect van een directe wissel en de gebruikte oplossingsmethode op de resultaten van operationele planningsmodellen na te gaan (cfr. deelvragen drie en vier, paragraaf 1.3), wordt gebruik gemaakt van de modellen voorgesteld in het wetenschappelijke artikel van Braekers et al. (2012). Deze recente modellen omvatten de mogelijkheid om een directe wissel uit te voeren en de resultaten van de sequentiële en integratiemethode te evalueren.

Hoofdstuk 2: Efficiënte herpositionering van lege containers

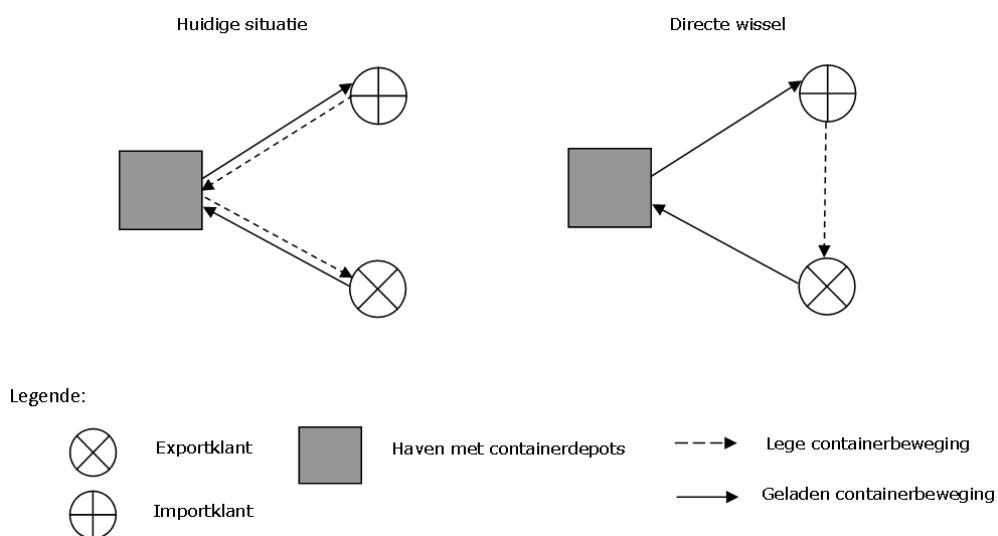
De laatste jaren wordt heel wat wetenschappelijk onderzoek verricht naar het vinden van strategieën waardoor lege containers efficiënter verplaatst zouden kunnen worden. Deze strategieën worden hieronder beschreven en worden ook samengevat in het overzichtsartikel van Braekers et al. (2011).

2.1 Hergebruiken van lege containers

Jula et al. (2006) stellen voor om containers, nadat ze gelost en uitgeladen werden bij de importklant, opnieuw te gebruiken en deze dus niet dadelijk terug te brengen naar het havendepot. Hergebruiken van lege containers kan volgens Jula et al. (2006) op twee manieren: lege containers kunnen gebruikt worden om onmiddellijk een vraag van een exportklant naar een lege container te beantwoorden of kunnen tijdelijk opgeslagen worden in binnenlandse containerdepots om te beantwoorden aan deze vraag in de toekomst. Beide methodes worden hieronder toegelicht.

2.1.1 Directe wissel tussen importeur en exporteur

Een directe wissel tussen importeur en exporteur wordt in wetenschappelijke literatuur ook een 'street turn' genoemd. In figuur 2 wordt de werking van een directe wissel en het verschil met de huidige situatie schematisch weergegeven. Om de situatie te vereenvoudigen worden vrachtwagenbewegingen zonder container buiten beschouwing gelaten.

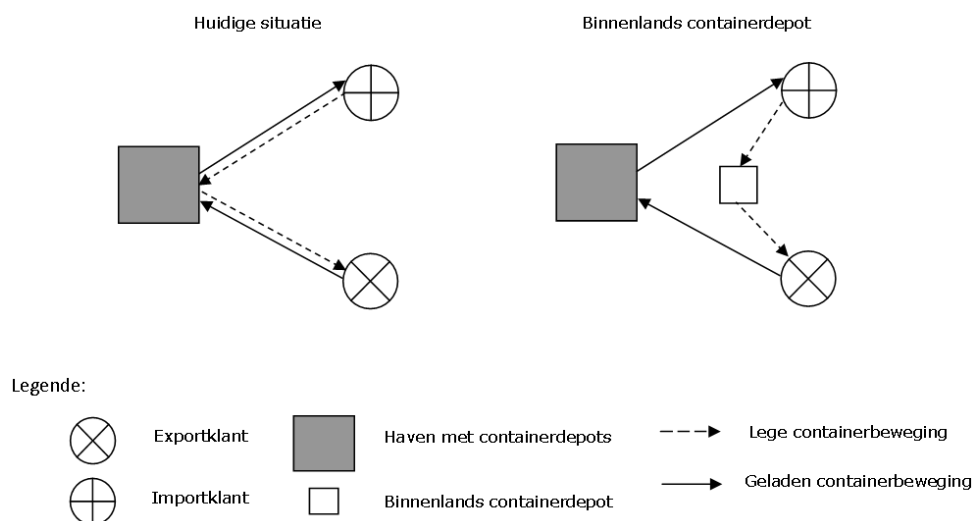


Figuur 2: Werking van een directe wissel (aangepast uit Furió et al., 2010)

Bij een dergelijke 'street turn' worden lege containers van importklanten naar exportklanten gebracht zonder deze containers eerst naar de haven terug te brengen. Als transportbedrijven gebruik zouden maken van deze directe wissel tussen importeur en exporteur, zou telkens één lege containerrit uitgespaard kunnen worden (cfr. figuur 2). Hierdoor neemt de congestie in en rond de haven af. Verder zou het elimineren van deze onnodige rit er ook voor zorgen dat de uitstoot van schadelijke stoffen, veroorzaakt door wegtransport, vermindert. (Jula et al., 2006)

2.1.2 Binnenlandse containerdepots

Import- en exportklanten vestigden zich vroeger vaak in de nabijheid van de haven. Naarmate de beschikbare grond in dit havengebied schaarser werd en dus bijgevolg ook duurder, vestigden bedrijven zich langzamerhand liever meer landinwaarts. Hierdoor worden lege containers over steeds langere afstanden getransporteerd, waardoor onder meer verkeerscongestie, lucht- en lawaai-pollutie en aflevertijden toenemen. Bovendien zijn transporteurs langer onderweg waardoor ze, per dag, minder klanten kunnen bedienen. (Boile et al., 2008) Daarom stellen Boile et al. (2008) en Jula et al. (2006) voor om meer containerdepots aan te leggen die dicht bij een netwerk van klanten gesitueerd zijn en deze vervolgens ook te gebruiken om lege containers tijdelijk op te slaan. Hierdoor zouden de afstanden afgelegd door lege containers – cfr. figuur 3 – afnemen (Boile et al., 2008; Jula et al., 2006).



Figuur 3: Gebruik van een binnenlands containerdepot i.p.v. het havendepot (aangepast uit Furió et al., 2010)

Jula et al. (2006) voegen hier nog aan toe dat zo ook meer lege containers opgeslagen kunnen worden. Bovendien zullen op die manier een deel van deze containers dichterbij een

netwerk van klanten gelegen zijn. Daarenboven wordt het drukke havengebied vermeden, waardoor lege containers afgehaald en binnengebracht kunnen worden zonder al te lange wachttijden (Boile et al., 2008; Jula et al., 2006).

2.1.3 Moeilijkheden bij het hergebruik van lege containers

Al lijkt het hergebruiken van lege containers een logische oplossing om het aantal lege containerritten te minimaliseren, toch is dit niet altijd gemakkelijk: om import- en exportcontainers in één ronde te combineren moeten import- en exportklant idealiter bij elkaar in de buurt gelegen zijn, dezelfde wensen hebben qua containertype en hun goederen vervoeren met dezelfde rederij. Dit laatste is belangrijk om verwarring tussen beide partijen (d.i. tussen de rederij die verantwoordelijk is voor de overzeese importbeweging en de rederij verantwoordelijk voor de overzeese exportbeweging) in geval van schade, te voorkomen. Bovendien vervoeren concurrerende rederijen – vermoedelijk omwille van reclaimedoeleinden – niet graag elkaars containers. Tot slot moeten de laad- en losuren van beide partijen zo zijn, dat de directe wissel gerealiseerd kan worden binnen de tijdslimiet opgegeven door rederij en klanten. Al deze factoren maken de planning en implementatie van een directe wissel zeer moeilijk en tijdrovend. Daarenboven zijn er ook heel wat wettelijke kwesties verbonden aan een directe wissel (zoals aansprakelijkheid bij schade, verzekering,...) waarvoor eerst een oplossing dient gevonden te worden alvorens deze oplossing in de praktijk geïmplementeerd zou kunnen worden. (Boile et al., 2008; Jula et al., 2006)

Toch worden de laatste jaren initiatieven genomen om de implementatie van een directe wissel te faciliteren. Zo heeft het transportbedrijf Transport Joosen samen met het Vlaams Instituut voor Logistiek (VIL) en het Vlaams Instituut voor Mobiliteit (VIM) in 2007 het internetplatform Eurotranscon.com opgestart. Op dit internetplatform kunnen verschillende transportbedrijven samenwerken door lege containers aan te bieden of aan te vragen en zo te vermijden dat vrachtwagens met een lege container terugkeren naar de haven. Om dit proces te vergemakkelijken, dienen transportbedrijven op dit internetplatform aan te geven welk type container aangeboden of aangevraagd wordt, met welke rederij de goederen vervoerd worden en binnen welk tijdsinterval de directe wissel dient gerealiseerd te worden. Tot slot moet ook worden aangegeven binnen welke geografische zone de lege container zich bevindt. Het ingeven van deze gegevens geeft de mogelijkheid om via een zoekrobot aangeboden en aangevraagde lege containers met elkaar te combineren. Dit leidt volgens Transport Joosen tot economisch en ecologisch bewust transport: stel dat transporteur A op Eurotranscon.com een lege container aanbiedt en transporteur B – die tevens geregistreerd is op Eurotranscon.com – een aanvraag krijgt voor een lege container. Dan kan transporteur B – wanneer de lege container aangeboden door A voldoet aan alle voorwaarden – door

middel van transporteur A de klant bedienen: A rijdt de lege container in plaats van naar de haven naar de exportklant van transporteur B. Transporteur B betaalt hiervoor een percentage van de opbrengst van de transactie aan A en kan – naast het bedienen van deze exportklant – tegelijkertijd eigen vrachtwagens inzetten om andere klanten te bedienen. Aangezien transporteur A de lege container niet terug dient te brengen naar de haven maar een betaalde rit kan rijden, is ook A geholpen. (Boni, 2009; Ooms, 2009) Verder dient aangehaald te worden dat ook extra procedures nodig voor een directe wissel via dit internetplatform kunnen worden geregeld. Deze extra procedures omvatten onder meer het verkrijgen van de goedkeuring van de rederij en het in orde brengen van de noodzakelijke documenten om de container eerst naar een exportklant te brengen, alvorens deze container terugkeert naar de haven. (Boni, 2009)

Claeys en Zonen BVBA 052/44.92.95	19/05/2011 10:00	MSC	20 - Standard	9240 ZELE	Antwerpen	1	WIE KAN DEZE GEB WIJ K...
RMT BVBA	-	HYU	20 - Standard	-	Antwerpen	3	-
	-	EVE	20 - Standard	-	Antwerpen	1	-
HEIRWEGH GEBR	19/05/2011	HAP	40 - Standard	lessen	Antwerpen	5	-

Figuur 4: Aanbieden van lege containers op Eurotranscon.com (uit "Eurotranscon – Exchange your containers", z.d.)

In 2011 maakten een honderdtal transportbedrijven gebruik van Eurotranscon.com. Transport Joosen haalt aan dat het aantal combinaties stijgt naarmate de economische activiteit in de sector toeneemt ("Eurotranscon – Flanders Smart HUB", 2011).

Het bouwen van binnenlandse containerdepots eist een grote investering die voor een transportbedrijf vaak niet opweegt tegen de opbrengsten op korte termijn (Boile et al., 2008). Bovendien willen rederijen dat lege containers onmiddellijk weer naar de haven gevoerd worden zodat de controle over deze containers behouden blijft (Boile et al., 2008; Jula et al., 2006). Toch geven Boile et al. (2008) aan dat dat laatste geen reden zou mogen zijn om de bouw en het gebruik van binnenlandse containerdepots tegen te houden: dankzij recente technologische evoluties en de mogelijkheid om systemen te installeren die verbonden zijn met het internet, verhoogt de zichtbaarheid van containers in binnenlandse containerdepots (Boile et al., 2008).

2.2 Containersubstitutie

Containersubstitutie laat toe om één type container te vervangen door één of meerdere containers van een ander type (Jula et al., 2006). Dit lijkt relatief gemakkelijk maar is dit vaak niet: een FEU (Forty foot Equivalent Unit = 40 ft of ongeveer 13 meter lang) is dan wel

gelijk aan twee TEU (Twenty foot Equivalent Unit = 20 ft of ongeveer 6 meter) maar het is bijvoorbeeld onmogelijk om buizen van twaalf meter te vervoeren in twee TEU containers (Crainic et al., 1993b).

2.3 Opvouwbare containers

Opvouwbare containers zorgen ervoor dat de transportcapaciteit van één vrachtwagen sterk toeneemt: bij fabrikant Holland Container Innovations hebben vier opgevouwen gestapelde lege containers dezelfde omvang als één 'gewone' lege container waardoor de transportcapaciteit van één vrachtwagen verviervoudigt (cfr. figuur 5). Dit zorgt ervoor dat het aantal lege containerritten drastisch daalt. (Konings, 2005; Shintani et al., 2010)



Figuur 5: Eén 'gewone' container versus vier opvouwbare containers (uit Shintani et al., 2010)

Het opvouwen van lege containers is niet nieuw. Het is een oplossing die in de jaren '70 werd voorgesteld om de opkomende containerindustrie kostefficiënter te maken. Toch werd het toen geen succes: de kostbesparingen die hiermee gerealiseerd zouden kunnen worden, wogen niet op tegen de additionele kosten geassocieerd met de aankoop en het gebruik van opvouwbare containers (extra mankracht, tijd, materiaal,...). Recente innovaties en de exponentiële groei van het aantal containerverplaatsingen zorgen ervoor dat de opvouwbare container weer aan interesse wint. (Konings, 2005; Shintani et al., 2009)

Hoofdstuk 3: Planningsmodellen

Menselijke vaardigheden zijn vaak onvoldoende om de hoeveelheid informatie waarmee een transportbedrijf dagelijks wordt geconfronteerd op een efficiënte manier te verwerken. Niet alleen de hoeveelheid informatie maar ook het dynamische karakter van deze informatie bemoeilijkt het modelleren van de planning van het transport van lege (en volle) containers en het minimaliseren van lege containertransporten in het algemeen. Om snel en efficiënt een planning op te stellen en dergelijke planningsproblemen aan te pakken, kunnen beslissingsmakers gebruikmaken van mathematische optimalisatieplanningsmodellen. Bovendien kan door middel van een planningsmodel efficiënt nagegaan worden of het opnemen van de oplossingen voorgesteld in hoofdstuk twee in het planningsmodel zou leiden tot een betere oplossing. Dit is een planning met minder lege containerritten of waarin de totale afgelegde afstand kleiner is. (Deidda et al., 2008) In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de verschillende planningsniveaus en planningsmodellen op elk niveau.

3.1 Strategisch, tactisch en operationeel planningsniveau

Om lege containertransporten efficiënt te organiseren op een regionaal niveau, moet een transportbedrijf volgens Crainic et al. (1993b) beslissingen nemen op drie planningsniveaus: strategisch, tactisch en operationeel. Zoals uit de onderzoeksvragen kan afgeleid worden zal deze masterproef zich vooral richten op het operationele planningsniveau. Hieronder wordt kort een overzicht gegeven van het strategische en tactische planningsniveau maar zal niet dieper worden ingegaan op de verschillende onderverdelingen binnen deze twee planningsniveaus.

Op het strategische niveau legt het bestuur van een transportbedrijf de infrastructuur van dit transportbedrijf voor een lange periode vast. Hiervoor moeten onder meer beslissingen genomen worden over de optimale locatie van nieuwe binnenlandse depots, de capaciteit van dergelijke containerdepots en/of de aankoop van nieuwe vrachtwagens. Dit zijn meestal beslissingen die een grote kapitaalsinvestering vereisen. (Crainic et al., 1993b; Crainic en Laporte, 1997) Paragraaf 3.2 bespreekt – ter illustratie – een strategisch planningsmodel.

Op tactisch niveau wordt – gezien de infrastructuur die vastgelegd wordt op strategisch niveau – bepaald welke diensten het transportbedrijf op middellange termijn zal aanbieden opdat zoveel mogelijk klanten bediend kunnen worden. Concreet houdt dit in dat beslissingen dienen genomen te worden over het aangeboden dienstennetwerk en de verdeling van lege containers tussen verschillende containerdepots. Dit laatste is belangrijk

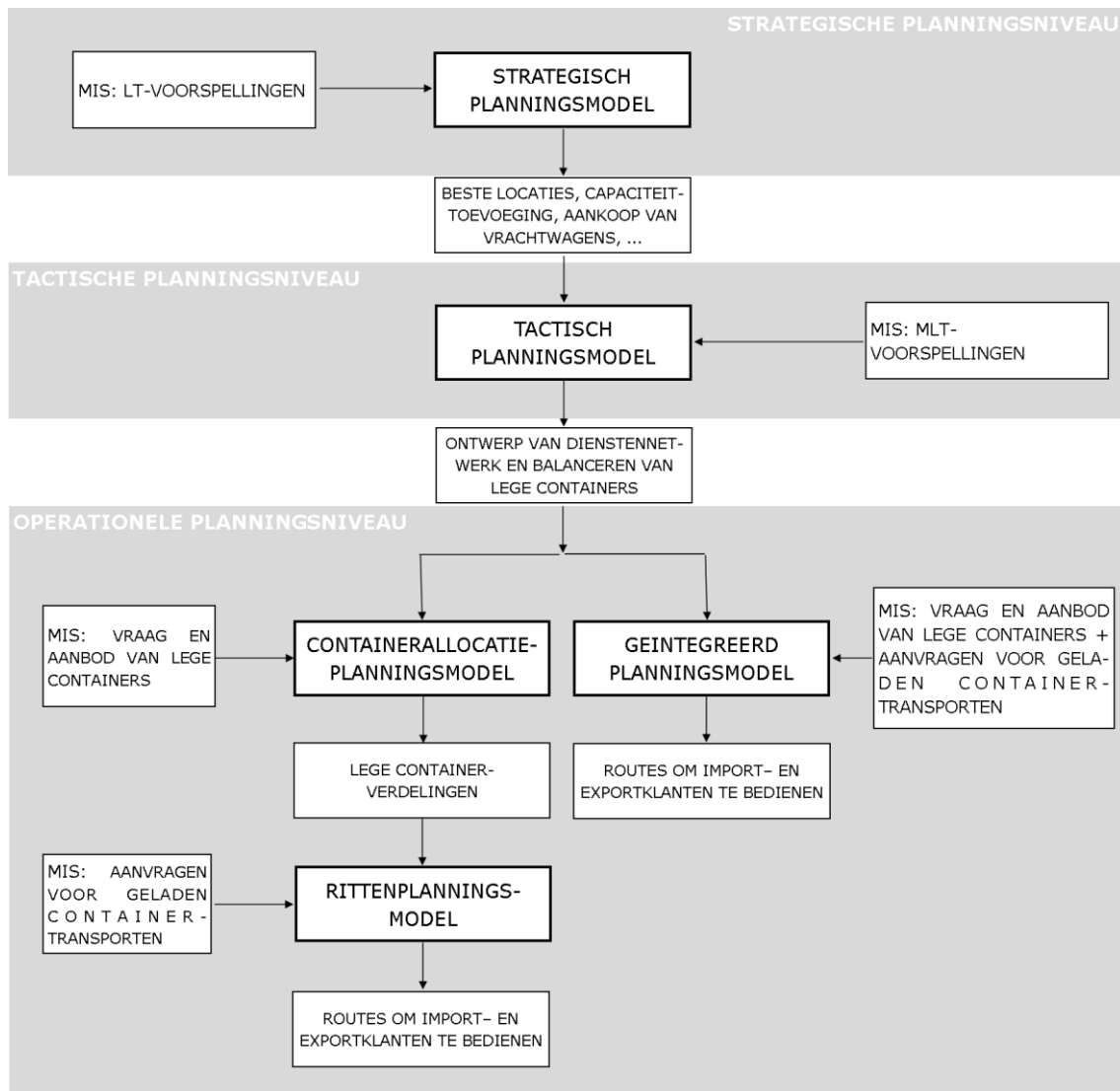
om een tekort aan lege containers in een containerdepot te voorkomen. Een dienstennetwerk is een groepering van routes waarvoor diensten worden aangeboden (bijvoorbeeld de regio Vlaanderen, provincie Limburg,...). (Crainic et al., 1993b; Crainic en Laporte, 1997; Crainic, 2000) Bij het verkennen van wetenschappelijke literatuur werden niet veel planningsmodellen die een dergelijk tactisch planningsprobleem behandelen, teruggevonden. Ook Braekers et al. (2011) geven aan dat relatief weinig literatuur over deze tactische planningsmodellen verschenen is. Paragraaf 3.3 bespreekt – ter illustratie – een recent verschenen tactisch planningsmodel.

Op het operationele niveau beslissen lijnmanagers hoe ze deze diensten het best van dag tot dag kunnen plannen. Voor een transportbedrijf houdt dit in dat dagelijks beslissingen gemaakt moeten worden om te voldoen aan de vraag van import- en exportklanten naar lege en volle containers en dat de meest effectieve routes gekozen worden om deze import- en exportklanten te bedienen. (Crainic et al., 1993b) Indien lijnmanagers rekening willen houden met de interacties tussen deze twee beslissingen, dienen volgens Crainic et al. (1993b) één mathematisch model geformuleerd te worden. Gezien de vorderingen op het gebied van operationeel onderzoek op dat tijdstip, was dit volgens deze auteurs onmogelijk en werd het probleem om die reden opgesplitst in twee optimalisatieproblemen: een containerallocatieprobleem en een rittenplanningsprobleem. In een containerallocatieprobleem moet bepaald worden hoe lege containers het best (d.i. zodat bijvoorbeeld de afstand afgelegd door lege containers geminimaliseerd wordt) verdeeld kunnen worden zodat zowel aan gekende als aan voorspelde vraag voldaan kan worden. (Crainic et al., 1993b) Hiervoor wordt een containerallocatiemodel ontwikkeld. Paragraaf 3.4.1 bespreekt een aantal belangrijke containerallocatiemodellen. In een rittenplanningsprobleem dienen routes ontworpen te worden zodat geladen en lege containers op de meest efficiënte manier getransporteerd worden naar een aantal geografisch verspreide klanten (Crainic et al., 1993b). Paragraaf 3.4.2 bespreekt rittenplanningsmodellen. Het operationele planningsprobleem wordt vervolgens sequentieel opgelost: de oplossing van het containerallocatieprobleem dient als input voor het rittenplanningsprobleem (Crainic et al., 1993b). Paragraaf 3.4.3 geeft meer uitleg over de werking van de sequentiële oplossingsaanpak. Omwille van de vorderingen op het gebied van operationeel onderzoek verschijnen er recent modellen die de twee problemen integreren in één model (Braekers et al., 2009, Braekers et al., 2012). Paragraaf 3.4.4 bespreekt de voordelen van een dergelijk integratiemodel. Tot slot wordt in paragraaf 3.4.5 de sequentiële oplossingsmethode vergeleken met de integratiemethode.

Ideaal zou zijn wanneer met één model lege containertransporten geminimaliseerd worden op zowel het strategische, tactische en operationele niveau. Door de hiërarchische relatie tussen de drie planningsniveaus – elk niveau levert immers informatie voor een hoger niveau

- is het onmogelijk om alle beslissingen te integreren in één model. (Crainic et al., 1993b; Crainic en Laporte, 1997)

Een overzicht van deze planningsniveaus, de bijhorende modellen en de interactie ertussen wordt weergegeven in figuur 6. Ook de input voor en de output van elk model wordt aangeduid op deze figuur.



Figuur 6: Overzicht planningsniveaus en -modellen (aangepast uit Crainic et al., 1993b)

De input voor strategische planningsmodellen zijn lange termijn vraag- en aanbodvoorspellingen voor lege containers. Deze voorspellingen kunnen gedaan worden op basis van managementinformatiesystemen (MIS). (Crainic et al., 1993b) Managementinformatiesystemen zijn systemen die de werkelijke vraag en aanbod naar lege

containers alsook de gekregen aanvragen voor volle containertransporten uit vorige periodes bijhouden en deze gegevens op aanvraag samenvatten (O'Brien en Marakas, 2008).

Zoals afgeleid kan worden uit figuur 6, vormt de output van deze strategische planningsmodellen samen met middellange termijnvoorspellingen voor de vraag en het aanbod van lege containers in de toekomst, de input voor tactische modellen (Crainic et al., 1993b). Dit is logisch, aangezien het dienstennetwerk enkel bepaald kan worden nadat het fysieke netwerk (d.i. het netwerk van containerdepots, vrachtwagendepots en klanten) in kaart gebracht werd. Verder dient gekeken te worden naar de grootte van de vraag naar en het aanbod van lege containers in de toekomst (Crainic et al., 1993b). Dit is belangrijk om de juiste beslissingen te maken over de verdeling van lege containers tussen verschillende containerdepots: neemt bijvoorbeeld de vraag naar lege containers toe in één regio dan zullen meer lege containers in een bepaald depot moeten worden voorzien.

Op het operationele niveau, dienen de beslissingen gemaakt op het strategische en tactische niveau als input. Bovendien worden, indien gekozen wordt voor de sequentiële oplossingsmethode, korte termijn vraag- en aanbodvoorspellingen en de reeds bekende vraag en aanbod voor lege containers gebruikt als input voor het containerallocatiemodel. Het rittenplanningsmodel zoekt de beste routes om zowel lege als geladen containers op de meest efficiënte manier te transporteren. Hiervoor is naast de output van het containerallocatiemodel ook een lijst van de uit te voeren volle containertransporten nodig. (Crainic et al., 1993b) Het integratiemodel voert deze twee datasets (d.i. de verdeling van lege en volle containers) gelijktijdig in als input. De verschillende oplossingsmethodes voor operationele planningsmodellen alsook de vereiste input wordt – zoals eerder aangehaald – beschreven in paragraaf 3.4.3 en 3.4.4.

3.2 Strategisch planningsmodel

In paragraaf 2.1.2 wordt door Jula et al. (2006) en Boile et al. (2008) voorgesteld om containerdepots aan te leggen die dicht bij een netwerk van klanten gesitueerd zijn (cfr. figuur 3). Boile et al. (2008) ontwikkelden hiervoor een strategisch mathematisch model om tussen een reeks kandidaatdepots de optimale locaties voor nieuwe binnenlandse depots te identificeren. Het doel van dit model is om de totale kost voor het bouwen van een dergelijk containerdepot en de kost die het transporteren van lege containers met zich meebrengt, te minimaliseren (Boile et al., 2008). Door middel van een praktijkvoorbeeld tonen Boile et al. (2008) aan dat door het bouwen van binnenlandse containerdepots op de juiste locatie, de totale afgelegde afstand door lege containers sterk daalt. Bijgevolg dalen ook de verplaatsingskosten sterk. Toch is dit voorstel niet gemakkelijk om te implementeren: rederijen willen immers – zoals ook uitgelegd wordt in paragraaf 2.1.3 – graag de controle

over hun containers behouden. Bovendien weegt de kost van het bouwen van een dergelijk depot vaak niet op tegen de voordelen die op korte termijn behaald kunnen worden. (Boile et al., 2008)

3.3 Tactisch planningsmodel

Om een tekort aan lege containers in een containerdepot te voorkomen, doen Yun et al. (2011) onderzoek naar een containermanagementsysteem dat gebruikt kan worden opdat de voorraad van lege containers in containerdepots zo efficiënt mogelijk beheerd zou kunnen worden. Hierbij wordt een (s, S) voorraadsysteem gehanteerd. Een (s, S) voorraadpolitiek houdt in dat lege containers besteld dienen te worden wanneer het aantal lege containers in voorraad kleiner is dan s , het bestelpunt. Er worden dan net zoveel lege containers besteld als nodig om het aantal lege containers in dit containerdepot opnieuw aan te vullen tot S containers, het aanvulpunt. Het aantal bestelde containers dienen vervolgens verplaatst te worden vanuit andere containerdepots, al dan niet overzees. De doorlooptijd is de tijd die verstrijkt vooraleer deze containers geleverd worden aan de desbetreffende containerdepots. Om onmiddellijk over lege containers te beschikken, is er in elk containerdepot de mogelijkheid om lege containers te leasen. (Yun et al., 2011)

Het doel van dit model bestaat uit het vinden van de parameters s en S die de totale verwachte kost minimaliseren. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen een laag- en hoogseizoen voor de vraag naar lege containers. Laagseizoen houdt in dat er voor die periode relatief weinig vraag is naar lege containers (d.i. (s_1, S_1)). In het hoogseizoen geldt net het omgekeerde (d.i. (s_2, S_2)). De totale verwachte kost wordt gedefinieerd als de som van de opslagkost, leasekost, vaste en variabele bestelkost. Gezien het bepalen van bovenstaande parameters zeer moeilijk is via een analytisch model, worden de beste waarden voor de parameters s_1 , S_1 , s_2 en S_2 gezocht met behulp van een simulatiemodel. Een dergelijk simulatiemodel zal waarschijnlijk niet de optimale waarden voor de parameters s_1 , S_1 , s_2 en S_2 kunnen genereren. Dit omdat de totale verwachte kost niet voor alle waarden kan nagegaan worden. In het artikel door Yun et al. (2011) wordt om die reden aangehaald dat het gaat om 'een bijna optimaal voorraadsysteem'. (Yun et al., 2011)

3.4 Operationele planningsmodellen

3.4.1 Containerallocatiemodellen

Via een containerallocatiemodel kunnen beslissingsmakers bepalen hoe lege containers het best (d.i. zodat bijvoorbeeld de afstand afgelegd door lege containers geminimaliseerd wordt) verdeeld kunnen worden zodat zowel aan gekende als aan voorspelde vraag voldaan

kan worden (Crainic et al., 1993b). Bij het ontwerp van dergelijke modellen moet beslist worden hoe dicht dit model de werkelijkheid zal benaderen. Hier geldt als vanzelfsprekend: hoe realistischer het model, hoe complexer de mathematische formulering zal zijn. Braekers et al. (2011) halen aan dat het meest realistische containerallocatiemodel een stochastisch en dynamisch model is waarbij meerdere types containers in beschouwing genomen worden en waarbij bovendien containerssubstitutie, het leasen van containers en een directe wissel tussen import- en exportklant toegelaten is. Leasen van containers geeft de mogelijkheid om de voorraad van beschikbare lege containers in containerdepots te vergroten, waardoor de kost gerelateerd aan het niet voldoen aan de vraag naar lege containers daalt. In stochastische modellen zijn verscheidene parameters onzeker. Zo kan de vraag naar of het aanbod van lege containers gemodelleerd worden als een stochastische in plaats van een deterministische variabele. Dit houdt in dat de volledige vraag naar en het aanbod van lege containers niet meer gekend zijn aan het begin van de planningsperiode maar dat een deel hiervan onzeker is. Vraag en aanbod kan dan geschat worden op basis van voorspellingen. Dit in tegenstelling tot een deterministisch model waarbij vertrokken wordt van het feit dat de volledige vraag en aanbod gekend zijn aan het begin van de planningsperiode. In statische modellen wordt het model voor één periode geoptimaliseerd. Bij dynamische modellen daarentegen wordt rekening gehouden met meerdere periodes. (Crainic et al., 1993b) Toch kan ook een model dat niet volledig strookt met de realiteit, waardevolle inzichten bieden in de problematiek rond lege containertransporten. In de volgende alinea's worden de belangrijkste containerallocatiemodellen uit de literatuur rond lege containertransporten aangehaald. In tabel 1 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste karakteristieken van deze containerallocatiemodellen.

Tabel 1: Overzicht containerallocatiemodellen (aangepast uit Braekers et al., 2011)

Artikel	Deterministisch	Stochastisch	Statisch	Dynamisch	Eén type container	# types containers	Containerssubstitutie	Leasen van containers	Directe wissel
Crainic et al. (1993b)	X			X	X			X	
Crainic et al. (1993b)	X			X		X	X	X	
Crainic et al. (1993b)		X		X	X			X	
Olivo et al. (2005)	X			X				X	
Jula et al. (2006)	X			X	X				X
Chang et al. (2008)	X			X		X	X		X
Shintani et al. (2010)	X		X		X				(X)
Braekers et al. (2009, 2012)	X		X		X				X

De eersten die een containerallocatiemodel voorstellen zijn Crainic et al. (1993b). Meer specifiek stellen Crainic et al. (1993b) in deze wetenschappelijke publicatie drie modellen voor: eerst wordt een deterministisch, dynamisch model ontwikkeld waarbij verondersteld wordt dat slechts één type container bestaat en het leasen van containers is toegestaan (= 'deterministic, dynamic, single commodity container allocation model'). Dit model sluit volgens Crainic et al. (1993b) het minst aan bij de realiteit. Toch kan het gebruikt worden als mathematische basis voor verdere uitbreidingen. Voor het volgende model wordt een onderscheid gemaakt tussen verschillende types containers. Containersubstitutie tussen deze verschillende types is toegelaten (= 'deterministic, dynamic, multi-commodity container allocation model'). In een laatste stap wordt een stochastisch, dynamisch model ontworpen waarbij slechts één type container in rekening wordt gebracht en het leasen van containers opnieuw is toegestaan (= 'stochastic, dynamic, single commodity container allocation model'). In dit laatste, stochastische model is de totale vraag naar en aanbod van lege containers aan het begin van de planningsperiode onbekend. Dit sluit het dichtst aan bij de realiteit en is bijgevolg ook het meest complexe model uit het artikel. De doelfunctie van de drie modellen bestaat uit het minimaliseren van zowel de totale transport- als voorraadkost. (Crainic et al., 1993b)

Olivo et al. (2005) ontwikkelen een mathematisch model om beslissingen over het dagdagelijkse management van lege containers in een deterministisch, dynamisch en multimodaal netwerk te ondersteunen. Hiervoor worden – in tegenstelling tot andere modellen – als tijdseenheid uren in plaats van dagen gebruikt. Hierdoor kan snel ingegrepen worden en dus beter omgegaan worden met de dynamische omgeving waarin lege containertransporten plaatsvinden. Het doel van dit model is om de totale kost van het beheren van lege containers (d.i. de kost van transport en opslag) te minimaliseren. Het doel van het artikel is echter om na te gaan of het nemen van een kleinere tijdseenheid niet zal leiden tot een onoplosbaar model. Via een praktijkvoorbeeld bewijzen de auteurs dat – ondanks de kleinere tijdseenheid – het model oplosbaar is. (Olivo et al., 2005)

Jula et al. (2006) formuleren een deterministisch, dynamisch containerallocatiemodel waarin directe wissels tussen import- en exportklanten en het gebruik van binnenlandse depots opgenomen worden. Hierbij wordt verondersteld dat slechts één type container bestaat. Het doel van dit model bestaat uit het minimaliseren van de kost gerelateerd aan lege containerbewegingen. Na het toepassen van dit model op een praktijkvoorbeeld, tonen experimentele resultaten aan dat de transportkosten, gerelateerd aan het aantal containerbewegingen en verkeerscongestie, significant verminderen door het uitvoeren van directe wissels en het gebruik van binnenlandse depots. (Jula et al., 2006) Chang et al. (2008) bouwen verder op dit model van Jula et al. (2006) en voegen de mogelijkheid van containersubstitutie toe. Via een praktijkvoorbeeld wordt aangetoond dat het aantal lege

containerbewegingen naar de haven afneemt en dat bijgevolg ook de bijhorende kosten afnemen (Chang et al., 2008).

Shintani et al. (2010) onderzoeken of het aantal lege containerbewegingen in het hinterland daalt indien transportbedrijven gebruik zouden kunnen maken van opvouwbare containers (cfr. paragraaf 2.3). Om deze mogelijke kostbesparingen te modelleren worden vijf deterministische, statische modellen ontwikkeld waarbij verondersteld wordt dat slechts één type container bestaat en de voorraad van lege containers oneindig is. Het ont- en opvouwen van deze containers vereist nieuw materiaal. Indien klanten niet beschikken over dergelijk materiaal, worden opgehaalde containers eerst naar een depot gebracht om vervolgens te worden ontvouwen of opgevouwen. In elk van deze modellen worden bijgevolg verschillende scenario's geëvalueerd (op- en ontvouwen kan bij de klant of niet, het al dan niet toelaten van een directe wissel en het gebruik van opvouwbare of standaardcontainers). Model één maakt gebruik van opvouwbare containers en veronderstelt dat klanten beschikken over aangepast materiaal. Directe wissels zijn toegelaten waardoor lege containers rechtstreeks naar klanten kunnen worden gebracht, zonder eerst naar een depot gebracht te worden. Dit wordt door Shintani et al. (2010) omschreven als 'advanced direct interchange' met opvouwbare containers. 'Advanced' omdat klanten beschikken over het juiste materiaal. 'Direct' omdat een directe wissel is toegelaten. Model twee maakt gebruik van gewone containers waarbij een directe wissel tussen import- en exportklanten is toegelaten (= 'advanced direct interchange' met standaardcontainers). Model drie maakt gebruik van opvouwbare containers. Bovendien beschikken klanten over het juiste materiaal. Directe wissels zijn echter niet toegelaten. Hierdoor moeten opvouwbare containers steeds terugkeren naar het havendepot (= 'advanced indirect interchange' met opvouwbare containers). Model vier maakt geen gebruik van opvouwbare containers, enkel van standaardcontainers. Directe wissels tussen klanten zijn hierbij niet toegelaten (= 'advanced indirect interchange' met standaardcontainers). In het laatste model – model vijf – wordt gebruik gemaakt van opvouwbare containers. Het opvouwen van deze containers is echter niet mogelijk bij de klant zelf waardoor containers steeds dienen terug te keren naar het containerdepot (= 'simple indirect interchange' met standaardcontainers). 'Simple' omdat klanten niet over het geavanceerde materiaal beschikken, nodig om lege containers te ont- en opvouwen. De doelfuncties van alle modellen minimaliseren de totale kost. Dit omvat de transportkost gerelateerd aan het verplaatsen van lege containers, de kosten om een container te lossen van of te laden op een vrachtwagen en de exploitatiekosten van containers. De modellen die gebruik maken van opvouwbare containers (d.i. model één, drie en vijf) minimaliseren naast de normale kosten ook de extra kosten (d.i. inzetten van ander materiaal, inspectiekosten van de containers) die gepaard gaan met het ont- en opvouwen van deze containers. (Shintani et al., 2010)

Braekers et al. (2009, 2012) gebruiken een deterministisch, statisch model waarbij verondersteld wordt dat slechts één type container bestaat. Directe wissels tussen import- en exportklanten zijn hierbij toegelaten. In beide modellen wordt de variabele kost, geassocieerd aan de afgelegde afstand, geminimaliseerd. (Braekers et al., 2009) In het praktijkonderzoek uit hoofdstuk vier zal dit containerallocatiemodel samen met het rittenplannings- en het integratiemodel geformuleerd door Braekers et al. (2012), gebruikt worden. Dit om onder meer het effect van een directe wissel op de totale afgelegde afstand en het aantal ingezette vrachtwagens na te gaan. Daarom zal in de volgende paragrafen dieper ingegaan worden op de mathematische formulering van elk van deze modellen.

In een containerallocatiemodel kunnen vier soorten containerstromen worden onderscheiden: van importklant naar exportklant, van importklant naar containerdepot, van containerdepot naar exportklant en, tot slot, van containerdepot naar containerdepot. Aangezien het hier gaat om een containerallocatiemodel, betreffen deze stromen enkel lege containers. De laatste containerstroom (containerdepot – containerdepot) behoort tot het tactische beslissingsniveau waardoor deze in het model voorgesteld door Braekers et al. (2012) niet in rekening wordt gebracht. Verder is O gelijk aan de verzameling van de vertrekentiteiten g en is D gelijk aan de verzameling van de aankomstentiteiten h . (Braekers et al., 2012)

Voor het containerallocatiemodel kan bijgevolg volgende notatie gebruikt worden:

O = verzameling van de vertrekentiteiten g

D = verzameling van de aankomstentiteiten h

c_{gh} = kost per eenheid transport om van entiteit g naar entiteit h te rijden

m_g = lege container(s) aangeboden door entiteit g

o_h = lege container(s) gevraagd door entiteit h

De beslissingsvariabele kan gedefinieerd worden als:

y_{gh} = het aantal lege containers getransporteerd van entiteit g naar h

De doelfunctie van dit containerallocatiemodel is vervolgens gelijk aan:

$$\text{Min} \sum_{g \in O} \sum_{h \in D} c_{gh} y_{gh}$$

Oplossingen van bovenstaande doelfunctie dienen bovendien te voldoen aan volgende (on)gelijkheden of beperkingen (Braekers et al., 2012):

$$\sum_{g \in O} y_{gh} = o_h \quad \forall h \in D \quad (1)$$

$$\sum_{h \in D} y_{gh} = m_g \quad \forall g \in O \quad (2)$$

$$y_{gh} \geq 0 \text{ en integer} \quad \forall g, \forall h \quad (3)$$

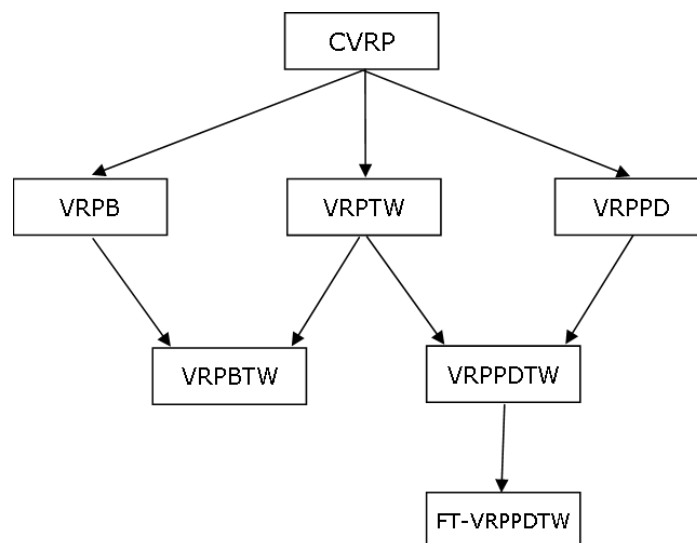
De doelfunctie minimaliseert de totale transportkost gerelateerd aan de afgelegde afstand. Hierbij worden drie beperkingen opgelegd: beperkingen (1) en (2) zorgen ervoor dat het aantal gevraagde lege containers gelijk is aan het aantal aangeboden lege containers. Tot slot zorgt het toevoegen van beperking (3) ervoor dat het aantal getransporteerde containers tussen entiteiten g en h telkens positieve gehele getallen zijn. (Braekers et al., 2012)

3.4.2 Rittenplanningsmodellen

Zoals vermeld in paragraaf 3.1, worden rittenplanningsmodellen bij het minimaliseren van lege containertransporten gebruikt om routes te bepalen zodat zowel volle als lege containers op de meest efficiënte manier verplaatst worden (Crainic et al., 1993b). In deze masterproef is het zeker niet de bedoeling om een exhaustieve opsomming te maken van alle mogelijke rittenplanningsmodellen. Wel is het de bedoeling om de lezer vertrouwd te maken met het klassieke rittenplanningsprobleem (of 'Vehicle Routing Problem' (VRP)), enkele basisvarianten hierop en de functie van het handelsreizigersprobleem ('Traveling Salesman Problem' (TSP)) in de literatuur rond lege containertransporten. Voor een uitgebreide bespreking van rittenplanningsproblemen, wordt de lezer verwezen naar Toth en Vigo (2002).

Het oplossen van een rittenplanningsmodel zorgt ervoor dat vrachtwagens vanuit een centraal depot klanten volgens de meest efficiënte routes kunnen bedienen zonder dat hierbij operationele beperkingen geschonden worden. Rittenplanningsproblemen vormen – sinds de introductie door Dantzig en Ramser in 1959 – een populair onderwerp voor wetenschappelijk onderzoek. Dit omdat het probleem één van de meest complexe combinatorische optimalisatieproblemen is dat toepassing vindt in heel wat praktijksituaties. (Toth en Vigo, 2002) Deze rittenplanningsproblemen worden – afhankelijk van de factoren, beperkingen en doelstellingen die opgenomen worden – onderverdeeld in meerdere categorieën (Crainic en Laporte, 1997). Het meest eenvoudige rittenplanningsprobleem is het 'Capacitated Vehicle Routing Problem' of CVRP. In dit klassiek rittenplanningsprobleem worden de routes zo ontworpen dat identieke vrachtwagens vertrekken en toekomen in één depot. De vraag van alle klanten is op voorhand gekend. Bovendien kan de vraag op elke route niet groter zijn dan de capaciteit van de vrachtwagens. Het doel is om de totale transportkost te

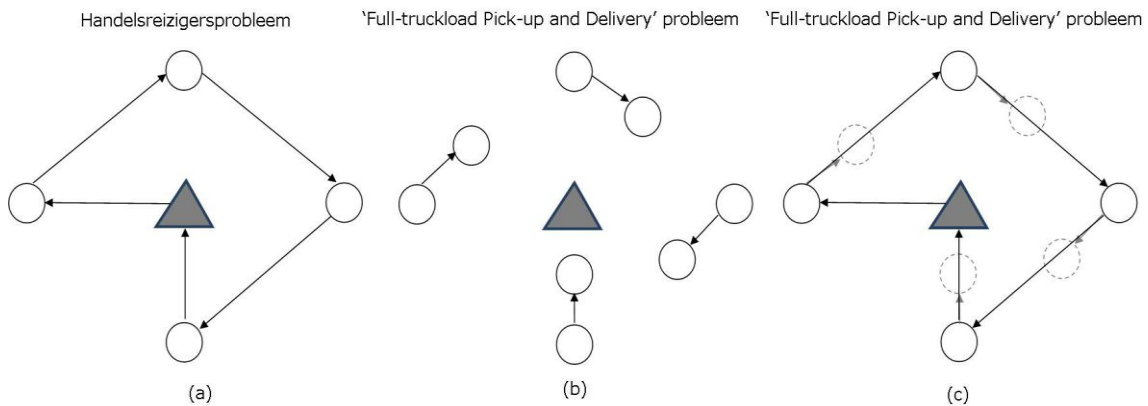
minimaliseren. (Crainic en Laporte, 1997) Toth en Vigo (2002) geven aan dat de totale transportkost gelijk is aan de kost verbonden aan de totale afgelegde afstand (of reistijd) plus de vaste kost die betaald dient te worden bij het inzetten van vrachtwagens. Aan de verschillende elementen in de doelfunctie kan een verschillend gewicht toegekend worden. Wanneer aan het CVRP toegevoegd wordt dat klanten binnen een bepaald tijdsinterval bediend moeten worden, is er sprake van een 'Vehicle Routing Problem with Time Windows' of VRPTW. In het 'Vehicle Routing Problem with Backhauls' of VRPB wordt binnen eenzelfde route eerst voorrang gegeven aan het afleveren van goederen of personen, dan pas aan het ophalen ervan. Het 'Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery' of VRPPD specificeert waar de goederen opgehaald en vervolgens weer afgezet moeten worden. Hierbij is het belangrijk dat de goederen eerst opgehaald worden vooraleer ze naar de plaats van bestemming gebracht worden. (Toth en Vigo, 2002) In het artikel van Braekers et al. (2009, 2012) wordt het rittenplanningsmodel geformuleerd als een 'Full-Truckload Pick-up and Delivery' probleem met tijdsvensters (FT-VRPPDTW). Dit is een combinatie van het eerder gespecificeerde VRPPD met VRPTW waarbij elke vrachtwagen slechts een capaciteit heeft van één container (= 'full truckload'). Het doel van dit model is om zowel het aantal voertuigen als de totale afgelegde afstand te minimaliseren. (Braekers et al., 2012) De relaties tussen het klassieke rittenplanningsprobleem en de juist opgesomde varianten op dit rittenplanningsprobleem worden weergegeven in figuur 7.



Figuur 7: Relaties tussen onderlinge rittenplanningsproblemen (aangepast uit Toth en Vigo., 2002)

Aangezien in een 'full-truckload Pick-up and Delivery' probleem vrachtwagens een capaciteit hebben van één container, moet elke taak van begin- tot eindpunt onmiddellijk worden uitgevoerd. Bijgevolg kan een 'full-truckload Pick-up and Delivery' probleem veralgemeend worden naar een handelsreizigersprobleem (TSP). (Jula et al., 2005; Wang en Regan, 2002) Dit kan het best geïllustreerd worden aan de hand van een voorbeeld. Figuur 8 (a) toont een

voorbeeld van een handelsreizigersprobleem met vier klanten en één centraal gelegen vrachtwagendepot.



Figuur 8: Vergelijking tussen TSP, FT-VRPPD en de uitvoering van transporttaken in een FT-VRPPD

In het klassieke handelsreizigersprobleem moet één vrachtwagen elke klant één keer bezoeken in één rit waarbij bovendien de totale afstand afgelegd in die rit zo klein mogelijk is. Nadat alle klanten bezocht werden, keert de vrachtwagen terug naar het vrachtwagendepot. (Hillier en Lieberman, 2010) Figuur 8 (b) geeft een 'full-truckload Pick-up and Delivery' probleem weer waarbij vier transporttaken dienen uitgevoerd te worden. Aangezien een vrachtwagen slechts één container kan vervoeren, dient na het ophalen van een lege of volle container deze container – alvorens een nieuwe kan opgeladen worden – afgeleverd te worden op de plaats van bestemming. Door deze beperking kan elke taak ook voorgesteld worden als het bedienen van één entiteit. De totale afgelegde afstand is bijgevolg minimaal indien de vrachtwagen die vertrekt vanuit het vrachtwagendepot dezelfde route aflegt als in het handelsreizigersprobleem (cfr. figuur 8 (c)). De mathematische formulering van het 'full-truckload Pick-up and Delivery' probleem kan dus gelijkgesteld worden aan dat van een handelsreizigersprobleem.

Dit blijkt ook uit Braekers et al. (2012) die in later onderzoek een asymmetrisch handelsreizigersprobleem met tijdvensters en meerdere handelsreizigers voorstellen als rittenplanningsmodel ('asymmetric, multiple vehicle Traveling Salesman Problem with Time Windows' of am-TSPTW). De doelfunctie van dit model bestaat uit het minimaliseren van het aantal gebruikte vrachtwagens en de totale afstand afgelegd door die vrachtwagens (Braekers et al., 2012).

Dit rittenplanningsmodel voorgesteld door Braekers et al. (2012) kan geformuleerd worden als een netwerkdiagram G met N knooppunten en A verbindingen. Aangezien elke transporttaak tussen twee entiteiten gegroepeerd kan worden tot één knooppunt (cfr. figuur

8), is N_0 (d.i. $N \setminus \{0\}$) gelijk aan de verzameling van alle knooppunten of transporttaken in het netwerk. N is de verzameling van alle transporttaken en het vrachtwagendepot (index 0). A is de verzameling van verbindingen tussen de knooppunten in dit netwerk (d.i. de verbinding tussen het einde van taak i en het begin van taak j). (Braekers et al., 2012)

Bij de formulering van dit rittenplanningsmodel wordt door Braekers et al. (2012) volgende notatie voorgesteld:

d_i = af te leggen afstand om taak i uit te voeren

s_i = tijd nodig om taak i uit te voeren en de container te laden en te lossen

a_i = vroegste tijdstip waarop een container voor taak i geladen of gelost kan worden

b_i = laatste tijdstip waarop een container voor taak i geladen of gelost kan worden

d_{ij} = af te leggen afstand van het einde van taak i naar het begin van taak j

t_{ij} = tijd nodig om van het einde van taak i naar het begin van taak j te rijden

M = vaste kost per vrachtwagen

K = maximum aantal beschikbare vrachtwagens

De beslissingsvariabelen kunnen gedefinieerd worden als:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{als een voertuig van het einde van taak } i \text{ naar het begin van taak } j \text{ rijdt} \\ 0 & \text{in alle andere gevallen} \end{cases}$$

$$x_{0i} = \begin{cases} 1 & \text{als een voertuig van het vrachtwagendepot naar het begin van taak } i \text{ rijdt} \\ 0 & \text{in alle andere gevallen} \end{cases}$$

t_i = exacte tijdstip waarop een voertuig taak i aanvangt

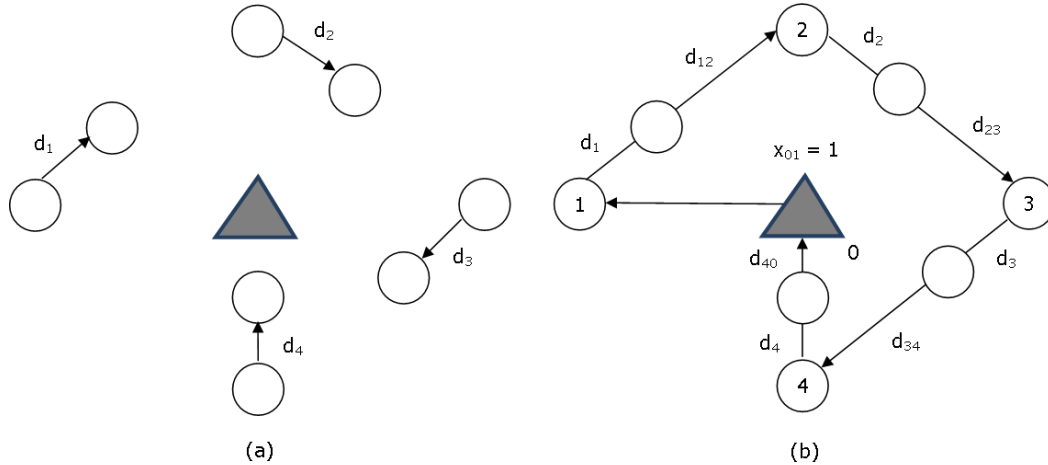
De doelfunctie van dit rittenplanningsmodel is gelijk aan:

$$\text{Min} \sum_{i \in N} x_{0i} M + \sum_{(i,j) \in A} d_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in N} d_i$$

Deze doelfunctie bestaat uit drie delen. Door middel van de eerste term wordt het aantal ingezette vrachtwagens geminimaliseerd. De tweede term minimaliseert de afgelegde afstand voor een vrachtwagen die van het einde van taak i naar het begin van taak j rijdt. De laatste term minimaliseert de afstand die afgelegd wordt nodig voor het uitvoeren van taak i . Verder kan opgemerkt worden dat per nieuwe vrachtwagen die ingezet wordt ($x_{0i} = 1$) een vaste kost M betaald dient te worden. M of de vaste kost per ingezette vrachtwagen wordt gelijkgesteld aan een zeer groot getal. Hierdoor zal het model, zolang de kost geassocieerd aan de afgelegde afstand kleiner is dan M , de voorkeur geven om minder

vrachtwagens in te zetten ongeacht of daardoor een iets langere afstand wordt afgelegd. (Braekers et al., 2012, Jula et al., 2005; Wang en Regan, 2002)

In figuur 9 wordt het verschil tussen de parameters d_i en d_{ij} grafisch verduidelijkt.



Figuur 9: Voorbeeld van een FT-VRPPD geformuleerd als TSP

De afstand tussen twee punten of entiteiten (klant of containerdepot) wordt weergegeven door d_1 , d_2 , d_3 en d_4 . In (a) waar enkel een overzicht wordt gegeven van de uit te voeren transporttaken, wordt d_i (met $i = 1, 2, 3$ en 4) afzonderlijk getoond. d_{12} is gelijk aan de afstand tussen het einde van taak 1 en het begin van taak 2 en wordt weergegeven in deel (b) van de tekening.

Oplossingen van bovenstaande doelfunctie dienen te voldoen aan volgende (on)gelijkheden of beperkingen (Braekers et al., 2012):

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_0 \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0i} \leq K \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = \sum_{j \in N} x_{ji} \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$t_i + s_i + t_{ij} \leq t_j + M(1 - x_{ij}) \quad \forall (i, j) \in A, j \neq 0 \quad (4)$$

$$t_i + s_i + t_{i0} \leq b_0 + M(1 - x_{i0}) \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$a_i \leq t_i \leq b_i \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A, j \neq 0 \quad (8)$$

Vergelijking (1) zorgt ervoor dat elke transporttaak slechts één keer uitgevoerd wordt. Door beperking (2) worden niet meer voertuigen gebruikt dan beschikbaar in het

vrachtwagendepot. Beperking (3) garandeert dat een vrachtwagen na het einde van taak i , taak j binnenrijdt en vervolgens na taak j naar het begin van de volgende taak of naar het vrachtwagendepot rijdt. Indien een vrachtwagen van taak i naar taak j rijdt ($x_{ij} = 1$), dient het tijdstip waarop taak j start, groter te zijn dan de som van het tijdstip waarop taak i start, de tijd nodig om taak i uit te voeren en de tijd nodig om van taak i naar j te rijden. Hiervoor dient beperking (4). Indien geen vrachtwagen van taak i naar taak j rijdt, is x_{ij} gelijk aan nul waardoor het rechterlid van beperking (4) zo groot wordt dat elk tijdstip aan de linkerkant hieraan zal voldoen. In dat geval valt beperking (4) weg. Door middel van beperking (5) keert een vrachtwagen terug naar het vrachtwagendepot vooraleer de som van het starttijdstip van taak i , de servicetijd van de taak en de tijd nodig om van taak i naar het vrachtwagendepot te rijden, het sluitingsuur van het vrachtwagendepot overschrijdt. Beperking (6) garandeert dat taak i start op een tijdstip dat binnen het tijdsinterval voorzien voor laden en lossen ligt. Door het opnemen van beperking (7) zijn alle tijdstippen positief of gelijk aan nul. (Braekers et al., 2012; Julia et al., 2005; Wang en Regan, 2002)

Rittenplanningsmodellen worden meestal opgelost met heuristieken of metaheuristieken. Exacte algoritmes, zoals het 'branch-and-bound' of 'branch-and-cut' algoritme dat gebruikt wordt om integrale programmeringsproblemen op te lossen, leiden tot de optimale oplossing maar vergen bij grote probleeminstaties vaak veel rekentijd. De mogelijkheid om een rittenplanningsprobleem op te lossen met exacte algoritmes hangt dus sterk af van de grootteorde van het probleem. (Meta)heuristieken laten toe om zelfs bij relatief grote probleeminstaties binnen een aanvaardbare tijdsperiode een oplossing van goede kwaliteit te vinden. Deze oplossing zal echter niet altijd de optimale oplossing voor de probleeminstatie zijn. (Cordeau et al., 2012; Bräysy en Gendreau, 2005; Crainic en Laporte, 1997)

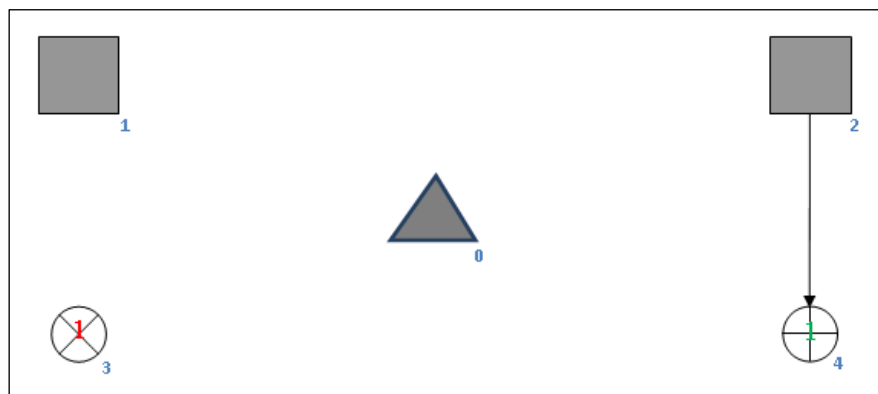
3.4.3 Sequentiële optimalisatie van operationele planningsproblemen

Bij sequentiële optimalisatie wordt met de hulp van een containerallocatiemodel eerst de optimale verdeling van lege containers vastgelegd. Pas hierna worden de routes om import- en exportklanten te bedienen, uitgetekend door middel van een rittenplanningsmodel. (Crainic et al., 1993b) De oorsprong en bestemming van zowel volle als lege containers liggen dus vast en dienen als input voor dit rittenplanningsmodel (Braekers et al., 2012). Deze werkwijze van sequentiële optimalisatie wordt in de volgende alinea's geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld.

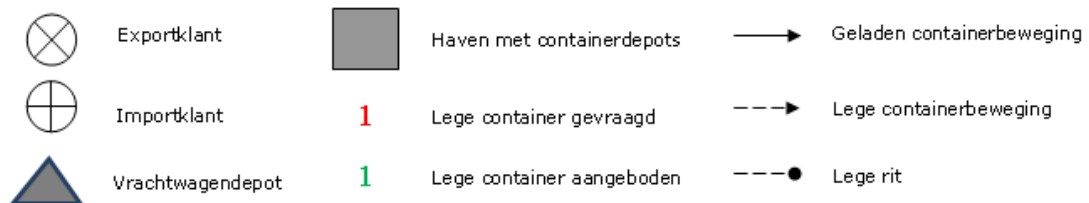
Het fysieke netwerk van dit voorbeeld bestaat uit één vrachtwagendepot, twee containerdepots (die rechtstreeks met de haven verbonden zijn), één export- en één importklant met respectievelijk indices 0, 1, 2, 3 en 4. Er wordt verondersteld dat deze twee containerdepots over genoeg lege containers beschikken en dat vrachtwagens slechts één

container kunnen vervoeren. Bovendien – aangezien dit voorbeeld enkel bedoeld is ter illustratie – worden geen tijdvensters opgelegd aan de entiteiten uit het fysieke netwerk. Directe wissels tussen import- en exportklanten zijn toegelaten. Verder wordt verondersteld dat transportkosten evenredig zijn aan de afgelegde transportafstand. Tot slot wachten vrachtwagens na het afzetten van een lege of volle container niet tot deze container respectievelijk geladen of gelost is. Dit komt overeen met de huidige praktijk – zoals uitgelegd in het praktijkprobleem – waarbij vrachtwagens onmiddellijk na het afzetten van een container vertrekken voor een nieuwe opdracht.

Aan het begin van de planningsperiode wordt vooropgesteld dat exportklant drie, één lege container nodig heeft om zijn goederen te exporteren. Importklant vier heeft – na het lossen van de geleverde container uit vorige periode – één lege container over, die nog moet opgehaald worden. Tot slot wacht in containerdepot twee een volle container voor importklant vier. Het fysieke netwerk worden schematisch weergegeven in figuur 10.



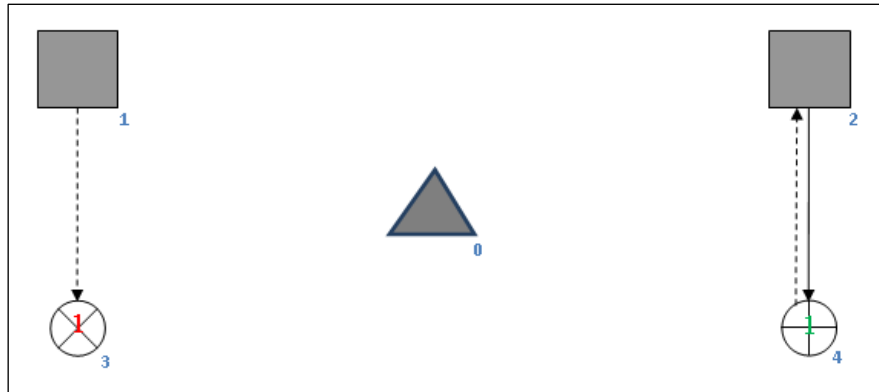
Legende:



Figuur 10: Schematische voorstelling van de gegevens en het fysieke netwerk

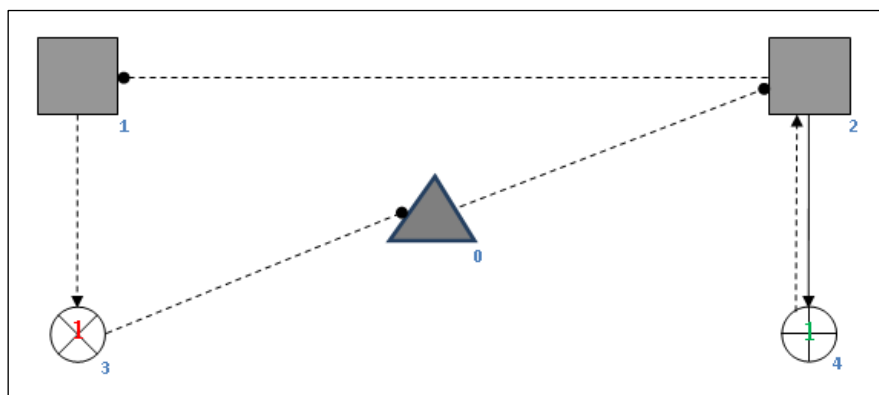
In een eerste fase wordt het containerallocatieprobleem opgelost. Hierbij wordt de optimale verdeling van de twee lege containers vastgelegd. De doelfunctie bestaat hier uit het minimaliseren van de totale afgelegde afstand door lege containers (Braekers et al., 2012). Exportklant drie krijgt bijgevolg een lege container van depot één en de importklant van depot twee. Merk op dat het containerallocatiemodel niet kiest voor een directe wissel tussen import- en exportklant: de afstand tussen deze twee klanten is immers groter dan de som van de afstand tussen containerdepot één en exportklant drie en de afstand tussen

containerdepot twee en importklant vier. Nadat dit containerallocatieprobleem is opgelost, hebben alle containers een begin- en eindpunt. Dit wordt schematisch voorgesteld in figuur 11.



Figuur 11: Oplossing van het containerallocatieprobleem

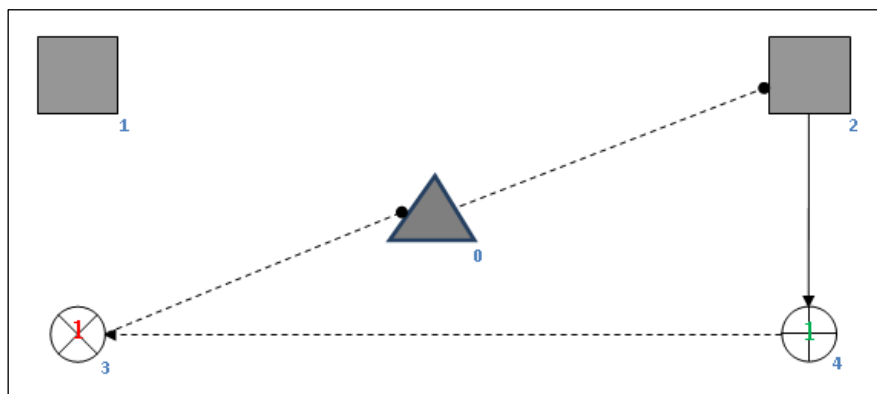
In een tweede fase wordt het rittenplanningsprobleem opgelost: de beste routes om bovenstaande containerbewegingen uit te voeren, worden hierbij vastgelegd. De doelfunctie van het rittenplanningsprobleem bestaat hier uit het minimaliseren van het aantal gebruikte vrachtwagens en uit het minimaliseren van de afstand afgelegd door die vrachtwagens (Braekers et al., 2012). De optimale route wordt vervolgens weergegeven door figuur 12: een vrachtwagen vertrekt vanuit het vrachtwagendepot naar containerdepot twee, laadt de volle container bestemd voor importklant vier op en vertrekt naar importklant vier. Nadat deze volle container afgezet is, kan de vrachtwagen de lege container uit de vorige periode opladen en brengen naar containerdepot twee. Hierna vertrekt de vrachtwagen naar containerdepot één en brengt daarna een lege container naar exportklant vier. Merk op dat een rechtstreekse rit naar containerdepot één vanuit importklant vier, een betere oplossing zou zijn maar niet mogelijk is aangezien in de vorige fase de beweging van alle lege containers vastgelegd werd.



Figuur 12: Oplossing van het rittenplanningsmodel

3.4.4 Geïntegreerde optimalisatie van operationele planningsproblemen

Om de werking van een integratiemodel te illustreren wordt het voorbeeld uit paragraaf 3.4.3 hernomen. De gegevens en het fysieke netwerk blijven hetzelfde als hierboven (d.i. zoals weergegeven in figuur 10). Bij geïntegreerde optimalisatie wordt het operationele probleem niet meer verdeeld in twee deelproblemen: de optimale verdeling van lege containers wordt nu gelijktijdig met de routes bepaald. Enkel volle containers worden dus vastgelegd als transporttaken met een vaste oorsprong en bestemming. (Braekers et al., 2012) Dit omdat goederen in een volle container niet zomaar uitgewisseld kunnen worden. Het transporteren van lege containers daarentegen wordt flexibeler en de lege container voor exportklant drie kan van zowel containerdepot één of twee als van importklant vier komen. De oplossing voor het geïntegreerde model wordt weergegeven in figuur 13: een vrachtwagen vertrekt vanuit het vrachtwagendepot naar containerdepot twee, haalt vervolgens de volle container bestemd voor importklant vier op en vertrekt naar deze importklant. Na het lossen van de volle container bij importklant vier, wordt de lege container – beschikbaar uit de vorige periode – opgeladen en weggebracht naar exportklant drie. Tot slot keert de vrachtwagen terug naar het vrachtwagendepot.



Figuur 13: Oplossing van het geïntegreerde model

Deidda et al. (2008) ontwikkelen een deterministisch, statisch integratiemodel waarbij de verdeling van lege containers en de routes om deze lege containers op te halen, gelijktijdig worden bepaald. Het model geformuleerd door Deidda et al. (2008) houdt dus geen rekening met het minimaliseren van lege en volle containertransporten, enkel met het minimaliseren van lege containertransporten. Directe wissels tussen import- en exportklanten zijn toegelaten. Er wordt bovendien verondersteld dat slechts één type container bestaat en dat de voorraad lege containers in het havendepot (d.i. het enige depot dat in dit model gebruikt wordt) oneindig is. Iedere vrachtwagen heeft een capaciteit van twee containers. De doelfunctie van het integratiemodel bestaat uit het minimaliseren van de transportkost van vrachtwagens die minstens één lege container vervoeren. (Deidda et al., 2008)

Huth en Mattfeld (2009) formuleren naast een sequentieel model, een deterministisch dynamisch integratiemodel om de dagdagelijkse planning van containertransporten in een 'hub-and-spoke' of stervormig netwerk te ondersteunen. Het integratiemodel kan geformuleerd worden als een 'Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery' of VRPPD. De doelfunctie van dit integratiemodel minimaliseert de totale variabele kost gerelateerd aan de afstand die afgelegd wordt tussen twee opeenvolgende taken. In dit model wordt rekening gehouden met slechts één type container en directe wissels zijn toegelaten. Daarnaast kan elke vrachtwagen maximaal twee containers transporteren. Tot slot kan opgemerkt worden dat het aantal beschikbare lege containers beperkt is en de mogelijkheid om containers te leasen niet wordt opgenomen. (Huth en Mattfeld, 2009)

Zhang et al. (2009) geven aan dat de verdeling van lege containers een belangrijk onderdeel vormt van het herpositioneren van containers in het hinterland. Een beslissingsmodel voor het transporteren van containers in het hinterland dient bijgevolg niet alleen rekening te houden met het bepalen van routes om volle containertransporten uit te voeren. Ook lege containertransporten dienen zo efficiënt mogelijk uitgevoerd te worden. Om deze beslissingen te ondersteunen, ontwikkelen Zhang et al. (2009) een deterministisch, statisch integratiemodel waarbij directe wissels zijn toegelaten en slechts één type container bestaat. Het fysieke netwerk van dit model bestaat uit één containerdepot en meerdere vrachtwagendepots. Er wordt verondersteld dat het aantal lege containers in het containerdepot oneindig is. Het model wordt geformuleerd als een handelsreizigersprobleem met meerdere handelsreizigers en tijdvensters ('multiple Traveling Salesman Problem with Time Windows of m-TSPTW'). De doelfunctie van dit model minimaliseert de totale tijd dat een vrachtwagen 'leeg' rondrijdt, d.i. zonder container of met een lege container. (Zhang et al., 2009) Zhang et al. (2010) bouwen in een volgende artikel verder op dit model en voegen de mogelijkheid van meerdere containerdepots toe.

Het door Braekers et al. (2012) gebruikte integratiemodel kan op ongeveer dezelfde manier geformuleerd worden als het door Braekers et al. (2012) voorgestelde rittenplanningsprobleem uit paragraaf 3.4.2. Zoals uitgelegd in de eerste alinea van deze paragraaf, liggen bij de start van de planningsperiode enkel de oorsprong en bestemming van de geladen containertransporten vast. Goederen in een volle container kunnen immers niet zomaar uitgewisseld worden en hebben daardoor een vaste oorsprong en bestemming. De oorsprong en bestemming van lege containers daarentegen dienen niet vast te liggen vooraleer de routes worden uitgetekend en kunnen gelijktijdig met het bepalen van die routes worden vastgelegd. Om de verdeling van lege containers gelijktijdig met de routes te bepalen, dienen enkele wijzigingen te worden aangebracht in het model geformuleerd in paragraaf 3.4.2. (Braekers et al., 2012) De volledige formulering van het integratiemodel zoals voorgesteld door Braekers et al. (2012), wordt in de volgende alinea's toegelicht.

Het integratiemodel kan gedefinieerd worden op een netwerkdiagram G met N knooppunten en A verbindingen. Hierbij is N gelijk aan de verzameling van het vrachtwagendepot (N_{VD} , index 0), de geladen containertransporten (N_L), de knooppunten waar een lege container wordt gevraagd (N_D) en de knooppunten waar een lege container wordt aangeboden (N_S).

$$N = \{N_{VD}, N_L, N_D, N_S\}$$

Net zoals in het vorige model wordt elke transporttaak of knooppunt gekarakteriseerd door de parameters d_i , s_i en een tijdsinterval $[a_i, b_i]$ waarbinnen de taak dient te worden uitgevoerd. Voor de verzameling van knooppunten binnen N_{VD} en N_L worden deze parameters op dezelfde manier gedefinieerd als voor het rittenplanningsmodel uit paragraaf 3.4.2. Voor de verzameling van knooppunten binnen N_D en N_S zijn er enkele wijzigingen. Zo is d_i gelijk aan nul. Dit omdat elke taak binnen deze verzamelingen gedefinieerd wordt door één locatie of entiteit in plaats van twee entiteiten (cfr. figuur 8). Deze locatie (of entiteit) is gelijk aan de plaats (of de klant) waar de lege container gevraagd of aangeboden wordt. Ook s_i is om die reden slechts gelijk aan de tijd om de container te laden of te lossen (zonder de tijd nodig om taak i uit te voeren). Het tijdsinterval gerelateerd aan de vraag- en aanbodentiteiten is respectievelijk gelijk aan $[0, b_i]$ en $[a_i, b_i]$. Zo kan een gevraagde lege container gelost worden tot b_i , het tijdstip waarop de lege container ten laatste bij knooppunt i afgeleverd mag worden. Een aangeboden lege container kan ten vroegste opgehaald worden op het tijdstip dat de lege container beschikbaar is en ten laatste op het sluitingsuur van het vrachtwagendepot. (Braekers et al., 2012) Een overzicht van de gebruikte notatie zoals gehanteerd door Braekers et al. (2012) per deelverzameling van N wordt weergegeven in tabel 2.

Tabel 2: Notatie per deelverzameling van N (uit Braekers et al., 2012)

Knooppunten	Afstand d_i	Servicetijd s_i	Tijdsinterval $[a_i, b_i]$
$i \in N_{VD}$	0	0	$[0, b_i]$
$i \in N_L$	Afstand om taak i te volbrengen	Tijd om taak i uit te voeren + laden en lossen	$[a_i, b_i]$
$i \in N_S$	0	Tijd om lege container op te laden	$[a_i, b_i]$
$i \in N_D$	0	Tijd om lege container te lossen	$[0, b_i]$

De betekenis van A verandert niet en is gelijk aan de verzameling van verbindingen tussen de knooppunten in dit netwerk. De af te leggen afstand tussen het einde van taak i tot het begin van taak j wordt genoteerd door \hat{d}_{ij} . Deze afstand wordt – zoals gesuggereerd door het accent circonflexe – op een andere manier berekend dan d_{ij} uit het rittenplanningsprobleem (Braekers et al., 2012). De berekening ervan wordt weergegeven in tabel 3.

Tabel 3: Berekening van \hat{d}_{ij} (uit Braekers et al., 2012)

	$j \in N_{VD} \cup N_L$	$j \in N_S$	$j \in N_D$
$i \in N_{VD} \cup N_L$	d_{ij}	d_{ij}	$\min_{e=1,\dots,r} (d_{ie} + d_{ej})$
$i \in N_S$	$\min_{e=1,\dots,r} (d_{ie} + d_{ej})$	$\min_{e=1,\dots,r} (d_{ie} + d_{ej})$	d_{ij}
$i \in N_D$	d_{ij}	d_{ij}	$\min_{e=1,\dots,r} (d_{ie} + d_{ej})$

Uit deze tabel kan de afstand tussen knooppunten i en j voor de verschillende scenario's worden afgelezen. Zo bedraagt de afstand, wanneer een vrachtwagen net een lege container heeft afgezet bij een exportklant ($i \in N_D$) en de nieuwe taak bestaat uit het opladen van een lege container bij bijvoorbeeld een importklant ($j \in N_S$), d_{ij} . Wanneer een vrachtwagen net een lege container heeft opgeladen ($i \in N_S$) en de nieuwe taak bestaat uit het opladen van nog een aangeboden lege container ($j \in N_S$) moet deze vrachtwagen (gezien de beperkte capaciteit) eerst stoppen aan één van de beschikbare containerdepots e (index $1, \dots, r$). Het containerdepot waarvoor de afstand van taak i naar dit depot en vervolgens van dit depot naar taak j het kleinst is, wordt gekozen. De interpretaties van de overige cellen zijn gelijkaardig. Ook \hat{t}_{ij} is niet gelijk aan t_{ij} : \hat{t}_{ij} is gelijk aan de tijd nodig om van taak i naar taak j te rijden plus de noodzakelijke laad- en lostijd wanneer gestopt wordt aan een containerdepot of wanneer rechtstreeks van een aanbod- naar een vraagpunt van lege containers wordt gereden. (Braekers et al., 2012)

Bij de formulering van dit integratiemodel wordt de volgende notatie gebruikt:

M = vaste kost per vrachtwagen

K = maximum aantal beschikbare vrachtwagens

De beslissingsvariabelen kunnen gedefinieerd worden als:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{als een voertuig van het einde van taak } i \text{ naar het begin van taak } j \text{ rijdt} \\ 0 & \text{in alle andere gevallen} \end{cases}$$

$$x_{0i} = \begin{cases} 1 & \text{als een voertuig van het vrachtwagendepot naar het begin van taak } i \text{ rijdt} \\ 0 & \text{in alle andere gevallen} \end{cases}$$

t_i = exacte tijdstip waarop een voertuig taak i aanvangt

De doelfunctie van dit rittenplanningsmodel is gelijk aan:

$$\text{Min} \sum_{i \in N} x_{0i} M + \sum_{(i,j) \in A} \hat{d}_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in N} d_i$$

Deze doelfunctie dient te voldoen aan volgende beperkingen:

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_0 \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0i} \leq K \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = \sum_{j \in N} x_{ji} \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$t_i + s_i + \hat{t}_{ij} \leq t_j + M(1 - x_{ij}) \quad \forall (i, j) \in A, j \neq 0 \quad (4)$$

$$t_i + s_i + \hat{t}_{i0} \leq b_0 + M(1 - x_{i0}) \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$a_i \leq t_i \leq b_i \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A, j \neq 0 \quad (8)$$

De doelfunctie en beperkingen worden op dezelfde manier geformuleerd als in het rittenplanningsprobleem voorgesteld door Braekers et al. (2012), waardoor deze kunnen op dezelfde manier geïnterpreteerd kunnen worden (cfr. paragraaf 3.4.2).

3.4.5 Vergelijking tussen sequentiële en geïntegreerde optimalisatie

Braekers et al. (2009) ontwikkelen een containerallocatiemodel, een rittenplanningsmodel en een integratiemodel dat zowel het containerallocatieprobleem als het rittenplanningsprobleem tegelijkertijd beschouwt. Experimenten tonen aan dat een integratiemodel leidt tot de beste resultaten: variabele kosten nemen af en ook het aantal vereiste voertuigen daalt (Braekers et al., 2009). Hetzelfde kan afgeleid worden uit de oplossing van de gegeven probleeminstantie (cfr. figuur 10): de geïntegreerde oplossing telt twee (lege) containerritten (cfr. figuur 13) minder dan de sequentiële oplossing (cfr. figuur 12) waardoor de totale afgelegde afstand in vergelijking met de sequentiële oplossing aanzienlijk daalt. De geïntegreerde oplossing is duidelijk beter dan de sequentiële oplossing.

Hoewel het oplossen van een sequentieel optimalisatieprobleem minder complex is, leidt het dus vaak tot een suboptimale oplossing. De oplossing van een probleeminstantie door integratie van het containerallocatie- en rittenplanningsprobleem geeft daarentegen het globale optimum weer. De complexiteit van het planningsprobleem neemt (zeker voor grote probleeminstanties) door de grotere flexibiliteit van lege containers echter toe. Verder zorgen ook de grotere tijdsintervallen voor laden en lossen van de vraag- en aanbodpunten van lege containers ervoor dat het integratieprobleem moeilijker op te lossen is dan het sequentieel planningsprobleem. Toch kunnen dergelijke problemen dankzij recente evoluties op het gebied van operationeel onderzoek opgelost worden. (Braekers et al., 2012)

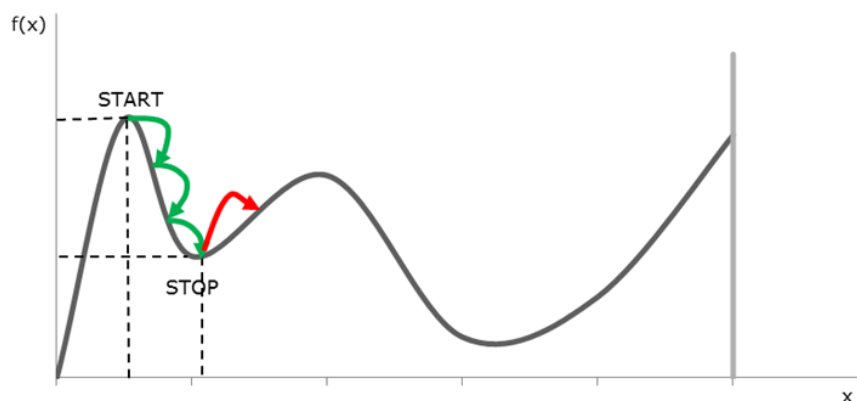
Hoofdstuk 4: Praktijkstudie

In het vorige hoofdstuk worden de belangrijkste eigenschappen van het containerallocatie-, rittenplannings- en integratiemodel, voorgesteld in het artikel van Braekers et al. (2012), aangehaald. In dit hoofdstuk zal in paragraaf 4.1 dieper ingegaan worden op de metaheuristiek gebruikt om het rittenplanningsmodel (cfr. paragraaf 3.4.2) en het integratiemodel (cfr. paragraaf 3.4.4) op te lossen. Verder wordt in paragraaf 4.2 door middel van een experiment nagegaan wat het effect is op de resultaten van het operationele planningsmodel indien het planningsprobleem respectievelijk opgelost wordt met een sequentiële en geïntegreerde oplossingsmethode. Tot slot wordt door middel van datzelfde experiment nagegaan wat het effect is van het toelaten van een directe wissel. In paragraaf 4.3 wordt het effect van een directe wissel nagegaan indien rekening wordt gehouden met de praktische problemen geassocieerd aan zo'n directe wissel.

4.1 Deterministic annealing

4.1.1 Werking van het deterministic annealing algoritme

Zoals eerder aangehaald worden rittenplanningsproblemen meestal opgelost met heuristieken of metaheuristieken. Bij klassieke heuristieken wordt gestart met een bepaalde beginoplossing die vervolgens iteratief verbeterd wordt. Het proces stopt als een slechtere oplossing dan de beginoplossing gevonden wordt. In figuur 14 wordt de werkwijze van een heuristiek voor een minimalisatieprobleem visueel voorgesteld.

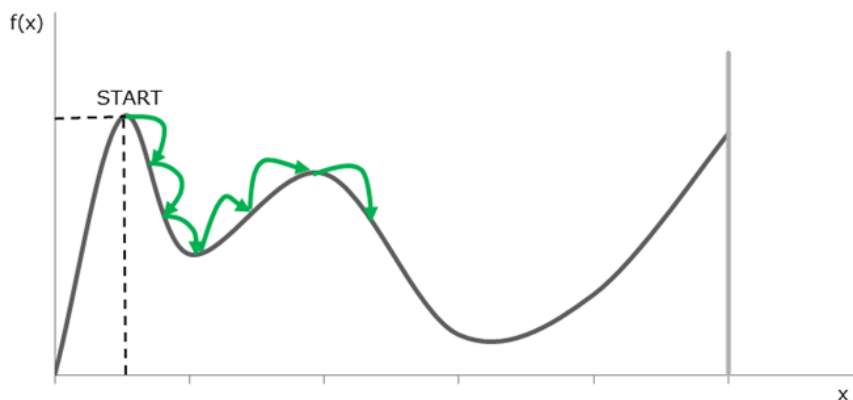


Figuur 14: Werkwijze van een klassieke heuristiek (aangepast uit Hillier en Lieberman, 2010)

De beginoplossing wordt weergegeven door het startcoördinaat. Elke iteratie wordt voorgesteld door een pijl. De heuristiek stopt in het stopcoördinaat aangezien de daaropvolgende iteratie geen betere oplossing geeft dan de vorige iteratie. Vervolgens kan

dit proces herstart worden met een nieuwe beginoplossing. Hierbij wordt duidelijk dat klassieke heuristieken bij een groot zoekgebied – zoals bij combinatorische optimalisatieproblemen – vaak geen goed alternatief zijn voor exacte algoritmes. (Cordeau et al., 2002; Hillier en Lieberman, 2010)

Ook bij metaheuristieken wordt gestart met een bepaalde beginoplossing, alleen wordt een verslechtering in de doelfunctie in bepaalde gevallen nu wel toegelaten. In figuur 15 wordt de werkwijze van een metaheuristiek visueel voorgesteld. Hoeveel iteraties worden uitgevoerd, is probleemspecifiek. (Cordeau et al., 2002; Hillier et al., 2010)



Figuur 15: Werkwijze van een metaheuristiek (aangepast uit Hillier en Lieberman, 2010)

Braekers et al. (2012) maken gebruik van een 'deterministic annealing' algoritme voor het oplossen van het gebruikte 'Traveling Salesman Problem' (am-TSPTW). Dit is een metaheuristiek en een variant op 'simulated annealing' dat geïntroduceerd werd door Kirkpatrick et al. (1983). Hierbij wordt vertrokken van een toegelaten oplossing. Daarna wordt in elke iteratie een nieuwe oplossing voorgesteld. Indien deze oplossing een verbetering vormt van de huidige oplossing, wordt deze oplossing automatisch aanvaard en opgeslagen als nieuwe huidige oplossing. Indien de oplossing geen verbetering vormt, wordt deze oplossing slechts aanvaard met een bepaalde kans. Indien deze kans groter is dan een willekeurig gekozen getal tussen nul en één, wordt deze oplossing aanvaard als de nieuwe huidige oplossing. Deze kans wordt berekend als e^x waarbij x – voor een minimalisatieprobleem – gelijk is aan de waarde van de doelfunctie van de nieuwe oplossing min de waarde van de doelfunctie van de huidige oplossing, gedeeld door de gekozen drempelwaarde T . (Hillier en Lieberman, 2010; Kirkpatrick et al., 1983)

$$x = \frac{Z(\text{nieuwe oplossing}) - Z(\text{huidige oplossing})}{T}$$

Deze parameter T of temperatuur (naar analogie met het fysisch proces annihilatie) wordt enkele iteraties constant gehouden en wordt vervolgens verminderd tot T' . Hoeveel iteraties per T worden uitgevoerd en met hoeveel T precies afneemt, is probleemspecifiek. Net als het brengen van de waarde van T op de oorspronkelijke waarde nadat de kans herleid werd tot nul en het herstarten van T wanneer te ver wordt afgedwaald. (Hillier en Lieberman, 2010; Kirkpatrick et al., 1983)

'Deterministic annealing' steunt op dezelfde werking als 'simulated annealing' maar zal bij het accepteren van nieuwe toegelaten oplossingen die een verslechtering zijn van de huidige oplossing een andere acceptatieregel vooropstellen: een oplossing die geen verbetering vormt van de huidige oplossing, wordt enkel geaccepteerd indien het verschil tussen de waarde van de doelfunctie van de nieuwe oplossing en dat van de huidige oplossing, kleiner is dan de drempelwaarde T . (Dueck en Scheuer, 1990)

$$Z(\text{nieuwe oplossing}) - Z(\text{huidige oplossing}) < T$$

Dueck en Scheuer (1990) halen aan dat het 'deterministic annealing' algoritme eenvoudiger is, minder tijd inneemt en gemiddeld tot betere resultaten dan de stochastische variant zal leiden.

De doelfunctie van het rittenplanningsmodel zoals voorgesteld door Braekers et al. (2012) minimaliseert het aantal gebruikte vrachtwagens en de totale afgelegde afstand afgelegd door die vrachtwagens (cfr. paragraaf 3.4.2). Braekers et al. (2012) lossen het rittenplannings- en het integratiemodel respectievelijk in één en in twee fase(n) op. Indien het model in één fase wordt opgelost, worden het aantal gebruikte vrachtwagens en de totale afgelegde afstand gelijktijdig geminimaliseerd. Naast een gelijktijdige minimalisatie van het rittenplanningsprobleem wordt dit lineair programmeringsprobleem door Braekers et al. (2012) ook in twee fasen opgelost. Dit levert in termen van het aantal gebruikte vrachtwagens betere resultaten op. Om die reden zal het rittenplanningsprobleem in volgende paragrafen telkens in twee fasen worden opgelost. Bijgevolg zal een nieuwe oplossing met minder vrachtwagens dan de huidige oplossing altijd aanvaard worden. Net zoals oplossingen met hetzelfde aantal vrachtwagens maar met een lagere afstand dan de huidige oplossing. Nieuwe oplossingen met hetzelfde aantal vrachtwagens maar een hogere afstand worden enkel aanvaard indien deze afstand kleiner is dan de afstand van de huidige oplossing plus parameter T . (Braekers et al., 2012)

4.1.2 Definiëren van de initiële oplossing

Hierboven werd aangehaald dat we voor deze metaheuristiek vertrekken van een beginoplossing. Deze beginoplossing wordt opgesteld door middel van een insertieheuristiek en start met één vrachtwagen en een aantal taken of – in dit geval – containerbewegingen die tot een goed einde gebracht moeten worden. Bij de eerste iteratie wordt een taak geselecteerd en vervolgens toegewezen aan de eerste vrachtwagen. De tweede iteratie kiest een volgende taak en gaat ten eerste na of – rekening houdend met de tijdvensters van elke klant – deze taak uitgevoerd zou kunnen worden voor of na de eerder toegewezen taak. Daarna wordt nagegaan welke optie, d.i. voor, na of door het inschakelen van een nieuwe vrachtwagen de taak het goedkoopst zou uitgevoerd kunnen worden. Indien een lege of volle container niet binnen het door de klant opgelegde tijdvenster afgeleverd zou kunnen worden, wordt altijd een nieuwe vrachtwagen ingeschakeld. Nadat alle geplande containertransporten iteratief toegewezen werden, vormt de oplossing van deze insertieheuristiek de beginoplossing en kan van start gegaan worden met de implementatie van het ‘deterministic annealing’ algoritme. (Braekers et al., 2012)

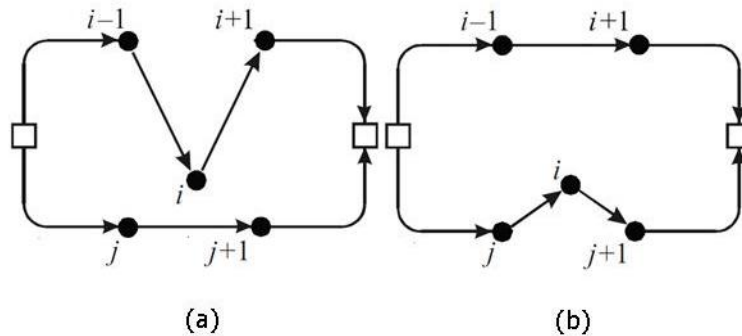
4.1.3 Werking van de lokale zoekoperatoren

Een metaheuristiek, zoals ‘simulated annealing’, vertrekt van een bepaalde beginoplossing en stelt elke iteratie een nieuwe oplossing voor. Deze buuroplossingen worden gezocht door middel van verschillende lokale zoekoperatoren die de omgeving verkennen rond de huidige oplossing. Een dergelijke buuroplossing kan een verslechtering of verbetering van de huidige oplossing zijn. (Cordeau et al., 2002; Hillier en Lieberman, 2010)

Braekers et al. (2012) maken gebruik van vijf verschillende lokale zoekoperatoren. Hiervan proberen drie zoekoperatoren de totale afgelegde afstand te verminderen terwijl het aantal voertuigen constant gehouden wordt. De twee andere zoekoperatoren worden gebruikt om het aantal voertuigen te verminderen. Deze zoekoperatoren worden in willekeurige volgorde gebruikt. In de volgende twee paragrafen wordt eerst de werking uitgelegd van de drie lokale zoekoperatoren die de totale afgelegde afstand proberen te verminderen. Vervolgens worden de twee overige operatoren toegelicht.

Een ‘relocate’ operator selecteert bij elke iteratie willekeurig een taak en probeert deze taak in te plannen in een andere route of op een andere plaats binnen dezelfde route. Indien na het invoegen van deze taak alle taken uitgevoerd kunnen worden binnen de opgelegde laad- en losuren, wordt nagegaan wat het effect van deze ‘relocate’ is op de totale afgelegde afstand. (Bräysy en Gendreau, 2005) Dit proces wordt geïllustreerd door figuur 16. Op deze figuur stelt elk punt een te bezoeken klant of uit te voeren transporttaak voor. In figuur 16

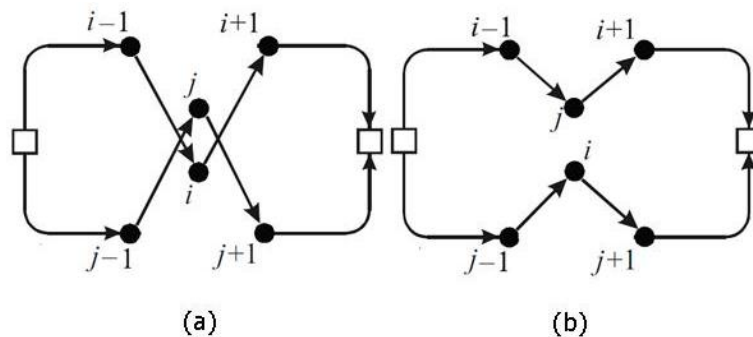
(a) vertrekken twee vrachtwagens vanuit een vrachtwagendepot. Vrachtwagen één voert respectievelijk taken $i-1$, i en $i+1$ uit. Vrachtwagen twee respectievelijk taken j en $j+1$. Na het uitvoeren van deze taken keert elke vrachtwagen terug naar het dichtstbijzijnde vrachtwagendepot. Na het toepassen van een 'relocate' operator wijzigt de situatie: taak i wordt nu ingevoegd in de route van vrachtwagen twee. Hierdoor voert vrachtwagen één respectievelijk taken $i-1$ en $i+1$ uit, alvorens terug te keren naar het dichtstbijzijnde depot. Vrachtwagen twee voert respectievelijk de taken j , i en $j+1$ uit. Deze situatie wordt schematisch weergegeven in figuur 16 (b). Uit figuur 16 blijkt dat – door de positie van klant i in het fysieke netwerk – de 'relocate' operator een oplossing voorstelt die een verbetering is van de oplossing in situatie (a): i is immers dichterbij de klanten j en $j+1$ waardoor het uitvoeren van transporttaak i door vrachtwagen twee zal resulteren in een lagere totale afgelegde afstand. Hierbij dient echter wel opgemerkt te worden dat in het onderstaande voorbeeld geen tijdvensters worden opgelegd aan de entiteiten uit het fysieke netwerk. Dit omdat het voorbeeld enkel bedoeld is ter illustratie van de 'relocate' operator. Ook in de hierop volgende voorbeelden zullen om diezelfde reden geen tijdvensters worden opgelegd. Door dit gebrek aan tijdvensters en het feit dat gebruik gemaakt wordt van een metaheuristiek, zal elke oplossing voorgesteld door de in deze sectie aangehaalde zoekoperatoren, aanvaard en opgeslagen worden als de nieuwe en huidige oplossing.



Figuur 16: Voorbeeld van een 'relocate' operator (uit Bräysy en Gendreau, 2005)

Een 'exchange' of 'swap' operator selecteert bij elke iteratie willekeurig twee of meer taken (binnen eenzelfde route of hierbuiten) en verwisselt deze – nadat gecontroleerd werd of deze 'exchange' toegelaten is – van plaats. Vervolgens wordt nagegaan wat het effect is op de totale afgelegde afstand. (Bräysy en Gendreau, 2005) Dit proces wordt geïllustreerd door figuur 17. Op deze figuur stelt elk punt een te bezoeken klant of uit te voeren transporttaak voor. In figuur 17 (a) vertrekken twee vrachtwagens vanuit een vrachtwagendepot. Vrachtwagen één voert respectievelijk taken $i-1$, i en $i+1$ uit. Vrachtwagen twee respectievelijk taken $j-1$, j en $j+1$. Na het uitvoeren van deze taken keert elke vrachtwagen terug naar het dichtstbijzijnde vrachtwagendepot. In figuur 17 (b) wordt de situatie weergegeven na het toepassen van een 'swap' operator. Deze 'swap' operator selecteert

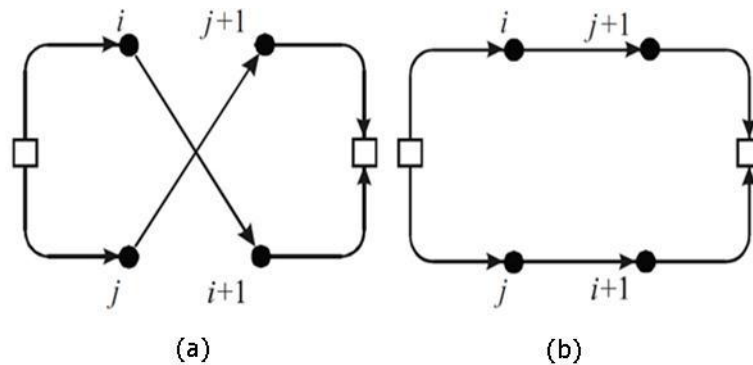
taken i en j en verwisselt deze: taak i wordt nu ingevoegd in de route van vrachtwagen twee, taak j wordt ingevoegd in de route van vrachtwagen één. Hierdoor voert vrachtwagen één respectievelijk taken $i-1$, j en $i+1$ uit, alvorens terug te keren naar het dichtstbijzijnde depot. Vrachtwagen twee voert respectievelijk de taken $j-1$, i en $j+1$ uit. Uit figuur 17 blijkt dat – door de positie van klant i en j in het fysieke netwerk – de ‘exchange’ of ‘swap’ operator een oplossing voorstelt die een verbetering is van de oplossing in situatie (a): i is immers dichters gesitueerd bij de klanten $j-1$ en $j+1$ waardoor het uitvoeren van transporttaak i door vrachtwagen twee zal resulteren in een lagere totale afgelegde afstand. Daarnaast is transporttaak j dichters gelegen bij klanten $i-1$ en $i+1$ waardoor het uitvoeren van transporttaak j door vrachtwagen één zal resulteren in een lagere totale afgelegde afstand.



Figuur 17: Voorbeeld van een ‘swap’ operator (Bräysy en Gendreau, 2005)

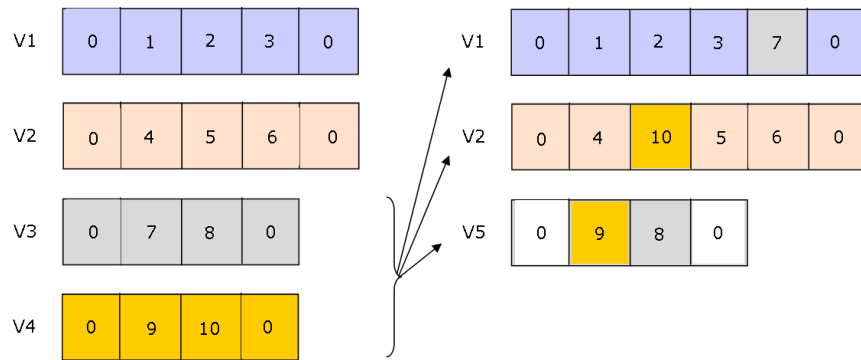
De ‘2-opt*’ operator breekt twee routes in twee en voegt het eerste deel van de eerste route samen met het tweede deel van de tweede route. Het eerste deel van de tweede route wordt vervolgens samengevoegd met het tweede deel van de eerste route. Ook hier wordt eerst nagegaan of deze samenvoeging toelaatbaar is en vervolgens wat het effect is van deze wijziging op de totale afgelegde afstand. (Bräysy en Gendreau, 2005) Dit proces wordt geïllustreerd door figuur 18. In figuur 18 (a) vertrekken twee vrachtwagens vanuit een vrachtwagendepot. Vrachtwagen één voert respectievelijk taken i en $i+1$ uit. Vrachtwagen twee respectievelijk taken j en $j+1$. Na het uitvoeren van deze taken keert elke vrachtwagen terug naar het dichtstbijzijnde vrachtwagendepot. In figuur 18 (b) wordt de situatie weergegeven na het uitvoeren van een ‘2-opt*’ operator. Deze ‘2-opt*’ operator breekt zowel de route van vrachtwagen één (route één) als die van twee (route twee) doormidden: het eerste deel van route één (d.i. taak i) wordt nu samengevoegd met het tweede deel van de tweede route (d.i. taak $j+1$). Het eerste deel van de tweede route (d.i. taak j) wordt vervolgens samengevoegd met het tweede deel van de eerste route (d.i. taak $i+1$). Aangezien geen tijdvensters worden opgelegd, is deze samenvoeging toelaatbaar en wordt oplossing (b) opgeslagen als huidige oplossing. Hierdoor voert vrachtwagen één respectievelijk taken i en $j+1$ uit, alvorens terug te keren naar het dichtstbijzijnde depot.

Vrachtwagen twee voert respectievelijk de taken j en $i+1$ uit. Uit figuur 18 blijkt dat – door de positie van klant $i+1$ en $j+1$ in het fysieke netwerk – de '2-opt*' operator een oplossing voorstelt die een verbetering is van de oplossing in situatie (a): $j+1$ is immers dichtersitueerd bij klant i waardoor het uitvoeren van transporttaak $j+1$ (in plaats van $i+1$) door vrachtwagen één zal resulteren in een lagere totale afgelegde afstand. Daarnaast is transporttaak $i+1$ dichtersitueerd bij klant j waardoor het uitvoeren van transporttaak $j+1$ door vrachtwagen twee zal resulteren in een lagere totale afgelegde afstand.



Figuur 18: Voorbeeld van een '2-opt*' operator (Bräysy en Gendreau, 2005)

De eerste zoekoperator die instaat voor een vermindering van het aantal vrachtwagens, tracht alle taken van een willekeurig gekozen vrachtwagen aan de taken van de overige vrachtwagens toe te voegen (Braekers et al., 2012). Ook deze zoekoperator kan het best verduidelijkt worden aan de hand van een simpel voorbeeld: stel dat vrachtwagen één respectievelijk de taken 1, 2, 3 en 4 dient uit te voeren, vrachtwagen twee respectievelijk de taken 4, 5, 6 en 7 en vrachtwagen drie verantwoordelijk is voor de goede uitvoering van respectievelijk taken 8 en 9. Dan kan deze zoekoperator nagaan of bijvoorbeeld taken 8 en 9 niet verdeeld kunnen worden over vrachtwagen één en/of twee. Hierdoor zal het aantal gebruikte voertuigen – indien dit niet in strijd is met de aanwezige tijdvensters – dalen van drie naar twee. De tweede operator probeert alle taken van de p vrachtwagens met het laagste aantal taken te verdelen over de overige vrachtwagens plus $p-1$ nieuwe vrachtwagen(s) (Braekers et al., 2012). In figuur 19 is p gelijk aan twee. De taken van vrachtwagens drie (V3) en vier (V4) worden dan verdeeld over vrachtwagens één (V1), twee (V2) en vrachtwagen vijf (V5, een nieuwe vrachtwagen).



Figuur 19: Voorbeeld van een zoekoperator om het aantal voertuigen te verlagen

Indien een dergelijke samenvoeging – rekening houdend met de aanwezige tijdvensters – toelaatbaar is, wordt deze altijd aanvaard: de doelfunctie bestaat immers eerst uit het minimaliseren van het aantal vrachtwagens, pas daarna wordt de totale afgelegde afstand geminimaliseerd. (Braekers et al., 2012)

4.2 Effect van de oplossingsaanpak en een directe wissel

4.2.1 Opzet en robuustheid van het experiment

In paragrafen 3.4.3 en 3.4.4 werd door middel van een simpel voorbeeld aangetoond dat de geïntegreerde oplossingsaanpak tot een beter resultaat leidt dan de sequentiële oplossingsaanpak. Verder tonen ook rekenkundige experimenten aan dat een integratiemodel leidt tot de beste resultaten. Zo ontwikkelden Braekers et al. (2009) een containerallocatiemodel, een rittenplanningsmodel en een integratiemodel. Deze modellen worden in het artikel door Braekers et al. (2009) gebruikt om tien willekeurig gegenereerde probleeminstaties of transportproblemen op te lossen. De karakteristieken van het fysieke netwerk waarin de transporttaken dienen uitgevoerd te worden, blijven dezelfde. Er is dus met andere woorden slechts sprake van één netwerk. Het uitvoeren van dit experiment toont aan dat het integratiemodel leidt tot de beste resultaten. (Braekers et al., 2009) Ook in onderstaand experiment wordt de efficiëntie van de integratiemethode vergeleken met de sequentiële oplossingsmethode. Hiervoor worden het containerallocatie-, rittenplannings- en integratiemodel, voorgesteld door Braekers et al. (2012), gebruikt.

Het door Braekers et al. (2012) voorgestelde containerallocatie-/integratiemodel laat een directe wissel tussen import- en exportklanten toe. Het toelaten van directe wissels zou immers – zoals hierboven ook aangehaald werd – het aantal lege containertransporten aanzienlijk kunnen reduceren. In het tweede deel van dit experiment wordt nagegaan wat het effect is van een directe wissel op het aantal ingezette voertuigen en de totale afgelegde afstand. Dit voor zowel de sequentiële als de integratiemethode. Dit kan door voor beide oplossingsmethodes een directe wissel te verbieden in het containerallocatie-

/integratiemodel en deze resultaten vervolgens te vergelijken met de resultaten, verkregen aan de hand van het 'oorspronkelijke' model (d.i. het sequentiële of geïntegreerde model met directe wissel).

Om de robuustheid van dit experiment te verzekeren, worden bovenstaande parameterveranderingen doorgevoerd voor alle probleeminstanties voorgesteld door Braekers et al. (2012). Elke probleeminstantie is samengesteld uit een bepaalde klasse en een willekeurig gegenereerd takenpakket van lege en volle containertransporten. Een klasse wordt gedefinieerd door vier kritieke eigenschappen (of factoren) die een invloed uitoefenen op het lege containerminimalisatieprobleem en waaraan telkens een laag (-) of een hoog niveau (+) toegekend kan worden. (Braekers et al., 2012) Deze kritieke eigenschappen bestaan uit:

- F1 = de breedte van het tijdvenster voor geladen containers (een willekeurig getal tussen 60 en 120 minuten (-) of tussen 120 en 240 minuten (+));
- F2 = het aantal containerdepots (één (-) of drie (+));
- F3 = het aantal knooppunten of transporttaken in het netwerk (honderd (-) of tweehonderd (+));
- F4 = de grootte van het gebied waarin de import- en exportklanten verspreid liggen (een gebied van 25 op 25 kilometer (-) of vijftig op vijftig kilometer (+)). (Braekers et al., 2012)

Indien rekening gehouden wordt met de interacties tussen de verschillende factoren, moeten zestien (d.i. 2^4 waarbij vier het aantal factoren aanduidt en twee, het aantal niveaus) verschillende factor-niveaucombinaties of klassen gegenereerd worden. Dit 2^4 -factorieel ontwerp wordt hieronder in een ontwerpmatrix weergegeven. (Braekers et al., 2012; Law en Kelton, 2000) Aangezien naast de breedte van de tijdvensters en de geografische spreiding van het netwerk ook rekening gehouden wordt met het takenpakket dat kan verschillen, wordt elke klasse uitgevoerd met drie verschillende takenpakketten. Dit levert een totaal op van 48 probleeminstanties die gegenereerd worden met de hulp van het softwareprogramma Visual C++ 2008 Express Edition. (Braekers et al., 2012) Tot slot is het algoritme zo geprogrammeerd dat voor elke instantie door C++ vijf iteraties worden uitgevoerd. Deze resultaten worden op commando van het geschreven algoritme ingevoerd in een tekstbestand en vervolgens handmatig geëxporteerd naar een Excelbestand. Een gedetailleerd overzicht van de gemiddelde resultaten over vijf iteraties kan teruggevonden worden in bijlage 1.

Tabel 4: Een 2⁴-factorieel ontwerp (uit Braekers et al., 2012)

Klasse	F1	F2	F3	F4	Klasse	F1	F2	F3	F4
1	-	-	-	-	9	-	-	-	+
2	+	-	-	-	10	+	-	-	+
3	-	+	-	-	11	-	+	-	+
4	+	+	-	-	12	+	+	-	+
5	-	-	+	-	13	-	-	+	+
6	+	-	+	-	14	+	-	+	+
7	-	+	+	-	15	-	+	+	+
8	+	+	+	-	16	+	+	+	+

4.2.2 Experimentele resultaten

4.2.2.1 Overzicht van de resultaten

De resultaten uit bijlage 1 worden met behulp van MS Excel geanalyseerd. Het gemiddeld aantal gebruikte vrachtwagens, de gemiddelde totale afgelegde afstand en de gemiddelde rekentijd kunnen voor elk van de modelspecificaties teruggevonden worden in tabel 5. Uit deze resultaten blijkt dat het gemiddelde verschil over alle probleeminstanties tussen de sequentiële (S) en de integratiemethode (I) voor dezelfde parameters niet zo heel groot is, al doet de geïntegreerde oplossing het (vooral in termen van de totale afgelegde afstand) net iets beter.

Tabel 5: Vergelijking van de gemiddelde resultaten

	S		I	
	DW	GDW	DW	GDW
Gem. aantal vrachtwagens	10,03	11,95	9,99	11,94
Gem. afgelegde afstand (km)	1836,94	2338,78	1815,23	2327,26
Gem. rekentijd (s)	8,05	11,95	6,59	15,45

Het gemiddelde verschil tussen het toevoegen van een directe wissel (DW) en het weglaten hiervan (GDW), is wel erg groot. Voor zowel de sequentiële als de geïntegreerde oplossingsaanpak bedraagt het verschil – in termen van vrachtwagens – gemiddeld ongeveer twee voertuigen. Bij de sequentiële oplossingsaanpak neemt de gemiddelde afgelegde afstand – door het toelaten van een directe wissel tussen import- en exportklanten – af met 501,84 kilometer. Voor de geïntegreerde aanpak bedraagt de gemiddelde totale afgelegde afstand zonder directe wissel 2327,26 kilometer. Met directe wissel gemiddeld zo'n 1815,23 kilometer, een gemiddelde afname van 512,03 kilometer.

De gemiddelde rekestijden voor de scenario's zonder directe wissel liggen gemiddeld iets hoger dan voor de scenario's met directe wissel. Dit is logisch en kan ook afgeleid worden uit figuur 2: wanneer directe wissels niet toegelaten zijn, moeten lege containers van importklanten naar containerdepots en van containerdepots naar exportklanten gebracht worden. Dit houdt in dat vier transporttaken uitgevoerd dienen te worden. Indien transportbedrijven echter gebruik maken van een directe wissel kan soms één lege containerrit uitgespaard worden. Hierdoor zal het aantal transporttaken in een model zonder directe wissel vaak iets hoger liggen dan in een model waarbij directe wissels wel toegelaten zijn, wat een iets grotere rekestijd tot gevolg heeft.

Verder kan opgemerkt worden dat in het algemeen de beste (gemiddelde) resultaten (in termen van het aantal ingezette voertuigen en de totale afgelegde afstand) voor elk takenpakket terug te vinden zijn bij klasse vier. Klasse vier wordt gekenmerkt door een groot tijdvenster, drie containerdepots, honderd transporttaken en een klein en dicht netwerk van klanten en containerdepots. Dit was te verwachten, aangezien de juist opgenoemde omstandigheden over alle klassen de beste omstandigheden zijn om de afstand, afgelegd door vrachtwagens en het aantal ingezette vrachtwagens, te minimaliseren. Deze factoren zijn – zeker op korte termijn – voor transportbedrijven oncontroleerbaar.

4.2.2.2 Sequentiële versus geïntegreerde oplossingsmethode

In deze paragraaf worden de resultaten van de geïntegreerde oplossingsaanpak (I) vergeleken met die van de sequentiële oplossingsaanpak (S) in termen van voertuigen (v) wanneer een directe wissel (DW) toegelaten is (v – DW) en wanneer geen directe wissel (GDW) wordt toegelaten (v – GDW). Vervolgens wordt de totale afgelegde afstand (a) bij de geïntegreerde oplossingsaanpak vergeleken met de totale afgelegde afstand bij de sequentiële oplossingsaanpak wanneer respectievelijk een directe wissel (a – DW) of geen directe wissel (a – GDW) toegelaten wordt. De volledige vergelijking op basis van de gebruikte oplossingsmethode is terug te vinden in tabel 6.

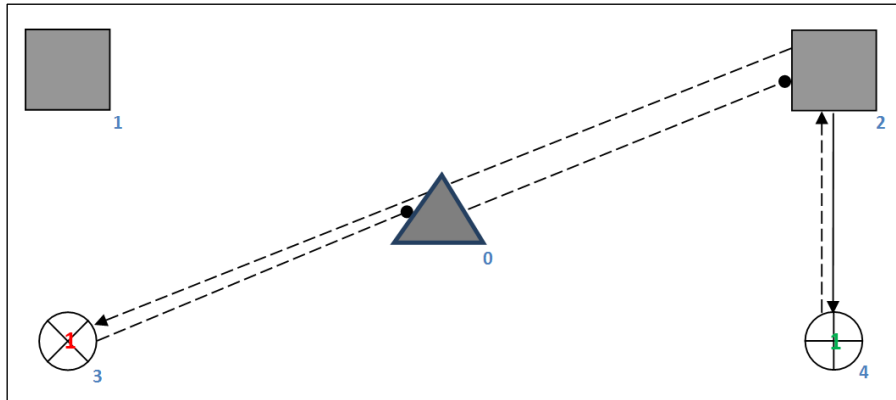
Tabel 6: Vergelijken van de sequentiële en geïntegreerde oplossingsaanpak

	v – DW	v – GDW	a – DW	a – GDW
I is beter dan S	14,58%	8,33%	97,92%	89,58%
I is gelijk aan S	83,33%	85,42%	0,00%	0,00%
I is slechter dan S	2,08%	6,25%	2,08%	10,42%

De geïntegreerde oplossingsaanpak leidt (indien een directe wissel niet toegelaten is) in 8,33 procent van de probleeminstanties tot een lager aantal gebruikte vrachtwagens dan de

sequentiële oplossingsaanpak. Voor ongeveer 85 procent van de probleeminstanties leidt de geïntegreerde oplossingsaanpak tot hetzelfde aantal vrachtwagens als de sequentiële oplossingsaanpak. Indien een directe wissel toegelaten wordt, geeft de geïntegreerde oplossingsaanpak in 14,58 procent van de probleeminstanties een beter resultaat op het vlak van gebruikte vrachtwagens en in ongeveer tachtig procent van de instanties hetzelfde resultaat als de sequentiële aanpak. In termen van totale afgelegde afstand, geeft de geïntegreerde oplossingsaanpak (met of zonder directe wissel) in ongeveer negentig procent van de gevallen een beter resultaat.

Merk op dat het verschil tussen de geïntegreerde en sequentiële oplossingsaanpak kleiner is wanneer geen directe wissel wordt toegelaten: op het vlak van het aantal ingezette voertuigen, ligt het aantal probleeminstanties waarvoor de geïntegreerde oplossingsaanpak tot een beter resultaat leidt, hoger wanneer een directe wissel wordt toegelaten (14,58 procent) dan wanneer een directe wissel niet is toegelaten (8,33 procent). Ook op het vlak van de totale afgelegde afstand ligt de efficiëntie van de geïntegreerde oplossingsaanpak, wanneer een directe wissel wordt toegelaten, hoger dan wanneer een directe wissel niet mogelijk is (van 97,92 procent naar 89,58 procent). Deze lagere efficiëntie kan te wijten zijn aan een dalend aantal verplaatsingsmogelijkheden. Het aantal verplaatsingsmogelijkheden of de flexibiliteit van de transporten daalt immers door het verbieden van een directe wissel tussen import- en exportklant. Dit kan verduidelijkt worden door middel van de voorbeelden aangehaald in paragrafen 3.4.3 en 3.4.4. In deze voorbeelden zijn directe wissels tussen import- en exportklanten toegelaten, waardoor een lege container getransporteerd kan worden tussen import- en exportklant. De beste oplossing voor het sequentiële en het integratieprobleem wordt respectievelijk weergegeven in figuren 12 en 13 (cfr. paragrafen 3.4.3 en 3.4.4). Indien een directe wissel niet meer toegelaten zou zijn, blijft de oplossing voor het sequentiële model dezelfde (d.i. zoals weergegeven in figuur 12). Dit omdat in de eerste fase van het sequentiële model de afstand het kleinst is wanneer geen directe wissel wordt uitgevoerd. In het integratiemodel zonder directe wissel kan de lege container gevraagd door exportklant drie nu van containerdepot één of twee komen (maar niet meer van importklant vier). De beste oplossing voor het geïntegreerde probleem wordt dan weergegeven door figuur 20: een vrachtwagen vertrekt vanuit het vrachtwagendepot naar containerdepot twee, laadt de volle container bestemd voor importklant vier op en vertrekt naar importklant vier. Nadat deze volle container afgezet is, kan de vrachtwagen de lege container uit de vorige periode opladen en brengen naar containerdepot twee. Hierna laadt de vrachtwagen een lege container bestemd voor exportklant vier op en vertrekt naar deze klant.



Figuur 20: Oplossing van het geïntegreerde model zonder directe wissel

Samenvattend kan gesteld worden dat de totale afgelegde afstand in het geïntegreerde model zonder directe wissel hoger is dan wanneer het integratiemodel met directe wissel gebruikt wordt. In dit voorbeeld is deze afstand nog steeds kleiner en bijgevolg beter dan de oplossing voorgesteld door de sequentiële oplossingsaanpak. Dit zal – omwille van de dalende flexibiliteit – voor andere probleeminstanties vaak niet het geval zijn.

4.2.2.3 Directe wissel versus geen directe wissel

In tabel 7 worden de resultaten van de sequentiële oplossingsaanpak met directe wissel vergeleken met de resultaten van de sequentiële oplossingsaanpak zonder directe wissel (respectievelijk in termen van voertuigen (v) en de totale afgelegde afstand (a)). Vervolgens worden de resultaten van de geïntegreerde oplossingsaanpak met directe wissel vergeleken met de resultaten van de geïntegreerde oplossingsaanpak zonder directe wissel (respectievelijk in termen van voertuigen en de totale afgelegde afstand). Indien gekeken wordt naar het effect van een directe wissel, zorgt het toelaten van een directe wissel ervoor dat – zowel bij de sequentiële als bij de geïntegreerde oplossingsaanpak – het aantal gebruikte vrachtwagens en de totale afgelegde afstand voor alle probleeminstanties daalt.

Tabel 7: Vergelijking zonder directe wissel en met directe wissel

	S		I	
	v	a	v	a
DW is beter dan GDW	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
DW is gelijk aan GDW	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
DW is slechter dan GDW	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

De efficiëntie van een directe wissel bleek ook al uit tabel 5: het toevoegen van een directe wissel zorgt bij beide oplossingsmethodes voor een gemiddelde daling van ongeveer twee voertuigen. De gemiddelde afgelegde afstand neemt door het toevoegen van een directe

wissel met ongeveer 500 kilometer af. Dit zowel voor de sequentiële als voor de integratiemethode.

4.2.2.4 Invloed van de factoren

Om het hoofdeffect van een bepaalde factor te testen, worden de factorinstellingen van één niveau naar een ander niveau verschoven terwijl de factorinstellingen van de andere factoren constant worden gehouden. De gedetailleerde resultaten van de toe- en afnames op het aantal ingezette voertuigen en de totale afgelegde afstand zijn respectievelijk terug te vinden in tabel 8 en 9. Hierbij worden de factorinstellingen van alle factoren van het minniveau naar het plusniveau verschoven. Dit voor alle modelspecificaties.

Tabel 8: Hoofdeffecten (%) van factoren F1 t.e.m. F4 op het aantal voertuigen

Hoofdeffect	S		I		Gemiddelde
	DW	GDW	DW	GDW	
F1	-4,77%	-2,07%	-4,21%	-2,40%	-3,36%
F2	-6,83%	-11,96%	-7,05%	-11,67%	-9,38%
F3	+85,35%	+88,30%	+85,42%	+88,28 %	+86,84%
F4	+36,12%	+34,08%	+35,73%	+33,89%	+34,96%

Tabel 9: Hoofdeffecten (%) van factoren F1 t.e.m. F4 op de afgelegde afstand

Hoofdeffect	S		I		Gemiddelde
	DW	GDW	DW	GDW	
F1	-4,68%	-3,59%	-4,82%	-3,39%	-4,12%
F2	-22,45%	-28,52%	-22,55%	-29,05%	-25,64%
F3	+80,82%	+90,21%	+80,69%	+90,08%	+85,45%
F4	+104,32%	+105,62%	+104,75%	+106,05%	+105,19%

Indien klanten het tijdsinterval waarbinnen geladen en gelost mag worden zouden vergroten, neemt het aantal ingezette voertuigen gemiddeld met 3,36 procent af. De afgelegde afstand neemt in dat geval gemiddeld af met 4,12 procent. Opvallend is dat het vergroten van de tijdvensters een groter effect heeft wanneer een directe wissel toegelaten is: een directe wissel kan vaak niet gerealiseerd worden door de beperkte laad- en losuren bij klanten en/of rederijen. Bij een directe wissel moet immers binnen een bepaalde tijdspanne een lege container opgehaald worden bij de importklant en verplaatst worden naar de exportklant die de lege container heeft aangevraagd. Deze lege container kan bovendien enkel geladen en gelost worden binnen de daarvoor voorziene laad- en losuren van respectievelijk de import-

en exportklant. Een versoepeling van deze laad- en losuren zou de planning en implementatie van een directe wissel bijgevolg iets eenvoudiger kunnen maken.

Een verhoging van het aantal containerdepots van één naar drie zorgt ervoor dat het aantal ingezette voertuigen met gemiddeld 9,38 procent afneemt. De totale afgelegde afstand neemt gemiddeld af met 25,64 procent. Toevoegen van meer containerdepots in het hinterland zorgt bijgevolg voor betere resultaten. Dit werd eerder al bevestigd door Boile et al. (2008) en Jula et al. (2006) (cfr. paragraaf 2.1.2). Containers kunnen dichter bij klanten opgehaald en afgezet worden waardoor kortere afstanden worden afgelegd en vrachtwagenchauffeurs efficiënter kunnen werken. Geen directe wissel zorgt voor een sterkere afname dan wanneer een directe wissel wel wordt toegestaan. Indien een directe wissel niet is toegestaan, zorgt een toevoeging van drie containerdepots voor heel wat meer transportmogelijkheden waardoor in sommige gevallen routes efficiënter afgelegd zullen kunnen worden.

Een verdubbeling van het aantal knooppunten van honderd naar tweehonderd zorgt voor een grote toename in het aantal ingezette voertuigen en de totale afgelegde afstand (respectievelijk een gemiddelde toename van 86,84 en 85,45 procent). Deze toename is niet evenredig met de toename in het aantal transporttaken: een verdubbeling van het aantal transporttaken zorgt voor een grote toename maar geeft geen aanleiding tot een verdubbeling van het aantal ingezette voertuigen of de totale afgelegde afstand. Dit kan verklaard worden doordat het toevoegen van meer klanten ook aanleiding geeft tot meer combinaties.

Verder zorgt een groter gebied waarover de transporttaken dienen uitgevoerd te worden voor ongeveer een derde meer voertuigen. De afgelegde afstand neemt sterk toe: indien de oppervlakte waarin klanten zich bevinden verviervoudigt (de totale oppervlakte neemt toe van 625 tot 2500 vierkante kilometer) verdubbelt de gemiddelde totale afgelegde afstand. Dat de toename in het aantal ingezette voertuigen kleiner is dan de toename in de afgelegde afstand kan te wijten zijn aan de doelfunctie die eerst het aantal ingezette voertuigen minimaliseert. Toch is dit niet het geval voor factoren één en drie.

Over de verschillende oplossingsmethodes, is het effect van een wijziging in de factorinstellingen gelijkaardig. Deze eenduidige resultaten wijzen in de richting van de aanwezigheid van een hoofdeffect voor elk van de factoren. De aanwezigheid van een hoofdeffect is voor de meeste van deze factoren niet vreemd en bevestigt de werking van het algoritme: zo is een daling van het aantal vrachtwagens bij een versoepeling van de aanwezige tijdsintervallen te verwachten. Een eventuele stijging bij één van de oplossingsmethoden zou in dat geval erop kunnen duiden dat het algoritme niet naar

behoren werkt. Opmerkelijk is wel dat de toe- en afnames voor de verschillende oplossingsmethodes gelijk verdeeld zijn indien een directe wissel al dan niet toegelaten wordt. Zo is voor alle factoren de afname, indien een sequentiële oplossingsmethode wordt gebruikt met directe wissel (zonder directe wissel), ongeveer gelijk aan het gebruiken van een geïntegreerde oplossingsmethode met directe wissel (zonder directe wissel).

Op basis van de bevindingen van dit experiment kunnen enkele aanbevelingen geformuleerd worden: initiatieven zoals voorgesteld door Boile et al. (2008) en Jula et al. (2006) (paragraaf 2.1.2) waardoor het aantal containerdepots in het hinterland verhoogt, zorgen voor een gemiddelde daling van 9,38 procent in het aantal ingezette voertuigen. De totale afgelegde afstand daalt sterker en daalt gemiddeld 25,64 procent. Hierdoor kan besloten worden dat investeren in het aanleggen van binnenlandse containerdepots tot betere resultaten leidt. Tot deze conclusie kwamen ook Boile et al. (2008) en Jula et al. (2006). Verder kan besloten worden dat transportbedrijven minder vrachtwagens zullen moeten inzetten en kortere afstanden zullen moeten afleggen naarmate de breedte van het tijdvenster toeneemt, het aantal transporttaken afneemt en de grootte van het gebied waarin deze klanten verspreid liggen, afneemt. Zoals hierboven reeds uitgelegd, is dit resultaat te verwachten aangezien een groot tijdsinterval voor laden en lossen, een klein netwerk en weinig transporttaken de beste omstandigheden zijn om de afstand, afgelegd door vrachtwagens en het aantal ingezette vrachtwagens, te minimaliseren. Deze factoren zijn – zeker op korte termijn – voor veel transportbedrijven oncontroleerbaar. Toch tonen bovenstaande resultaten aan dat initiatieven waarmee een gunstige instelling van deze factoren zou kunnen worden bekomen, de moeite lonen. Dit kunnen onderhandelingen met klanten zijn over een versoepeling van de laad- en losuren of een verdeling van de taken tussen twee of meer transportbedrijven waardoor het aantal transporttaken en het te bedienen gebied beter verdeeld zou worden.

4.2.2.5 Kwaliteit van de oplossingen

Het rittenplanningsmodel en het integratiemodel geformuleerd door Braekers et al. (2012) worden door middel van een metaheuristiek opgelost. Om een idee te krijgen van de kwaliteit van de resultaten weergegeven in bijlage 1, wordt voor alle instanties de ondergrens (OG) of 'lower bound' voor zowel het aantal gebruikte voertuigen als de totale afgelegde afstand berekend. Er worden aparte ondergrenzen berekend voor de verschillende oplossingsmethoden en de mogelijkheid tot directe wissel (d.i. de sequentiële oplossingsmethode met directe wissel (S – DW), de sequentiële oplossingsmethode zonder directe wissel (S – GDW), de integratiemethode met directe wissel (I – DW) en de integratiemethode zonder directe wissel (I – GDW)).

De ondergrens is gelijk aan de oplossing van het lineair programmeringsprobleem zoals geformuleerd in paragrafen 3.4.2 en 3.4.4 maar waarbij beperkingen (5), (6), (7) en (8) gerelaxeerd en vervangen worden door de volgende beperking (Wang en Regan, 2002):

$$x_{ij}(a_i + s_i + t_{ij} - b_j) \leq 0$$

Voor meer informatie over de berekening van deze ondergrenzen, wordt de lezer verwezen naar Wang en Regan (2002). Deze ondergrens geeft een goede indicatie van respectievelijk het minimum aantal in te zetten vrachtwagens en de minimaal af te leggen afstand. Dit kan het best geïllustreerd worden aan de hand van een voorbeeld: in tabel 10 worden de berekende ondergrenzen voor probleeminstanties 1.1, 1.2 en 1.3 weergegeven indien deze instanties opgelost worden met een sequentiële oplossingsmethode en een directe wissel wordt toegelaten (S – DW). De ondergrens voor het aantal in te zetten voertuigen (OG – v) bedraagt zes. Dit wil zeggen dat voor probleeminstantie 1.1 altijd minstens zes voertuigen dienen ingezet te worden. Bij het oplossen van het algoritme bedraagt – over de vijf uitgevoerde iteraties – het gemiddeld aantal ingezette voertuigen, zes. Voor de totale afgelegde afstand wordt de ondergrens berekend op basis van het aantal gebruikte vrachtwagens. Concreet houdt dit in dat de ondergrens voor de totale afgelegde afstand (OG – a) berekend wordt voor de laagste voertuigengrens (OGafst1), de laagste voertuigengrens plus één (OGafst2), plus twee, ... Aangezien het gemiddeld aantal ingezette vrachtwagens in dit voorbeeld gelijk is aan de ondergrens, vergelijken we de gemiddelde afgelegde afstand met de ondergrens die berekend werd voor zes voertuigen (OGafst1). Indien het gemiddeld aantal ingezette voertuigen gelijk zou zijn aan zeven, vergelijken we de gemiddelde afgelegde afstand met de ondergrens berekend voor zeven (ondergrens + 1) voertuigen (d.i. OGafst2).

Tabel 10: Fragmentweergave van de berekende ondergrenzen

Instantie	OG		S – DW		
	OG – v	OG – a		Gem. oplossing	
		OGafst1	OGafst2	v	a
1.1	6,00	1041,11	1022,10	6,00	1088,19
1.2	6,00	989,75	959,12	6,00	1013,81
1.3	6,00	954,61	927,60	6,00	984,52

Voor alle probleeminstanties wordt vervolgens het verschil (of de 'gap') tussen de gevonden oplossing en de ondergrens berekend. Dit verschil duidt aan hoeveel de optimale oplossing maximaal verwijderd kan zijn van de gevonden oplossing. Voor probleeminstantie 1.1 is het verschil tussen de gevonden oplossing en de ondergrens voor het aantal voertuigen, gelijk aan nul (6 – 6). Het absolute verschil tussen de gevonden oplossing en de ondergrens voor

de afgelegde afstand bedraagt voor probleeminstantie 1.1 47,08 (1088,19 – 1041,11) voertuigen. Het relatieve verschil 4,52 procent $((1088,19 - 1041,11)/1041,11)$.

Uit deze resultaten kan afgeleid worden dat het optimaal aantal vrachtwagens voor probleeminstantie 1.1 – indien de probleeminstantie opgelost wordt met behulp van een sequentiële oplossingsaanpak met directe wissel – gelijk is aan zes. De optimale afgelegde afstand ligt – onder dezelfde voorwaarden – tussen 1088,19 en 1041,11 kilometer. Dit wil zeggen dat de gevonden oplossing voor probleeminstantie 1.1 maximaal 4,52 procent boven de optimale oplossing kan liggen.

In tabel 11 worden deze gemiddelde verschillen over alle probleeminstanties voor vrachtwagens en de totale afgelegde afstand weergegeven.

Tabel 11: Gemiddeld verschil tussen de gevonden oplossing en de ondergrens

	S		I	
	DW	GDW	DW	GDW
Gem. verschil in # gebruikte vrachtwagens	0,58	0,37	0,74	0,38
Gem. verschil in # gebruikte vrachtwagens (%)	5,97	3,51	7,99	3,58
Gem. verschil in afgelegde afstand (%)	3,73	2,96	5,33	2,99

Uit deze tabel kan afgeleid worden dat de gemiddelde oplossingen niet ver boven de gemiddelde ondergrenzen liggen. De oplossingen verkregen door de geïntegreerde oplossingsaanpak met directe wissel vormen de grootste uitschieter. Deze liggen voor het aantal gebruikte vrachtwagens gemiddeld 0,74 vrachtwagens of 7,99 procent hoger dan de berekende ondergrens. Dit wil zeggen dat de gevonden oplossingen gemiddeld maximaal 7,99 procent of 0,74 ingezette vrachtwagens boven de optimale oplossingen liggen. Hieruit kan besloten worden dat de gebruikte metaheuristiek gemiddeld goede resultaten oplevert.

4.2.3 Hypothesetest

Uit paragraaf 4.2.2.2, tabel 6 kan opgemaakt worden dat het gebruiken van een integratiemodel – wanneer alle resultaten in beschouwing worden genomen – tot een overwegend beter resultaat leidt dan de sequentiële oplossingsaanpak. Toch is er ruimte voor discussie wanneer de efficiëntie van beide methodes per deelaspect wordt geanalyseerd. Zo kan getwijfeld worden of 14,58 procent van de probleeminstanties (cfr. kolom 1, tabel 6) voldoende is om te besluiten dat de integratiemethode met een directe wissel tot een beter resultaat leidt dan de sequentiële methode met directe wissel. Bovendien leidt de integratiemethode onder die omstandigheden in 2,08 procent van de

probleeminstaties tot slechtere resultaten. Bijgevolg dienen, om na te gaan of de integratiemethode tot significant betere resultaten leidt dan de sequentiële methode, volgende hypothesen getest te worden:

- Hypothese 1 (H1): als de sequentiële methode met directe wissel gebruikt wordt, worden meer vrachtwagens ingezet als wanneer de integratiemethode met directe wissel gebruikt zou worden.
- Hypothese 2 (H2): als de sequentiële methode zonder directe wissel gebruikt wordt, worden meer vrachtwagens ingezet als wanneer de integratiemethode zonder directe wissel gebruikt zou worden.
- Hypothese 3 (H3): als de sequentiële methode met directe wissel gebruikt wordt, wordt een grotere afstand afgelegd als wanneer de integratiemethode met directe wissel gebruikt zou worden.
- Hypothese 4 (H4): als de sequentiële methode zonder directe wissel gebruikt wordt, wordt een grotere afstand afgelegd als wanneer de integratiemethode zonder directe wissel gebruikt zou worden.

Concreet houdt dit in dat respectievelijk het aantal ingezette vrachtwagens en de afgelegde afstand bij de sequentiële oplossingsmethode vergeleken dient te worden met de integratiemethode. Dit wanneer een directe wissel respectievelijk toegelaten en verboden is. Een globaal overzicht van deze gepaarde waarnemingen wordt hieronder, in volgorde van de hypothese waarop ze betrekking hebben, weergegeven.

$$D_{V-DW} = V_{S-DW} - V_{I-DW} \text{ (H1)}$$

$$D_{V-GDW} = V_{S-GDW} - V_{I-GDW} \text{ (H2)}$$

$$D_{A-DW} = A_{S-DW} - A_{I-DW} \text{ (H3)}$$

$$D_{A-GDW} = A_{S-GDW} - A_{I-GDW} \text{ (H4)}$$

D , V en A zijn stochastische populatievariabelen en stellen respectievelijk het verschil, het aantal ingezette voertuigen en de afgelegde afstand voor (Janssens et al., 2008). De subscriptie van de variabelen geeft de experimentele conditie (sequentiële methode met directe wissel (S – DW), sequentiële methode zonder directe wissel (S – GDW), integratiemethode met directe wissel (I – DW) en integratiemethode zonder directe wissel (I – GDW)) weer. Zo is de populatievariabele V_{S-DW} gelijk aan het aantal voertuigen indien de sequentiële oplossingsaanpak met directe wissel gebruikt wordt. Het populatieverschil D_{V-DW}

is dan gelijk aan het verschil op het vlak van voertuigen tussen de sequentiële en de integratiemethode indien een directe wissel toegelaten is.

Wanneer beide methodes tot dezelfde resultaten zouden leiden, bedraagt het gemiddelde verschil of de mediaan (d.i. afhankelijk van de gebruikte test) van de verschillen D , nul. Indien deze verschillen normaal verdeeld zouden zijn, kunnen bovenstaande hypothesen getoetst worden met behulp van een t-test voor twee afhankelijke steekproeven. De experimentele resultaten kunnen beschouwd worden als vier verschillende steekproeven waardoor de steekproefresultaten worden samengevat in bijlage 1. Elke steekproef bestaat bijgevolg uit 48 probleeminstaties. Aangezien er onzekerheid heerst over de normaliteit van de verschillen, kan beter de Wilcoxon rangtekentoets voor gepaarde waarnemingen gebruikt worden. Dit is een niet-parametrische of verdelingsvrije toets gebaseerd op minder strenge assumpties dan de t-test. (Sheskin, 2007)

De Wilcoxon rangtekentoets voor gepaarde waarnemingen gaat na of de mediaan van de populatieverschillen D gelijk of groter is dan nul (Sheskin, 2007). Om hypothesen H1 tot en met H4 te testen, worden bijgevolg volgende toetsingsproblemen geformuleerd:

$$\begin{aligned} H1_0: \theta_{D_{V-DW}} = 0 & \text{ versus } H1_1: \theta_{D_{V-DW}} > 0 \\ H2_0: \theta_{D_{V-GDW}} = 0 & \text{ versus } H2_1: \theta_{D_{V-GDW}} > 0 \\ H3_0: \theta_{D_{A-DW}} = 0 & \text{ versus } H3_1: \theta_{D_{A-DW}} > 0 \\ H4_0: \theta_{D_{A-GDW}} = 0 & \text{ versus } H4_1: \theta_{D_{A-GDW}} > 0 \end{aligned}$$

Per hypothesetest, wordt in bijlage 2, 3, 4 en 5 een gedetailleerd overzicht gegeven van de steekproef-/experimentele resultaten en berekeningen nodig om de Wilcoxon rangtekentoets voor respectievelijk hypothese één, twee, drie en vier uit te voeren.

In de eerste stap van de Wilcoxon rangtekentoets voor gepaarde waarnemingen wordt het steekproefverschil d voor elke probleeminstantie berekend (Sheskin, 2007). Voor hypothese één is dit verschil gelijk aan het aantal voertuigen dat ingezet wordt wanneer de sequentiële methode met directe wissel gebruikt wordt min het aantal ingezette voertuigen wanneer de integratiemethode met directe wissel gebruikt wordt (d.i. $d_{V-DW} = v_{S-DW} - v_{I-DW}$). Voor hypothese twee dient het verschil tussen het aantal ingezette voertuigen bij de sequentiële methode zonder directe wissel en het aantal ingezette voertuigen bij de integratiemethode zonder directe wissel, berekend te worden (d.i. $d_{V-GDW} = v_{S-GDW} - v_{I-GDW}$). Voor hypothese drie is dit verschil gelijk aan de afgelegde afstand wanneer de sequentiële methode met directe wissel wordt gebruikt min de afgelegde afstand wanneer de integratiemethode met directe wissel wordt gebruikt (d.i. $d_{a-DW} = a_{S-DW} - a_{I-DW}$). Voor hypothese vier is dit verschil gelijk aan

de afgelegde afstand wanneer de sequentiële methode zonder directe wissel wordt gebruikt min de afgelegde afstand wanneer de integratiemethode zonder directe wissel wordt gebruikt (d.i. $d_{a-GDW} = a_{S-GDW} - a_{I-GDW}$).

Vervolgens worden de absolute waarden van deze verschillen gerangschikt. In het geval van gelijke absolute waarden, wordt de gemiddelde rang geretourneerd. Verschillen die gelijk zijn aan nul worden niet in rekening gebracht. Daarna wordt elke rang het teken van de verschilwaarde d gegeven. Tot slot worden de rangen met een positief teken opgeteld (d.i. ΣR^+) en wordt de som genomen van de rangen met een negatief teken (d.i. ΣR^-) (Sheskin, 2007). In tabel 12 worden in kolom 1 en 2 respectievelijk ΣR_k^+ en ΣR_k^- weergegeven voor de verschillende hypothesetesten met k gelijk aan (hypothese) één, twee, drie en vier.

Tabel 12: Overzicht van de resultaten van de Wilcoxon rangtekenprocedure

	ΣR^+	ΣR^-	$\Sigma R^+ + \Sigma R^-$	$(n*(n+1))/2$	n	Wilcoxon T	$T_{0,05}$
H1	32,50	3,50	36,00	36,00	8	3,50	5
H2	17,50	10,50	28,00	28,00	7	10,50	3
H3	1161,00	15,00	1176,00	1176,00	48	15,00	426
H4	1106,00	70,00	1176,00	1176,00	48	70,00	426

Sheskin (2007) geeft aan dat, indien volgende vergelijking opgaat, geen fouten werden gemaakt in de berekening van ΣR_k^+ en ΣR_k^- . Hierbij is n gelijk aan het aantal rangen met een plus- of minteken:

$$\Sigma R_k^+ + \Sigma R_k^- = \frac{n*(n+1)}{2}$$

Uit tabel 12, kolom 3 en 4 blijkt dat ΣR_k^+ en ΣR_k^- voor alle hypothesetoetsen juist berekend worden. Omdat bovenstaande nulhypothese verworpen worden en de alternatieve hypothesen aanvaard, dient in eerste instantie voor elke hypothese de som van de rangen met een positief teken (d.i. ΣR_k^+) groter te zijn dan de som van de rangen met een negatief teken (d.i. ΣR_k^-) (Sheskin, 2007). Uit tabel 12 (kolom 1 en 2) kan afgelezen worden dat voor alle hypothesen, ΣR_k^+ groter is dan ΣR_k^- . Dit versterkt bovendien het vermoeden dat de sequentiële methode met of zonder directe wissel tot hogere en bijgevolg slechtere resultaten leidt dan de integratiemethode. Om na te gaan of de integratiemethode tot significant betere resultaten leidt dan de sequentiële methode, wordt de Wilcoxon T -teststatistiek gebruikt. De Wilcoxon T -teststatistiek kiest per hypothese de kleinste waarde uit ΣR_k^+ en ΣR_k^- (Sheskin, 2007). Deze Wilcoxon T -teststatistiek wordt voor elke hypothese in tabel 12, kolom 6 weergegeven. Indien deze teststatistiek kleiner dan of gelijk is aan de

kritieke T -waarde voor een bepaald significantieniveau, kan de nulhypothese verworpen worden (Sheskin, 2007). Alle hypothesen worden getoetst op het vijf procent significantieniveau. De Wilcoxon kritieke T -statistiek op het vijf procent significantieniveau $T_{k;0,05}$ wordt voor de verschillende hypothesen weergegeven in tabel 12, kolom 7. Deze kritieke T -statistiek wordt naast het significantieniveau en het feit dat het om een eenzijdige toets gaat, bepaald door het aantal gerangschikte waarden (Sheskin, 2007). De volledige tabel met kritieke T -waarden voor de Wilcoxon rangtekentoets kan teruggevonden worden in het handboek geschreven door Sheskin (2007).

Daar de Wilcoxon T_k -teststatistiek voor k gelijk aan één, drie en vier kleiner is dan respectievelijk $T_{1;0,05}$, $T_{3;0,05}$ en $T_{4;0,05}$ worden nulhypotheseën één, drie en vier verworpen op het vijf procent significantieniveau. Concreet wil dit zeggen dat, indien een directe wissel toegelaten is, de integratiemethode zowel op het vlak van het aantal ingezette voertuigen als op het vlak van de afgelegde afstand tot significant betere resultaten leidt. Wanneer een directe wissel tussen import- en exportklant niet mogelijk is, doet de integratiemethode het enkel op het vlak van afgelegde afstand significant beter.

4.2.4 Conclusie

Het experiment zoals uiteengezet in paragraaf 4.2.1 houdt naast de breedte van de tijdvensters en de geografische spreiding van het netwerk ook rekening met het takenpakket dat kan verschillen. Elke klasse wordt vervolgens uitgevoerd met drie verschillende takenpakketten. Dit levert een totaal op van 48 probleeminstanties. Dit experiment toont aan dat, wanneer een directe wissel toegelaten is, de geïntegreerde oplossingsaanpak tot significant betere (d.i. lagere) resultaten leidt dan de sequentiële oplossingsmethode. Dit zowel op het vlak van afgelegde afstand als op het vlak van het aantal ingezette voertuigen. Indien een directe wissel niet toegelaten is, neemt de efficiëntie van de geïntegreerde oplossingsaanpak af: de integratiemethode doet het in dat geval enkel op het vlak van afgelegde afstand significant beter. Dit omdat het aantal transportmogelijkheden afneemt waardoor niet altijd de efficiëntste routes beschikbaar zijn. Bijgevolg is de gevonden oplossing vaak niet het globale optimum maar een suboptimale oplossing.

Door de vergelijking tussen beide oplossingsmethodes niet alleen te baseren op verschillende transporttaken maar ook op een verschillend fysiek netwerk en de aanwezigheid van verschillende tijdvensters, wordt de robuustheid van de integratiemethode getest. In dit experiment wordt over het algemeen bevestigd dat de resultaten van het integratiemodel lager liggen dan die van de sequentiële methode. Hierdoor mag verondersteld worden dat de integratieaanpak ook onder wijzigende omstandigheden vaak tot betere resultaten dan de sequentiële aanpak leidt.

Verder toont bovenstaand experiment aan dat het toelaten van een directe wissel, het aantal gebruikte vrachtwagens en de totale afgelegde afstand voor alle probleeminstanties doet dalen. Hoewel dit deel van het experiment een idee geeft van de te behalen voordelen van een directe wissel, wordt niet ingegaan op de moeilijkheden die geassocieerd zijn bij de uitvoering ervan. Een overzicht van deze moeilijkheden werd aangehaald in paragraaf 2.1.3. Door deze moeilijkheden niet in rekening te brengen zou het kunnen dat de voordelen van een directe wissel in bovenstaand experiment overschat worden. Hoe deze moeilijkheden kunnen worden ingecalculleerd, wordt behandeld in de volgende paragraaf.

4.3 Praktische implementatie van een directe wissel

4.3.1 Opzet van het experiment

Uit de resultaten van het experiment, zoals beschreven in paragraaf 4.2, blijkt dat het toelaten van een directe wissel voor alle 48 probleeminstanties een beter resultaat geeft dan wanneer een directe wissel tussen import- en exportklant niet mogelijk is. Toch wordt een directe wissel in de praktijk vaak bekritiseerd omdat de uitvoering ervan heel wat moeilijkheden en dus extra werk met zich zou meebrengen (cfr. paragraaf 2.1.3). Zo dient een lege container, nadat deze uitgeladen werd bij een importklant, in de meeste gevallen (afhankelijk van de vervoerde en te vervoeren goederen) eerst schoongemaakt te worden vooraleer deze container door de exportklant weer gebruikt kan/mag worden. Verder dienen bij het ophalen van de lege container ook afspraken gemaakt te worden in verband met verzekering en aansprakelijkheid bij eventuele schade (Boile et al., 2008; Jula et al., 2006). Deze afspraken kunnen bijvoorbeeld vastgelegd worden in de vorm van standaardcontracten die geverifieerd en afgetekend kunnen worden bij het ophalen van een lege container.

Om het effect van een directe wissel na te gaan, indien rekening gehouden wordt met de moeilijkheden gerelateerd aan een directe wissel, wordt hieronder de opzet van het experiment uit sectie 4.2 herhaald. Bijgevolg wordt ook hier het containerallocatie-, rittenplannings- en integratiemodel, ontwikkeld door Braekers et al. (2012), gebruikt. Het enige verschil tussen dit experiment en het experiment uit sectie 4.2 is dat bij het toelaten van een directe wissel vijftien minuten extra zullen worden geteld. Vijftien minuten extra geeft in de meeste gevallen genoeg tijd om het extra werk gerelateerd aan een directe wissel uit te voeren. Door het toevoegen hiervan kan een beter beeld geschetst worden van de efficiëntie van deze directe wissels in de praktijk.

Een kwartier extra tijd geven voor de uitvoering van een directe wissel kan door – voor zowel het sequentiële model als het integratiemodel – de laad- en lostijd bij een directe wissel te verhogen met vijftien minuten. Voor het sequentiële model houdt dit in dat in het

geval van een directe wissel in het rittenplanningsmodel uit paragraaf 3.4.2, parameter s_i vervangen zal worden door s_i plus vijftien minuten.

$$s_i' = s_i + 15$$

De parameter s_i' is dan gelijk aan de som van de tijd om de lege container schoon te maken en de benodigde documenten te regelen, de tijd nodig om een lege container bij de importklant op de vrachtwagen te laden, de tijd nodig om van een import- naar een exportklant te rijden en de tijd om de lege container weer af te zetten bij de exportklant. Dit proces kan starten wanneer een lege container bij de importklant beschikbaar is (d.i. nadat een volle container bij de importklant afgeleverd en vervolgens uitgeladen werd).

In het integratiemodel wordt in het geval van een directe wissel ($i \in N_S$ en $j \in N_D$) de parameter \hat{t}_{ij} vervangen door \hat{t}_{ij} plus vijftien minuten.

$$\hat{t}_{ij}' = \hat{t}_{ij} + 15$$

Doordat het uitvoeren van een directe wissel in veel gevallen voordeliger is, worden heel wat directe wissels uitgevoerd. Het geven van extra laad- en lostijd heeft hierdoor een rechtstreekse invloed op het aantal in te zetten vrachtwagens: een vrachtwagen staat immers telkens vijftien minuten langer stil waardoor minder transporttaken in dezelfde tijdspanne uitgevoerd kunnen worden. Bijgevolg dienen meer vrachtwagens ingezet te worden dan wanneer geen rekening wordt gehouden met de praktische problemen gerelateerd aan de uitvoering van een directe wissel. Het inzetten van meer vrachtwagens heeft dan weer een invloed op de afgelegde afstand. Dit omdat deze vrachtwagens opnieuw dienen te vertrekken vanuit het vrachtwagendepot waardoor extra kilometers worden afgelegd. Er wordt echter verwacht dat deze parameterwijziging een groter effect zal hebben op het aantal ingezette vrachtwagens.

Dit experiment gaat na in welke mate het aantal ingezette vrachtwagens zal stijgen en of het uitvoeren van een directe wissel ten opzichte van het verbieden ervan, nog steeds betere resultaten oplevert. Een gedetailleerd overzicht van de gemiddelde resultaten over vijf iteraties kan teruggevonden worden in bijlage 6. Hierbij dient opgemerkt te worden dat – gezien de opzet zoals uitgelegd in de vorige paragraaf – enkel de resultaten voor de probleeminstanties waarbij een directe wissel wordt toegelaten, worden aangepast. De resultaten waarbij geen directe wissel is toegelaten zijn dezelfde als in bijlage 1.

4.3.2 Experimentele resultaten

Het gemiddeld aantal gebruikte vrachtwagens, de gemiddelde totale afgelegde afstand en de gemiddelde rekestijd kunnen voor elk van de modelspecificaties teruggevonden worden in tabel 13.

Tabel 13: Vergelijking van de gemiddelde resultaten

	S			I		
	DW	DW ₁₅	GDW	DW	DW ₁₅	GDW
Gem. aantal vrachtwagens	10,03	11,12	11,95	9,99	10,94	11,94
Gem. afgelegde afstand (km)	1836,94	1874,85	2338,78	1815,23	1858,56	2327,26
Gem. rekestijd (s)	8,05	6,40	11,95	6,59	12,88	15,45

Het gemiddelde verschil tussen het toevoegen van een directe wissel en het weglaten hiervan, is ten opzichte van de vorige situatie afgenomen maar nog steeds aanzienlijk: het verschil, voor zowel de sequentiële als de geïntegreerde oplossingsaanpak, bedroeg – indien niet gecorrigeerd werd voor het extra werk gerelateerd aan een directe wissel (DW versus GDW) – gemiddeld ongeveer twee voertuigen. Nu wel rekening gehouden wordt hiermee (DW₁₅ versus GDW), bedraagt het verschil voor de sequentiële aanpak gemiddeld iets minder dan één voertuig. Indien gekozen wordt om een directe wissel toe te laten in de geïntegreerde oplossingsmethode, wordt nu gemiddeld één voertuig minder ingezet. Door het toelaten van een directe wissel tussen import- en exportklanten, neemt bij de sequentiële oplossingsaanpak de gemiddelde afgelegde afstand af met 463,93 kilometer (DW₁₅ versus GDW). Dit is slechts een kleine daling ten opzichte van de situatie waar DW en GDW worden vergeleken en waar de gemiddelde daling door het toelaten van een directe wissel 501,83 kilometer bedraagt. Voor de geïntegreerde aanpak neemt de totale afgelegde afstand nu gemiddeld af met 468,7 kilometer. Ook hier daalt de efficiëntie van een directe wissel op de totale afgelegde afstand lichtjes (in de vorige situatie was sprake van een gemiddelde daling van 512,03 kilometer). Daarnaast kan opgemerkt worden dat het integratiemodel met directe wissel tot de beste gemiddelde resultaten leidt.

Naast de gemiddelde resultaten, dient ook gekeken te worden naar de verbetering/verslechtering per probleeminstantie. In tabel 14 worden de resultaten van de sequentiële oplossingsaanpak (S) met directe wissel, vergeleken met de resultaten van de sequentiële oplossingsaanpak zonder directe wissel. Vervolgens worden de resultaten van de integratiemethode (I) met directe wissel vergeleken met de resultaten van de geïntegreerde oplossingsaanpak zonder directe wissel. Dit respectievelijk in termen van het aantal ingezette voertuigen (v) en de totale afgelegde afstand (a).

Tabel 14: Vergelijking zonder directe wissel en met directe wissel

	S		I	
	v	a	v	a
DW ₁₅ is beter dan GDW	75,00%	100,00%	81,25%	100,00%
DW ₁₅ is gelijk aan GDW	25,00%	0,00%	18,75%	0,00%
DW ₁₅ is slechter dan GDW	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Indien gekeken wordt naar het effect van een directe wissel, zorgt het toelaten van een directe wissel bij de sequentiële oplossingsaanpak in 75 procent van de probleeminstanties voor een lager aantal gebruikte vrachtwagens. Bij de geïntegreerde oplossingsaanpak ligt dit aantal hoger: voor iets meer dan tachtig procent van de probleeminstanties zorgt een directe wissel voor een lager aantal gebruikte vrachtwagens. Door het toevoegen van een directe wissel, daalt de totale afgelegde afstand – zowel bij de sequentiële als bij de geïntegreerde aanpak – voor alle probleeminstanties.

Uit tabellen 13 en 14 kan besloten worden dat de mogelijkheid om een directe wissel tussen import- en exportklant uit te voeren – zelfs indien gecorrigeerd wordt voor het extra werk hieraan gerelateerd – tot overwegend betere resultaten leidt dan wanneer geen directe wissel uitgevoerd mag worden. Bovendien wordt voor geen enkele probleeminstantie door het toelaten van een directe wissel een slechter resultaat genoteerd. Hierdoor kunnen op basis van de Wilcoxon rangtekentoets – zonder de berekeningen te maken – de volgende nulhypotheseën verworpen worden:

$$\begin{array}{llll}
 H5_0: \theta_{D_{V-S}} = 0 & \text{versus} & H5_1: \theta_{D_{V-S}} > 0 & \text{met} & D_{V-S} = V_{S-GDW} - V_{S-DW} \\
 H6_0: \theta_{D_{A-S}} = 0 & \text{versus} & H6_1: \theta_{D_{A-S}} > 0 & \text{met} & D_{A-S} = A_{S-GDW} - A_{S-DW} \\
 H7_0: \theta_{D_{V-I}} = 0 & \text{versus} & H7_1: \theta_{D_{V-I}} > 0 & \text{met} & D_{V-I} = V_{I-GDW} - V_{I-DW} \\
 H8_0: \theta_{D_{A-I}} = 0 & \text{versus} & H8_1: \theta_{D_{A-I}} > 0 & \text{met} & D_{A-I} = A_{I-GDW} - A_{I-DW}
 \end{array}$$

D , V en A zijn opnieuw stochastische populatievariabelen en stellen respectievelijk het verschil, het aantal ingezette voertuigen en de afgelegde afstand voor (Janssens et al., 2008). De subscriptie van de variabelen geeft de experimentele conditie (sequentiële methode met directe wissel (S – DW), sequentiële methode zonder directe wissel (S – GDW), integratiemethode met directe wissel (I – DW) en integratiemethode zonder directe wissel (I – GDW)) weer. Zo is de populatievariabele V_{S-DW} gelijk aan het aantal voertuigen indien de sequentiële oplossingsaanpak met directe wissel gebruikt wordt. Het populatieverschil D_{V-S} is nu gelijk aan het verschil op het vlak van voertuigen tussen het verbieden en het toelaten van een directe wissel, indien de sequentiële oplossingsmethode gebruikt wordt.

Om bovenstaande nulhypothese te verwerpen en de alternatieve hypothesen te aanvaarden, dient in eerste instantie – voor elk van de hypothesen – de som van de rangen met een positief teken (d.i. ΣR^+) groter te zijn dan de som van de rangen met een negatief teken (d.i. ΣR^-) (Sheskin, 2007). Aangezien voor geen enkele probleeminstantie door het toelaten van een directe wissel een slechter resultaat wordt gevonden, is ΣR^- voor elke hypothese gelijk aan nul. Uit tabel 14 kan afgeleid worden dat ΣR^+ telkens groter is dan nul. Dit omdat voor het overgrote deel van de probleeminstanties (in termen van voertuigen) of zelfs voor alle probleeminstanties (in termen van afstand), het verbieden van een directe wissel tot hogere resultaten leidt. De Wilcoxon T -teststatistiek kiest per hypothese de kleinste waarde uit ΣR^+ en ΣR^- (Sheskin, 2007). Hierdoor is deze Wilcoxon T -teststatistiek voor elke hypothese gelijk aan nul. De Wilcoxon kritieke T -statistiek voor een eenzijdige toets op het vijf procent significantieniveau daarentegen, is steeds groter dan nul. Daar de Wilcoxon T -teststatistiek steeds kleiner is dan de kritieke waarde worden nulhypothese vijf, zes, zeven en acht verworpen op het vijf procent significantieniveau. Concreet wil dit zeggen dat de mogelijkheid om een directe wissel tussen import- en exportklant uit te voeren – zelfs indien gecorrigeerd wordt voor het extra werk hieraan gerelateerd – tot significant betere resultaten leidt dan wanneer geen directe wissel uitgevoerd mag worden.

4.3.3 Verdubbeling van de extra tijd

Uit paragraaf 4.3.2 kan besloten worden dat een directe wissel tussen import- en exportklant – zelfs indien de uitvoering ervan meer tijd kost – tot significant betere resultaten leidt dan wanneer geen directe wissel mag uitgevoerd worden. Deze resultaten werden verkregen door voor elke directe wissel vijftien minuten extra tijd te geven. Deze vijftien minuten zijn een schatting van de gemiddelde tijd, nodig om het extra werk gerelateerd aan een directe wissel, uit te voeren. Bijgevolg is het nuttig om na te gaan vanaf hoeveel extra tijd het toelaten van directe wissels inefficiënt is of niet tot betere resultaten leidt. Een vergelijking van de resultaten uit tabel 13 leert dat een directe wissel – voor zowel het sequentiële als het integratiemodel - vermoedelijk niet tot betere gemiddelde resultaten leidt wanneer het extra werk, gerelateerd aan een directe wissel, oploopt tot dertig minuten (d.i. een verdubbeling van vijftien minuten). Voor het sequentiële model kan dit nagegaan worden door in het rittenplanningsmodel parameter s_i te vervangen door s_i plus dertig minuten.

$$s_i'' = s_i + 30$$

In het integratiemodel wordt in het geval van een directe wissel ($i \in N_S$ en $j \in N_D$) de parameter \hat{t}_{ij} nu vervangen door \hat{t}_{ij} plus dertig minuten.

$$\hat{t}_{ij}'' = \hat{t}_{ij} + 30$$

In deze paragraaf wordt nagegaan wat het effect is op het aantal ingezette vrachtwagens en de afgelegde afstand, indien het extra werk – gerelateerd aan een directe wissel – dubbel zo lang als verwacht zou duren. Een gedetailleerd overzicht van de gemiddelde resultaten over vijf iteraties kan teruggevonden worden in bijlage 7.

Het gemiddeld aantal gebruikte vrachtwagens, de gemiddelde totale afgelegde afstand en de gemiddelde rekentijd kunnen voor elk van de modelspecificaties teruggevonden worden in tabel 15.

Tabel 15: Vergelijking van de gemiddelde resultaten

	S			I		
	DW ₁₅	DW ₃₀	GDW	DW ₁₅	DW ₃₀	GDW
Gem. aantal vrachtwagens	11,12	12,35	11,95	10,94	11,70	11,94
Gem. afgelegde afstand (km)	1874,85	1905,19	2338,78	1858,56	1908,42	2327,30
Gem. rekentijd (s)	6,40	7,59	11,95	12,88	11,19	15,45

Deze tabel biedt een overzicht van de efficiëntie van een directe wissel over alle probleeminstanties. In het sequentiële model (S) worden wanneer een directe wissel toegelaten is en het extra werk nu dertig minuten duurt (DW₃₀), gemiddeld over alle probleeminstanties 12,35 voertuigen ingezet. Indien een directe wissel niet toegelaten zou zijn (GDW), gemiddeld 11,95 voertuigen. Het toelaten van een directe wissel in het integratiemodel (I) leidt, zelfs wanneer het extra werk dubbel zo lang zou duren, gemiddeld tot minder vrachtwagens. De gemiddelde afgelegde afstand wanneer een directe wissel is toegelaten, is voor beide oplossingsmethodes nog steeds aanzienlijk lager. Daarnaast kan opgemerkt worden dat het integratiemodel met directe wissel, zelfs wanneer het extra werk dertig minuten in beslag neemt, gemiddeld over alle probleeminstanties tot de beste resultaten leidt.

In tabel 16 wordt per probleeminstantie nagegaan of het toelaten van een directe wissel respectievelijk tot lagere, dezelfde of hogere resultaten leidt, dan wanneer geen directe wissel toegelaten zou zijn. Dit voor de verschillende oplossingsmethodes en respectievelijk in termen van het aantal ingezette voertuigen (v) en de totale afgelegde afstand (a).

Tabel 16: Vergelijking zonder directe wissel en met directe wissel

	S		I	
	v	a	v	a
DW ₃₀ is beter dan GDW	6,25%	100,00%	29,17%	100,00%
DW ₃₀ is gelijk aan GDW	43,75%	0,00%	66,67%	0,00%
DW ₃₀ is slechter dan GDW	50,00%	0,00%	4,17%	0,00%

Uit tabel 16 kan afgeleid worden dat de efficiëntie van een directe wissel op het vlak van het aantal in te zetten voertuigen sterk afneemt. In de sequentiële oplossingsaanpak worden voor vijftig procent van de probleeminstanties nu meer vrachtwagens ingezet dan wanneer een directe wissel niet mogelijk zou zijn. In het integratiemodel ligt dit aantal heel wat lager. In termen van de afgelegde afstand, zorgt het toelaten van een directe wissel nog steeds dat de totale afgelegde afstand voor alle probleeminstanties daalt. Dit voor zowel de sequentiële als de geïntegreerde oplossingsaanpak.

4.3.4 Conclusie

Om een realistisch beeld te schetsen van de efficiëntie van een directe wissel, worden in dit deel van de praktijkstudie de moeilijkheden, geassocieerd aan de uitvoering van een directe wissel, in rekening gebracht. Dit kan door voor elke directe wissel vijftien minuten extra tijd te geven. Vijftien minuten extra is in de meeste gevallen genoeg tijd om het extra werk, gerelateerd aan een directe wissel, uit te voeren. Resultaten tonen aan dat een directe wissel tussen import- en exportklant – zelfs indien rekening gehouden wordt met het extra werk – tot significant betere resultaten leidt dan wanneer geen directe wissel mag uitgevoerd worden. Dit voordeel van een directe wissel ten opzichte van geen directe wissel neemt sterk af wanneer de tijd, nodig om het extra werk uit te voeren, zou oplopen tot dertig minuten. Verwacht wordt echter dat de benodigde tijd onder normale omstandigheden ruim onder dertig minuten zal blijven. Daarnaast kan opgemerkt worden dat het integratiemodel met directe wissel, zelfs wanneer extra werk dertig minuten in beslag neemt, steeds tot de beste gemiddelde resultaten leidt.

Hoofdstuk 5: Algemene conclusies en verder onderzoek

In deze masterproef wordt nagegaan welke modellen gebruikt kunnen worden om de dagelijkse herpositionering van lege containers in het hinterland te plannen. Lege containertransporten in het hinterland zijn tot op een zeker punt noodzakelijk maar worden op dit ogenblik vaak niet op de meest efficiënte wijze georganiseerd.

In deze masterproef wordt door middel van de Wilcoxon rangtekentoets voor gepaarde waarnemingen aangetoond dat integratiemodellen overwegend tot significant betere resultaten leiden dan sequentiële modellen. Hieruit volgt dat een meer efficiënte dagelijkse planning voor (lege) containertransporten opgesteld wordt door middel van een integratiemodel. Hierbij kan de dagelijkse planning geformuleerd worden als een rittenplanningsmodel. Dit in tegenstelling tot de eerder gehanteerde sequentiële modellen.

Daarnaast kan besloten worden dat het toelaten van een directe wissel in tegenstelling tot het verbieden ervan, tot significant betere resultaten leidt. Dit voor zowel sequentiële als integratiemodellen. Hieruit volgt dat een meer efficiënte dagelijkse planning opgesteld wordt wanneer de mogelijkheid om een directe wissel uit te voeren, toegelaten is.

Tot slot kan uit de resultaten van het praktijkonderzoek opgemerkt worden dat de efficiëntste dagelijkse planning voor (lege) containertransporten opgesteld wordt met behulp van een integratiemodel waarbij de mogelijkheid om een directe wissel uit te voeren, toegelaten is. Dit model leidt in het praktijkonderzoek gemiddeld tot betere resultaten dan modellen waarbij geen directe wissel toegelaten is of de sequentiële oplossingsmethode gehanteerd wordt. Dit zowel op het vlak van het aantal ingezette voertuigen als op het vlak van de totale afgelegde afstand.

Verder onderzoek kan uitwijzen of naast een directe wissel ook andere toevoegingen leiden tot betere resultaten. Zo is de laatste jaren steeds meer sprake van het gebruik van 'supertrucks' of ecocombi's op Vlaamse wegen. Deze 'supertrucks' zijn op dit moment in België nog niet toegelaten, maar laten toe om drie kleine containers of één grote en één kleine container tegelijkertijd te vervoeren. Het verhogen van de capaciteit van vrachtwagens zou volgens voorstanders het aantal containertransporten aanzienlijk kunnen reduceren. (Ooms, 2009)

Daarnaast komt uit de analyse van de hoofdeffecten (cfr. paragraaf 4.2.2.4) naar voren dat transportbedrijven minder vrachtwagens zullen moeten inzetten en kortere afstanden zullen moeten afleggen naarmate onder meer het aantal transporttaken afneemt en de grootte van

het gebied waarin de klanten verspreid liggen, afneemt. Deze resultaten geven aan dat een verdeling van de taken tussen twee of meer transportbedrijven waardoor het aantal transporttaken en het te bedienen gebied beter verdeeld zou worden, misschien wel de moeite lonen. Ook naar dergelijke samenwerkingsinitiatieven tussen twee of meer transportbedrijven en de impact ervan op de dagelijkse herpositionering van lege containers in het hinterland, kan bijgevolg verder onderzoek gebeuren.

Lijst van geraadpleegde werken

Boile, M., Theofanis, S., Baveja, A., & Mittal, N. (2008). Regional Repositioning of Empty Containers: Case for Inland Depots. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2066, 31-40.

Braekers, K., Caris, A., & Janssens, G.K. (2012). Integrated planning of loaded and empty container movements. Forthcoming in *OR Spectrum*.

Braekers, K., Janssens, G.K., & Caris, A. (2009). Integrating empty container allocation with vehicle routing in intermodal transport. In *Proceedings of the International Workshop on Harbour, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation*, 23-25 september, Puerto de la Cruz, Tenerife, 132-139.

Braekers, K., Janssens, G.K., & Caris, A. (2011). Challenges in managing empty container movements at multiple planning levels. *Transport Reviews*, 31, 681-708.

Boni, S. (2009). *Honderdduizenden lege containers van de weg*. Opgevraagd op 16 november, 2010, via www.vlaamsinstituutmobiliteit.be/102696.fil.

Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005). Vehicle routing problem with time windows, part I: route construction and local search algorithms. *Transportation Science*, 39, 104-118.

Chang, H., Jula, H., Chassiakos, A., & Ioannou, P. (2008). A heuristic solution for the empty container substitution problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44, 203-216.

Coeck, C., Merckx, J., & Verbeke, A. (2006). *Havenconomie en -logistiek*. Antwerpen – Apeldoorn: Garant.

Containertrafiek in Antwerpse haven stijgt met twintig procent. (2010, 15 juli). *De Tijd*. Opgevraagd op 16 november, 2010, via Mediargus database.

Cordeau, J.F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.Y., & Semet, F. (2002). A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 512-522.

Crainic, T.G. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122, 272-288.

Crainic, T.G., Gendreau, M., & Dejax, P. (1993b). Dynamic and stochastic models for the allocation of empty containers. *Operations Research*, 41, 102-126.

Crainic, T.G., & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 97, 409-438.

Deidda, L., Di Francesco, M., Olivo, A., & Zuddas, P. (2008). Implementing the street-turn strategy by an optimization model. *Maritime Policy & Management*, 35, 503-516.

Dueck, G., & Scheuer, T. (1990). Treshold accepting: a general optimization algorithm appearing superior to simulated annealing. *Journal of Computational Physics*, 90, 161-175.

Eurotranscon - Exchange your containers. (z.d.). Opgevraagd op 15 maart, 2012, via <http://www.groupjoosen.be/eurotranscon1.html>.

Eurotranscon - Flanders Smart HUB. (2011). Opgevraagd op 15 maart, 2012, via <http://www.flanderssmarthub.be/uploads/Joosen.pdf>.

Furió, S., Andrés, C., Lozano, S., & Adenso-Díaz, B. (2010). Mathematical model to optimize land empty container movements. In *Proceedings of the ALIO-INFORMS Joint International Meeting*, 6-9 juni, Buenos Aires, Argentinië.

Hillier, F.S., & Lieberman, G.J. (2010). *Introduction to Operations Research*. New York: McGraw-Hill.

Huth, T., & Mattfeld, D.C. (2009). Integration of vehicle routing and resource allocation in a dynamic logistics network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 17, 149-162.

Janssens, P., Litière, S., & Dierckx, G. (2008). Syllabus Beleidsstatistiek. Diepenbeek: Universiteit Hasselt.

Jula, H., Dessouky, M., Ioannou, P., & Chassiakos, A. (2005). Container movement by trucks in metropolitan networks : modeling and optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41, 235-259.

Jula, H., Chassiakos, A., & Ioannou, P. (2006). Port dynamic empty container reuse. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 42, 43-60.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., & Vecchi M.P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, 671-890.

Konings, R. (2005). Foldable containers to reduce the costs of empty transport? A cost-benefit analysis from a chain and multi-actor perspective. *Maritime Economics & Logistics*, 7, 223-249.

Law, A.M., & Kelton, W.D. (2000). *Simulation modelling and analysis*. New York: McGraw-Hill.

Lipsey, R.G., & Chrystal, A. (2007). *Economics*. Oxford: Oxford University Press.

O'Brien, J.A., & Marakas, G.M. (2008). *Management Information Systems*. New York: McGraw-Hill.

Olivo, A., Zuddas, P., Di Francesco, M., & Manca, A. (2005). An operational model for empty container management. *Maritime Economics & Logistics*, 7, 199-222.

Ooms, P. (2009, 9 februari). Samenwerking in containervervoer. *Industrie Technisch & Management*, 12.

Racquet, E. (2010, 15 december). Samen vrachtwagens vullen | Bundeling vrachten verhoogt efficiëntiegraad | Goede score voor de binnenvaart, slechte voor spoor. *De Tijd*. Opgevraagd op 13 maart, 2011, via Mediargus database.

Raedts, M., & Masui, C. (2007). *Van vraag tot tekst*. Leuven: Acco.

Sheskin, D. (2007). *The handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC.

Shintani, K., Konings, R., & Imai, A. (2010). The impact of foldable containers on container fleet management costs in hinterland transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46, 750-763.

Theofanis, S., & Boile, M. (2008). Empty marine container logistics : facts, issues and management strategies. *GeoJournal*, 74, 51-65.

Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: SIAM.

Wang, X., Regan, A.C. (2002). Local truckload pickup and delivery with hard time window constraints. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36, 97-112.

White Paper: European transport policy for 2010: time to decide. (2001). Opgevraagd op 16 april, 2011, via http://europa.eu/documentation/official-docs/white-papers/index_en.htm.

Yun, W.Y., Lee, Y.M., & Choi, Y.S. (2011). Optimal inventory control of empty containers in inland transportation system. *International Journal of Production Economics*, 133, 451-457.

Zhang, R., Yun, W.Y., & Kopfer, H. (2010). Heuristic-based truck scheduling for inland container transportation. *OR Spectrum*, 32, 787-808.

Zhang, R., Yun, W.Y., & Moon, I. (2009). A reactive tabu search algorithm for the multi-depot container truck transportation problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45, 904-914.

Bijlagen

Bijlage 1: Gemiddelde effect van de gebruikte oplossingsmethode en een directe wissel tussen import- en exportklant (gedetailleerde resultaten)

Probleeminstantie	Sequentiële oplossingsaanpak				Geïntegreerde oplossingsaanpak			
	Directe wissel toegelaten		Directe wissel verboden		Directe wissel toegelaten		Directe wissel verboden	
	v	a	v	a	v	a	v	a
1.1	6,00	1083,21	8,00	1339,45	6,00	1065,86	8,00	1336,84
1.2	6,20	1008,55	7,00	1221,26	6,00	993,60	7,00	1211,44
1.3	6,00	987,43	8,00	1261,87	6,00	971,27	7,80	1269,27
2.1	6,00	1012,75	7,00	1231,21	6,00	1002,57	7,00	1229,04
2.2	6,00	987,77	7,00	1287,01	6,00	974,28	7,00	1277,51
2.3	6,00	929,01	7,00	1160,64	6,00	919,49	7,00	1154,90
3.1	6,00	829,13	7,00	905,25	6,00	810,71	7,00	894,69
3.2	6,00	758,18	7,00	885,90	6,00	749,67	7,00	876,99
3.3	6,00	726,74	7,00	850,97	6,00	702,40	7,00	838,18
4.1	6,00	705,34	7,00	854,43	6,00	695,55	7,00	852,22
4.2	6,00	685,43	7,00	834,30	6,00	680,34	7,00	823,25
4.3	6,00	714,84	7,00	850,18	6,00	697,07	7,00	851,24
5.1	12,00	1818,11	14,00	2441,46	12,00	1800,28	14,00	2431,15
5.2	12,00	1832,89	14,00	2457,18	12,00	1822,84	14,00	2446,57
5.3	11,00	1716,53	14,00	2267,85	11,00	1697,34	14,00	2263,18
6.1	11,00	1688,91	14,00	2340,74	11,00	1680,25	14,00	2337,04
6.2	11,00	1693,31	14,00	2305,52	11,00	1670,57	14,00	2303,97
6.3	11,20	1829,92	14,00	2327,68	11,20	1808,88	14,00	2318,54
7.1	11,00	1420,19	13,00	1683,37	11,00	1403,11	13,00	1670,12
7.2	11,00	1309,16	12,40	1639,00	10,80	1298,82	12,60	1606,62
7.3	10,00	1344,67	12,40	1665,26	10,00	1321,66	12,60	1644,92
8.1	11,00	1362,44	13,00	1713,26	11,00	1339,05	13,00	1690,11
8.2	10,60	1341,77	12,20	1626,79	10,40	1324,00	12,00	1612,04

8.3	10,00	1187,80	12,00	1581,17	10,00	1161,51	12,00	1560,16
9.1	9,00	1936,63	10,00	2552,61	9,00	1930,22	10,00	2548,44
9.2	9,00	1992,53	10,00	2606,88	9,00	1959,14	10,00	2608,80
9.3	8,00	1880,41	10,00	2411,07	8,00	1851,18	10,00	2404,32
10.1	8,00	1988,68	10,00	2394,41	8,00	1966,37	10,00	2392,05
10.2	8,00	1924,99	10,00	2451,72	8,00	1891,50	10,00	2451,35
10.3	8,00	1893,68	10,00	2501,32	8,00	1883,34	10,00	2498,53
11.1	8,00	1608,26	9,00	1862,55	8,00	1606,53	9,00	1850,15
11.2	8,00	1677,91	9,00	2015,67	8,00	1668,50	9,00	1993,05
11.3	8,60	1570,58	9,00	1891,10	8,00	1581,79	9,00	1864,40
12.1	7,00	1575,76	9,00	1847,84	7,00	1528,20	9,00	1844,81
12.2	8,00	1560,02	9,00	1800,02	8,00	1556,41	9,00	1789,66
12.3	7,00	1360,58	8,00	1664,46	7,00	1355,45	8,00	1648,56
13.1	16,00	3433,80	19,00	4688,25	15,40	3353,54	19,00	4674,06
13.2	16,80	4088,63	20,00	5158,93	17,00	4044,96	20,00	5127,16
13.3	16,00	3539,87	20,00	4889,78	16,00	3519,09	20,00	4890,70
14.1	15,20	3436,05	19,00	4812,74	15,00	3408,32	19,00	4802,72
14.2	16,00	3642,14	20,00	4770,06	16,00	3622,32	19,40	4801,40
14.3	15,00	3316,18	19,00	4588,19	15,00	3264,66	19,00	4565,69
15.1	15,00	2953,72	17,00	3490,78	15,00	2921,12	17,00	3450,77
15.2	14,00	2854,18	17,00	3569,20	14,00	2823,91	17,00	3533,30
15.3	15,00	2771,36	16,00	3402,44	14,80	2743,75	16,00	3383,36
16.1	14,00	2811,95	16,40	3447,20	14,00	2739,07	16,60	3415,40
16.2	14,00	2671,44	16,20	3412,51	14,00	2643,15	16,00	3386,23
16.3	14,00	2709,95	16,00	3299,90	14,00	2677,56	16,00	3283,82

met v: het gemiddeld aantal voertuigen (over vijf iteraties)
a: de gemiddelde afgelegde afstand (over vijf iteraties)

Bijlage 2: Resultaten van de procedure van de Wilcoxon rangtekentoets voor hypothese één

Instantie	S		I		$d = V_{S-DW} - V_{I-DW}$	Rang d	Rang d met teken
	Directe wissel toegelaten		Directe wissel toegelaten				
	V_{S-DW}	a_{S-DW}	V_{I-DW}	a_{I-DW}			
1.1	6,00	1083,21	6,00	1065,86	0,00	-	-
1.2	6,20	1008,55	6,00	993,60	0,20	3,5	3,5
1.3	6,00	987,43	6,00	971,27	0,00	-	-
2.1	6,00	1012,75	6,00	1002,57	0,00	-	-
2.2	6,00	987,77	6,00	974,28	0,00	-	-
2.3	6,00	929,01	6,00	919,49	0,00	-	-
3.1	6,00	829,13	6,00	810,71	0,00	-	-
3.2	6,00	758,18	6,00	749,67	0,00	-	-
3.3	6,00	726,74	6,00	702,40	0,00	-	-
4.1	6,00	705,34	6,00	695,55	0,00	-	-
4.2	6,00	685,43	6,00	680,34	0,00	-	-
4.3	6,00	714,84	6,00	697,07	0,00	-	-
5.1	12,00	1818,11	12,00	1800,28	0,00	-	-
5.2	12,00	1832,89	12,00	1822,84	0,00	-	-
5.3	11,00	1716,53	11,00	1697,34	0,00	-	-
6.1	11,00	1688,91	11,00	1680,25	0,00	-	-
6.2	11,00	1693,31	11,00	1670,57	0,00	-	-
6.3	11,20	1829,92	11,20	1808,88	0,00	-	-
7.1	11,00	1420,19	11,00	1403,11	0,00	-	-
7.2	11,00	1309,16	10,80	1298,82	0,20	3,5	3,5
7.3	10,00	1344,67	10,00	1321,66	0,00	-	-
8.1	11,00	1362,44	11,00	1339,05	0,00	-	-
8.2	10,60	1341,77	10,40	1324,00	0,20	3,5	3,5
8.3	10,00	1187,80	10,00	1161,51	0,00	-	-
9.1	9,00	1936,63	9,00	1930,22	0,00	-	-
9.2	9,00	1992,53	9,00	1959,14	0,00	-	-
9.3	8,00	1880,41	8,00	1851,18	0,00	-	-
10.1	8,00	1988,68	8,00	1966,37	0,00	-	-
10.2	8,00	1924,99	8,00	1891,50	0,00	-	-
10.3	8,00	1893,68	8,00	1883,34	0,00	-	-
11.1	8,00	1608,26	8,00	1606,53	0,00	-	-
11.2	8,00	1677,91	8,00	1668,50	0,00	-	-
11.3	8,60	1570,58	8,00	1581,79	0,60	7,5	7,5
12.1	7,00	1575,76	7,00	1528,20	0,00	-	-
12.2	8,00	1560,02	8,00	1556,41	0,00	-	-

12.3	7,00	1360,58	7,00	1355,45	0,00	-	-	
13.1	16,00	3433,80	15,40	3353,54	0,60	7,5	7,5	
13.2	16,80	4088,63	17,00	4044,96	-0,20	3,5	-3,5	
13.3	16,00	3539,87	16,00	3519,09	0,00	-	-	
14.1	15,20	3436,05	15,00	3408,32	0,20	3,5	3,5	
14.2	16,00	3642,14	16,00	3622,32	0,00	-	-	
14.3	15,00	3316,18	15,00	3264,66	0,00	-	-	
15.1	15,00	2953,72	15,00	2921,12	0,00	-	-	
15.2	14,00	2854,18	14,00	2823,91	0,00	-	-	
15.3	15,00	2771,36	14,80	2743,75	0,20	3,5	3,5	
16.1	14,00	2811,95	14,00	2739,07	0,00	-	-	
16.2	14,00	2671,44	14,00	2643,15	0,00	-	-	
16.3	14,00	2709,95	14,00	2677,56	0,00	-	-	
							$\Sigma R^+ =$	32,50
							$\Sigma R^- =$	3,50
							Sheskin's test	36,00
								36,00
							Verwachte waarde van de Wilcoxon T-teststatistiek	18,00
							Wilcoxon T-teststatistiek	3,50
							Kritieke Wilcoxon $T_{0,05}$ -waarde voor $n = 8$, eenzijdige toets	5

met S: sequentiële oplossingsmethode
I: integratiemethode
v: het gemiddeld aantal voertuigen (over vijf iteraties)
a: de gemiddelde afgelegde afstand (over vijf iteraties)
DW: directe wissel toegelaten
d: het steekproefverschil per probleeminstantie

Bijlage 3: Resultaten van de procedure van de Wilcoxon rangtekentoets voor hypothese twee

Instantie	S		I		$d = v_{S-GDW} - v_{I-GDW}$	Rang d	Rang d met teken
	Directe wissel verboden		Directe wissel verboden				
	v_s	a_s	v_i	a_i			
1.1	8,00	1339,45	8,00	1336,84	0,00	-	-
1.2	7,00	1221,26	7,00	1211,44	0,00	-	-
1.3	8,00	1261,87	7,80	1269,27	0,20	3,5	3,5
2.1	7,00	1231,21	7,00	1229,04	0,00	-	-
2.2	7,00	1287,01	7,00	1277,51	0,00	-	-
2.3	7,00	1160,64	7,00	1154,90	0,00	-	-
3.1	7,00	905,25	7,00	894,69	0,00	-	-
3.2	7,00	885,90	7,00	876,99	0,00	-	-
3.3	7,00	850,97	7,00	838,18	0,00	-	-
4.1	7,00	854,43	7,00	852,22	0,00	-	-
4.2	7,00	834,30	7,00	823,25	0,00	-	-
4.3	7,00	850,18	7,00	851,24	0,00	-	-
5.1	14,00	2441,46	14,00	2431,15	0,00	-	-
5.2	14,00	2457,18	14,00	2446,57	0,00	-	-
5.3	14,00	2267,85	14,00	2263,18	0,00	-	-
6.1	14,00	2340,74	14,00	2337,04	0,00	-	-
6.2	14,00	2305,52	14,00	2303,97	0,00	-	-
6.3	14,00	2327,68	14,00	2318,54	0,00	-	-
7.1	13,00	1683,37	13,00	1670,12	0,00	-	-
7.2	12,40	1639,00	12,60	1606,62	-0,20	3,5	-3,5
7.3	12,40	1665,26	12,60	1644,92	-0,20	3,5	-3,5
8.1	13,00	1713,26	13,00	1690,11	0,00	-	-
8.2	12,20	1626,79	12,00	1612,04	0,20	3,5	3,5
8.3	12,00	1581,17	12,00	1560,16	0,00	-	-
9.1	10,00	2552,61	10,00	2548,44	0,00	-	-
9.2	10,00	2606,88	10,00	2608,80	0,00	-	-
9.3	10,00	2411,07	10,00	2404,32	0,00	-	-
10.1	10,00	2394,41	10,00	2392,05	0,00	-	-
10.2	10,00	2451,72	10,00	2451,35	0,00	-	-
10.3	10,00	2501,32	10,00	2498,53	0,00	-	-
11.1	9,00	1862,55	9,00	1850,15	0,00	-	-
11.2	9,00	2015,67	9,00	1993,05	0,00	-	-
11.3	9,00	1891,10	9,00	1864,40	0,00	-	-
12.1	9,00	1847,84	9,00	1844,81	0,00	-	-
12.2	9,00	1800,02	9,00	1789,66	0,00	-	-

12.3	8,00	1664,46	8,00	1648,56	0,00	-	-	
13.1	19,00	4688,25	19,00	4674,06	0,00	-	-	
13.2	20,00	5158,93	20,00	5127,16	0,00	-	-	
13.3	20,00	4889,78	20,00	4890,70	0,00	-	-	
14.1	19,00	4812,74	19,00	4802,72	0,00	-	-	
14.2	20,00	4770,06	19,40	4801,40	0,60	7	7	
14.3	19,00	4588,19	19,00	4565,69	0,00	-	-	
15.1	17,00	3490,78	17,00	3450,77	0,00	-	-	
15.2	17,00	3569,20	17,00	3533,30	0,00	-	-	
15.3	16,00	3402,44	16,00	3383,36	0,00	-	-	
16.1	16,40	3447,20	16,60	3415,40	-0,20	3,5	-3,5	
16.2	16,20	3412,51	16,00	3386,23	0,20	3,5	3,5	
16.3	16,00	3299,90	16,00	3283,82	0,00	-	-	
							ΣR^+ =	17,50
							ΣR^- =	10,50
							Sheskin's test	28,00
								28,00
							Verwachte waarde van de Wilcoxon T-teststatistiek	14,00
							Wilcoxon T-teststatistiek	10,50
							Kritieke Wilcoxon $T_{0,05}$ -waarde voor $n = 7$, eenzijdige toets	3

met S: sequentiële oplossingsmethode
I: integratiemethode
v: het gemiddeld aantal voertuigen (over vijf iteraties)
a: de gemiddelde afgelegde afstand (over vijf iteraties)
GDW: geen directe wissel
d: het steekproefverschil per probleeminstantie

Bijlage 4: Resultaten van de procedure van de Wilcoxon rangtekentoets voor hypothese drie

Instantie	S		I		$d = a_{S-DW} - a_{I-DW}$	Rang d	Rang d met teken
	Directe wissel toegelaten		Directe wissel toegelaten				
	v_s	a_s	v_i	a_i			
1.1	6,00	1083,21	6,00	1065,86	17,35	20	20
1.2	6,20	1008,55	6,00	993,60	14,95	17	17
1.3	6,00	987,43	6,00	971,27	16,16	18	18
2.1	6,00	1012,75	6,00	1002,57	10,18	12	12
2.2	6,00	987,77	6,00	974,28	13,49	16	16
2.3	6,00	929,01	6,00	919,49	9,52	9	9
3.1	6,00	829,13	6,00	810,71	18,42	24	24
3.2	6,00	758,18	6,00	749,67	8,51	6	6
3.3	6,00	726,74	6,00	702,40	24,34	33	33
4.1	6,00	705,34	6,00	695,55	9,79	10	10
4.2	6,00	685,43	6,00	680,34	5,09	3	3
4.3	6,00	714,84	6,00	697,07	17,77	21,5	21,5
5.1	12,00	1818,11	12,00	1800,28	17,83	23	23
5.2	12,00	1832,89	12,00	1822,84	10,05	11	11
5.3	11,00	1716,53	11,00	1697,34	19,19	25	25
6.1	11,00	1688,91	11,00	1680,25	8,66	7	7
6.2	11,00	1693,31	11,00	1670,57	22,74	30	30
6.3	11,20	1829,92	11,20	1808,88	21,04	28	28
7.1	11,00	1420,19	11,00	1403,11	17,08	19	19
7.2	11,00	1309,16	10,80	1298,82	10,34	13,5	13,5
7.3	10,00	1344,67	10,00	1321,66	23,01	31	31
8.1	11,00	1362,44	11,00	1339,05	23,39	32	32
8.2	10,60	1341,77	10,40	1324,00	17,77	21,5	21,5
8.3	10,00	1187,80	10,00	1161,51	26,29	34	34
9.1	9,00	1936,63	9,00	1930,22	6,41	5	5
9.2	9,00	1992,53	9,00	1959,14	33,39	42	42
9.3	8,00	1880,41	8,00	1851,18	29,23	38	38
10.1	8,00	1988,68	8,00	1966,37	22,31	29	29
10.2	8,00	1924,99	8,00	1891,50	33,49	43	43
10.3	8,00	1893,68	8,00	1883,34	10,34	13,5	13,5
11.1	8,00	1608,26	8,00	1606,53	1,73	1	1
11.2	8,00	1677,91	8,00	1668,50	9,41	8	8
11.3	8,60	1570,58	8,00	1581,79	-11,21	15	-15
12.1	7,00	1575,76	7,00	1528,20	47,56	45	45
12.2	8,00	1560,02	8,00	1556,41	3,61	2	2

12.3	7,00	1360,58	7,00	1355,45	5,13	4	4	
13.1	16,00	3433,80	15,40	3353,54	80,26	48	48	
13.2	16,80	4088,63	17,00	4044,96	43,67	44	44	
13.3	16,00	3539,87	16,00	3519,09	20,78	27	27	
14.1	15,20	3436,05	15,00	3408,32	27,73	36	36	
14.2	16,00	3642,14	16,00	3622,32	19,82	26	26	
14.3	15,00	3316,18	15,00	3264,66	51,52	46	46	
15.1	15,00	2953,72	15,00	2921,12	32,60	41	41	
15.2	14,00	2854,18	14,00	2823,91	30,27	39	39	
15.3	15,00	2771,36	14,80	2743,75	27,61	35	35	
16.1	14,00	2811,95	14,00	2739,07	72,88	47	47	
16.2	14,00	2671,44	14,00	2643,15	28,29	37	37	
16.3	14,00	2709,95	14,00	2677,56	32,39	40	40	
							$\Sigma R^+ =$	1161,00
							$\Sigma R^- =$	15,00
							Sheskin's test	1176,00
								1176,00
							Verwachte waarde van de Wilcoxon T-teststatistiek	588,00
							Wilcoxon T-teststatistiek	15,00
							Kritieke Wilcoxon $T_{0,05}$ -waarde voor $n = 48$, eenzijdige toets	426

met S: sequentiële oplossingsmethode
I: integratiemethode
v: het gemiddeld aantal voertuigen (over vijf iteraties)
a: de gemiddelde afgelegde afstand (over vijf iteraties)
DW: directe wissel toegelaten
d: het steekproefverschil per probleeminstantie

Bijlage 5: Resultaten van de procedure van de Wilcoxon rangtekentoets voor hypothese vier

Instantie	S		I		$d = a_{S-GDW} - a_{I-GDW}$	Rang d	Rang d met teken
	Directe wissel verboden		Directe wissel verboden				
	v_S	a_S	v_I	a_I			
1.1	8,00	1339,45	8,00	1336,84	2,61	9	9
1.2	7,00	1221,26	7,00	1211,44	9,82	21	21
1.3	8,00	1261,87	7,80	1269,27	-7,40	17	-17
2.1	7,00	1231,21	7,00	1229,04	2,16	6	6
2.2	7,00	1287,01	7,00	1277,51	9,49	20	20
2.3	7,00	1160,64	7,00	1154,90	5,74	15	15
3.1	7,00	905,25	7,00	894,69	10,56	25	25
3.2	7,00	885,90	7,00	876,99	8,92	18	18
3.3	7,00	850,97	7,00	838,18	12,79	29	29
4.1	7,00	854,43	7,00	852,22	2,20	7	7
4.2	7,00	834,30	7,00	823,25	11,05	27	27
4.3	7,00	850,18	7,00	851,24	-1,06	3	-3
5.1	14,00	2441,46	14,00	2431,15	10,32	23	23
5.2	14,00	2457,18	14,00	2446,57	10,61	26	26
5.3	14,00	2267,85	14,00	2263,18	4,67	14	14
6.1	14,00	2340,74	14,00	2337,04	3,70	12	12
6.2	14,00	2305,52	14,00	2303,97	1,55	4	4
6.3	14,00	2327,68	14,00	2318,54	9,14	19	19
7.1	13,00	1683,37	13,00	1670,12	13,24	30	30
7.2	12,40	1639,00	12,60	1606,62	32,38	46	46
7.3	12,40	1665,26	12,60	1644,92	20,35	36	36
8.1	13,00	1713,26	13,00	1690,11	23,15	40	40
8.2	12,20	1626,79	12,00	1612,04	14,76	32	32
8.3	12,00	1581,17	12,00	1560,16	21,01	37	37
9.1	10,00	2552,61	10,00	2548,44	4,17	13	13
9.2	10,00	2606,88	10,00	2608,80	-1,92	5	-5
9.3	10,00	2411,07	10,00	2404,32	6,75	16	16
10.1	10,00	2394,41	10,00	2392,05	2,36	8	8
10.2	10,00	2451,72	10,00	2451,35	0,37	1	1
10.3	10,00	2501,32	10,00	2498,53	2,80	10	10
11.1	9,00	1862,55	9,00	1850,15	12,40	28	28
11.2	9,00	2015,67	9,00	1993,05	22,62	39	39
11.3	9,00	1891,10	9,00	1864,40	26,70	42	42
12.1	9,00	1847,84	9,00	1844,81	3,03	11	11
12.2	9,00	1800,02	9,00	1789,66	10,37	24	24

12.3	8,00	1664,46	8,00	1648,56	15,90	33	33	
13.1	19,00	4688,25	19,00	4674,06	14,19	31	31	
13.2	20,00	5158,93	20,00	5127,16	31,77	44	44	
13.3	20,00	4889,78	20,00	4890,70	-0,92	2	-2	
14.1	19,00	4812,74	19,00	4802,72	10,02	22	22	
14.2	20,00	4770,06	19,40	4801,40	-31,34	43	-43	
14.3	19,00	4588,19	19,00	4565,69	22,51	38	38	
15.1	17,00	3490,78	17,00	3450,77	40,01	48	48	
15.2	17,00	3569,20	17,00	3533,30	35,90	47	47	
15.3	16,00	3402,44	16,00	3383,36	19,08	35	35	
16.1	16,40	3447,20	16,60	3415,40	31,80	45	45	
16.2	16,20	3412,51	16,00	3386,23	26,27	41	41	
16.3	16,00	3299,90	16,00	3283,82	16,07	34	34	
							$\Sigma R^+ =$	1106,00
							$\Sigma R^- =$	70,00
							Sheskin's test	1176,00
								1176,00
							Verwachte waarde van de Wilcoxon T-teststatistiek	588,00
							Wilcoxon T-teststatistiek	70,00
							Kritieke Wilcoxon $T_{0,05}$ -waarde voor $n = 48$, eenzijdige toets	426

met S: sequentiële oplossingsmethode
I: integratiemethode
v: het gemiddeld aantal voertuigen (over vijf iteraties)
a: de gemiddelde afgelegde afstand (over vijf iteraties)
GDW: geen directe wissel
d: het steekproefverschil per probleeminstantie

Bijlage 6: Gemiddelde effect van een directe wissel indien voor elke directe wissel vijftien minuten extra worden gerekend (gedetailleerde resultaten)

Probleeminstantie	Sequentiële oplossingsaanpak				Geïntegreerde oplossingsaanpak			
	Directe wissel toegelaten		Directe wissel verboden		Directe wissel toegelaten		Directe wissel verboden	
	v	a	v	a	v	a	v	a
1.1	7,00	1095,68	8,00	1339,45	7,00	1085,63	8,00	1336,84
1.2	7,00	1001,18	7,00	1221,26	7,00	985,93	7,00	1211,44
1.3	7,00	987,71	8,00	1261,87	7,00	978,34	7,80	1269,27
2.1	7,00	1007,91	7,00	1231,21	7,00	1002,04	7,00	1229,04
2.2	7,00	998,58	7,00	1287,01	7,00	993,77	7,00	1277,51
2.3	7,00	926,80	7,00	1160,64	7,00	916,33	7,00	1154,90
3.1	6,00	874,47	7,00	905,25	6,00	840,15	7,00	894,69
3.2	7,00	754,92	7,00	885,90	6,00	794,37	7,00	876,99
3.3	6,00	798,51	7,00	850,97	6,00	730,77	7,00	838,18
4.1	6,00	782,39	7,00	854,43	6,00	746,40	7,00	852,22
4.2	6,20	740,24	7,00	834,30	6,00	714,72	7,00	823,25
4.3	6,00	733,67	7,00	850,18	6,00	718,37	7,00	851,24
5.1	13,20	1881,90	14,00	2441,46	13,00	1862,85	14,00	2431,15
5.2	13,00	1909,08	14,00	2457,18	13,00	1885,96	14,00	2446,57
5.3	13,00	1730,48	14,00	2267,85	13,00	1698,09	14,00	2263,18
6.1	13,00	1697,45	14,00	2340,74	13,00	1696,76	14,00	2337,04
6.2	12,80	1711,23	14,00	2305,52	12,60	1705,82	14,00	2303,97
6.3	13,00	1846,89	14,00	2327,68	13,00	1830,55	14,00	2318,54
7.1	12,00	1473,57	13,00	1683,37	12,00	1428,32	13,00	1670,12
7.2	12,00	1354,70	12,40	1639,00	12,00	1318,66	12,60	1606,62
7.3	12,00	1361,88	12,40	1665,26	12,00	1347,38	12,60	1644,92
8.1	12,00	1410,32	13,00	1713,26	12,00	1395,17	13,00	1690,11
8.2	12,00	1347,81	12,20	1626,79	12,00	1331,10	12,00	1612,04
8.3	11,60	1221,33	12,00	1581,17	11,00	1211,59	12,00	1560,16
9.1	10,00	1954,02	10,00	2552,61	10,00	1949,50	10,00	2548,44
9.1	10,00	2050,26	10,00	2606,88	9,00	2142,31	10,00	2608,80

9.3	9,00	1926,01	10,00	2411,07	9,00	1863,04	10,00	2404,32
10.1	9,00	1956,57	10,00	2394,41	9,00	1957,72	10,00	2392,05
10.2	9,00	1882,61	10,00	2451,72	9,00	1883,45	10,00	2451,35
10.3	9,00	1912,72	10,00	2501,32	9,00	1912,17	10,00	2498,53
11.1	9,00	1673,82	9,00	1862,55	8,00	1701,62	9,00	1850,15
11.2	9,00	1673,11	9,00	2015,67	8,00	1693,23	9,00	1993,05
11.3	9,00	1629,08	9,00	1891,10	9,00	1561,12	9,00	1864,40
12.1	8,00	1557,45	9,00	1847,84	8,00	1525,28	9,00	1844,81
12.2	8,00	1644,83	9,00	1800,02	8,00	1593,32	9,00	1789,66
12.3	8,00	1377,69	8,00	1664,46	8,00	1370,64	8,00	1648,56
13.1	17,00	3491,45	19,00	4688,25	17,00	3439,21	19,00	4674,06
13.2	18,00	4107,02	20,00	5158,93	18,00	4078,02	20,00	5127,16
13.3	18,00	3573,36	20,00	4889,78	17,00	3653,16	20,00	4890,70
14.1	17,00	3518,44	19,00	4812,74	17,00	3470,77	19,00	4802,72
14.2	17,80	3675,11	20,00	4770,06	17,00	3732,72	19,40	4801,40
14.3	17,00	3399,15	19,00	4588,19	16,40	3403,99	19,00	4565,69
15.1	16,00	3079,86	17,00	3490,78	16,00	3009,98	17,00	3450,77
15.2	16,00	2923,22	17,00	3569,20	15,00	2943,62	17,00	3533,30
15.3	16,00	2849,80	16,00	3402,44	16,00	2799,08	16,00	3383,36
16.1	15,00	2904,64	16,40	3447,20	15,00	2838,51	16,60	3415,40
16.2	15,00	2765,76	16,20	3412,51	15,00	2721,27	16,00	3386,23
16.3	15,00	2818,14	16,00	3299,90	15,00	2748,36	16,00	3283,82

met v: het gemiddeld aantal voertuigen (over vijf iteraties)
a: de gemiddelde afgelegde afstand (over vijf iteraties)

Bijlage 7: Gemiddelde effect van een directe wissel indien voor elke directe wissel dertig minuten extra worden gerekend (gedetailleerde resultaten)

Probleeminstantie	Sequentiële oplossingsaanpak				Geïntegreerde oplossingsaanpak			
	Directe wissel toegelaten		Directe wissel verboden		Directe wissel toegelaten		Directe wissel verboden	
	v	a	v	a	v	a	v	a
1.1	8,00	1094,76	8,00	1339,45	8,00	1070,15	8,00	1336,84
1.2	8,00	1005,66	7,00	1221,26	7,00	1034,32	7,00	1211,44
1.3	8,00	997,04	8,00	1261,87	7,00	1052,29	7,80	1269,27
2.1	8,00	1003,77	7,00	1231,21	7,00	1021,93	7,00	1229,04
2.2	7,80	1010,54	7,00	1287,01	7,00	1029,42	7,00	1277,51
2.3	7,00	971,40	7,00	1160,64	7,00	961,03	7,00	1154,90
3.1	7,00	858,86	7,00	905,25	7,00	826,23	7,00	894,69
3.2	7,80	783,05	7,00	885,90	7,00	779,64	7,00	876,99
3.3	7,00	760,39	7,00	850,97	7,00	724,79	7,00	838,18
4.1	7,00	759,41	7,00	854,43	7,00	742,88	7,00	852,22
4.2	7,00	754,31	7,00	834,30	6,80	728,75	7,00	823,25
4.3	7,00	750,39	7,00	850,18	7,00	733,14	7,00	851,24
5.1	15,00	1907,56	14,00	2441,46	14,00	1910,51	14,00	2431,15
5.2	15,00	1907,50	14,00	2457,18	14,00	1928,50	14,00	2446,57
5.3	15,00	1731,83	14,00	2267,85	14,00	1725,12	14,00	2263,18
6.1	14,40	1757,48	14,00	2340,74	14,00	1771,21	14,00	2337,04
6.2	14,00	1798,61	14,00	2305,52	14,00	1790,76	14,00	2303,97
6.3	14,40	1873,47	14,00	2327,68	14,00	1861,38	14,00	2318,54
7.1	14,00	1457,74	13,00	1683,37	13,00	1444,00	13,00	1670,12
7.2	13,60	1388,52	12,40	1639,00	12,60	1390,14	12,60	1606,62
7.3	13,00	1390,58	12,40	1665,26	12,80	1387,60	12,60	1644,92
8.1	13,20	1448,43	13,00	1713,26	13,00	1437,39	13,00	1690,11
8.2	13,00	1397,19	12,20	1626,79	12,60	1384,13	12,00	1612,04
8.3	13,00	1255,78	12,00	1581,17	12,00	1262,63	12,00	1560,16
9.1	10,00	2025,79	10,00	2552,61	10,00	2014,98	10,00	2548,44
9.1	11,00	2065,03	10,00	2606,88	10,00	2101,51	10,00	2608,80

9.3	10,00	1915,32	10,00	2411,07	9,00	1984,59	10,00	2404,32
10.1	10,00	2034,98	10,00	2394,41	9,20	2057,89	10,00	2392,05
10.2	10,00	1913,34	10,00	2451,72	9,20	1970,02	10,00	2451,35
10.3	10,00	2003,87	10,00	2501,32	9,40	2031,78	10,00	2498,53
11.1	9,00	1697,67	9,00	1862,55	9,00	1674,29	9,00	1850,15
11.2	9,00	1749,12	9,00	2015,67	9,00	1710,79	9,00	1993,05
11.3	10,00	1585,58	9,00	1891,10	9,00	1634,98	9,00	1864,40
12.1	9,00	1550,12	9,00	1847,84	9,00	1541,49	9,00	1844,81
12.2	9,00	1627,30	9,00	1800,02	9,00	1603,18	9,00	1789,66
12.3	9,00	1400,71	8,00	1664,46	8,00	1429,36	8,00	1648,56
13.1	19,20	3617,39	19,00	4688,25	18,00	3581,05	19,00	4674,06
13.2	19,40	4180,04	20,00	5158,93	19,00	4185,66	20,00	5127,16
13.3	19,40	3687,42	20,00	4889,78	18,00	3745,57	20,00	4890,70
14.1	19,00	3589,96	19,00	4812,74	18,00	3627,97	19,00	4802,72
14.2	19,60	3770,06	20,00	4770,06	18,80	3795,60	19,40	4801,40
14.3	19,00	3497,23	19,00	4588,19	18,00	3491,11	19,00	4565,69
15.1	17,00	3088,70	17,00	3490,78	17,00	3038,75	17,00	3450,77
15.2	17,80	2972,67	17,00	3569,20	16,00	2993,48	17,00	3533,30
15.3	18,00	2980,74	16,00	3402,44	16,00	2943,63	16,00	3383,36
16.1	17,00	2882,91	16,40	3447,20	16,00	2899,85	16,60	3415,40
16.2	17,00	2772,71	16,20	3412,51	16,00	2769,12	16,00	3386,23
16.3	17,00	2776,21	16,00	3299,90	16,00	2779,51	16,00	3283,82

met v: het gemiddeld aantal voertuigen (over vijf iteraties)
a: de gemiddelde afgelegde afstand (over vijf iteraties)

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Uitdagingen voor het beheer van lege containertransporten

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

Jaar: **2012**

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

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

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

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

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

Voor akkoord,

Croonen, Aline

Datum: **31/05/2012**