



**UHASSELT**

KNOWLEDGE IN ACTION

## Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de handelswetenschappen

### **Masterthesis**

#### **Laadplanning voor intermodaal spoortransport: het effect van vooruitplannen**

#### **Lucas Markey**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de handelswetenschappen, afstudeerrichting supply chain management

#### **PROMOTOR :**

Prof. dr. Kris BRAEKERS



**UHASSELT**

KNOWLEDGE IN ACTION

[www.uhasselt.be](http://www.uhasselt.be)  
Universiteit Hasselt  
Campus Hasselt:  
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt  
Campus Diepenbeek:  
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

**2019**  
**2020**



# **Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen**

master in de handelswetenschappen

## ***Masterthesis***

### ***Laadplanning voor intermodaal spoortransport: het effect van vooruitplannen***

#### **Lucas Markey**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de handelswetenschappen, afstudeerrichting supply chain management

#### **PROMOTOR :**

Prof. dr. Kris BRAEKERS



# **Covid-19 crisis**

Deze masterproef werd geschreven tijdens de COVID-19 crisis in 2020. Deze wereldwijde gezondheids crisis heeft mogelijk een impact gehad op het schrijf- en verwerkingsproces, de onderzoekshandelingen en de onderzoeksresultaten die aan de basis liggen van dit werkstuk.



# Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn opleiding Bedrijfseconomische Wetenschappen - Handelswetenschappen met afstudeerrichting Supply Chain Management aan de Universiteit Hasselt. Het onderwerp van deze thesis - de laadplanning in het intermodaal spoortransport: de impact van vooruitplannen - heeft mijn interesse gewekt omwille van mijn bijzondere passie voor het goederenvervoer per spoor. Gezien de beperkte literatuurstudie die omtrent dit onderwerp tot op heden uitgevoerd werd, was het voor mij een uitdaging om voldoende relevante literatuur rond het vooruitplannen te bestuderen, wat uiteindelijk als basis zou dienen voor mijn praktijkonderzoek. Eénmaal de bevindingen uit mijn literatuurstudie positief bevonden werden, kon ik vervolgens aan de hand van een simulatiemodel de impact van vooruitplannen testen, de resultaten analyseren en finaal ook een conclusie omtrent de onderzoeksvraag uitschrijven.

Het simulatiemodel, bereikt op basis van de bevindingen van het doctoraatswerk van dr. Hilde Heggen "A multi-objective approach for intermodal train load planning", werd opgesteld door mijn promotor prof. dr. Kris Braekers. Voor het opstellen van statistisch correcte containersets, gebaseerd op basis van het doctoraatswerk van dr. Hilde Heggen, heb ik bijzondere hulp gekregen van prof. dr. Werner De Gersem van de Universiteit Gent. Graag had ik ook de Belgische spoorvrachtoperator Lineas NV willen bedanken voor mijn stage. Gedurende deze periode werd ik ondergedompeld in de wereld van het goederenvervoer per spoor en kwam ik tot nieuwe inzichten omtrent laadplanning van intermodaal spoortransport, wat de kwaliteit van mijn masterproef ten goede kwam.

Ten slotte wil ik toch ook graag mijn ouders bedanken voor de kansen die ze mij gegeven hebben tijdens het afgelopen schakeljaar en masterjaar van mijn opleiding. Ook mijn broer en zus verdienen de nodige vermelding. Mede dankzij deze masterproef en de leerrijke feedback die ik van mijn promotor ontvangen mocht, ben ik tot betere inzichten gekomen en ben ik gaandeweg gegroeid in het leerproces van vooruitplannen.

Met deze opleiding heb ik dan ook een goede 'rugzak' verworven om de stap naar de arbeidsmarkt te maken: een nieuwe en hopelijk boeiende weg die ik straks bewandelen mag.

**Lucas Markey**  
**5 juni, 2020**  
**Ieper**



# Samenvatting

Bij het intermodaal transport worden goederen in dezelfde laadeenheid - veelal een container - via een combinatie van verschillende transportmodi van deur-tot-deur geleverd. Dit transport wordt vaak opgesplitst in een voor-, hoofd- en natransportgedeelte. In de praktijk wordt het hoofdvervoer voornamelijk uitgevoerd door een schip of een trein, waarbij de 'first-' en 'last mile' vaak per vrachtwagen gebeurt. Het grote voordeel is dat het intermodaal vervoer de toegankelijkheid van het wegvervoer combineert met de schaalvoordelen van het zee-/ spoortransport. Bovendien biedt het intermodaal transport ook vanuit maatschappelijk perspectief een groot voordeel: door het bundelen van laadeenheden op schepen/ treinen over de lange afstanden, worden snelwegen ontlast en dalen externe kosten zoals de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Voor het langeafstandsverkeer blijft een echte modal shift, zijnde de verschuiving van het wegvervoer naar zee-/ spoortransport, echter uit. Vooral de grote flexibiliteit die het wegvervoer kan bieden, maakt het voor het zee- en spoortransport moeilijk te concurreren.

Deze masterproef focust zich op het intermodale hoofdvervoer per spoor, en meer specifiek op de laadplanning van de goederentreinen. Een laadplan, opgesteld door een logistieke dienstverlener die een trein inlegt voor een nationaal/ internationaal transport, geeft een overzicht weer van welke laadeenheden op een wagon geplaatst moeten worden. De toewijzing van containers gebeurt vandaag voornamelijk manueel. In de literatuur zijn er echter ook verschillende treinlaadplanmodellen terug te vinden. In een eerste plaats hangt de toewijzing af van de bestemming van de container, het type, het gewicht en de specifieke karakteristieken van elke trein en wagon. Om aan een bepaald niveau van dienstverlening te voldoen, probeert elke dienstverlener om alle containers op tijd bij de klant te brengen. Vaak zal er in een tweede fase ook met andere optimalisaties rekening gehouden worden. Zo is het mogelijk dat de éne dienstverlener de capaciteitsgraad van elke trein zo groot mogelijk wil zien, terwijl de andere een zo klein mogelijke handling-time op de terminal nastreeft. Manuele planningsmethoden zijn zeer tijdrovend. Treinlaadplanmodellen zorgen voor een automatische toewijzing van de laadeenheden, steeds rekening houdend met de gegeven beperkingen en de doelstelling(en). Verschillende bestaande laadplanmodellen worden in dit werk besproken. Uit de literatuurstudie blijkt echter dat beide planningsmethoden steeds de focus leggen op het optimaal inplannen van één bepaalde trein, zonder verder te kijken naar andere laadeenheden die op een latere dag verstuurd kunnen worden, en reeds beschikbaar staan op de terminal. Er wordt dus dag per dag gepland, zonder vooruit te kijken naar latere dagen binnen een bepaalde periode; er wordt niet 'vooruitgepland'. Dit onderzoek probeert de impact van het 'vooruitplannen' in kaart te brengen. Als er dankzij het vooruitplannen minder containers te laat op hun bestemming komen dan dat bij het conventioneel plannen het geval zou zijn, kan het effect van vooruitplannen als positief bevonden worden.

In de praktijkstudie van dit onderzoek wordt een bestaand treinlaadplanmodel hervormd op die wijze dat het aspect 'vooruitplannen' geïntegreerd is. Dit nieuwe 'treinlaadvooruitplanmodel' (TLVP-model) maakt het mogelijk om zowel vooruit te plannen als de traditionele planningsmethode te hanteren. De maximaal mogelijke vooruitplanningstermijn in dit model bedraagt vier dagen. Er worden twee doelfuncties in het model opgenomen die hiërarchisch opgesteld zijn. De eerste (primaire) doelfunctie



zorgt ervoor dat het aantal dagen waarop de te plannen containers te laat op hun bestemming komen, wordt geminimaliseerd. Wanneer er verschillende laadplannen mogelijk zijn met hetzelfde primaire resultaat, kijkt het model verder naar de secundaire gewogen-som doelfunctie. Hierbij wordt er - afhankelijk van het gegeven gewicht - rekening gehouden met de capaciteit die de containers op een trein innemen (alfa), alsook naar de prioriteit (dringendheid) van de zendingen die nog niet in de primaire doelfunctie opgenomen werden (1-alfa). Naast deze twee parameters, wordt ook de invloed van het aantal dagen vooruitplannen onderzocht. Een laatste parameter, de bèta, maakt het mogelijk om een lager gewicht te geven aan latere planningsdagen. De simulatie gebeurt met zelf opgestelde containersets die in lijn liggen met de sets die gebruikt werden bij het bestaand treinlaadplan waarop het TLVP-model gebaseerd is. Er worden vier soorten sets opgesteld van respectievelijk 300, 400, 500 en 600 containers. De mate van flexibiliteit (planningsmarge) die elke container krijgt, wordt voor elke set over zeven categorieën gevarieerd. Op die manier worden 28 verschillende sets bekomen. Het totaal aantal containers van elke set moet telkens over 10 dagen (treinen) verdeeld worden.

De kans dat het vooruitplannen tot een beter resultaat leidt, neemt toe volgens het gemiddeld aantal te plannen containers per dag, al kan dit nog sterk afhangen van de planningsmarges die elke container heeft. Om er zeker van te zijn dat - ongeacht de planningsmarge - het vooruitplannen vanaf een bepaalde vooruitplanningstermijn voordelig is, moet de totale beschikbare planningsruimte over al de te plannen treinen heen, kleiner zijn dan het totaal aantal te plannen containers. De praktijkstudie toont aan dat in dit TLVP-model het aan te raden is om vanaf 50 te plannen containers per dag vooruit te kijken. De beste resultaten worden steevast teruggevonden vanaf een vooruitplanningstermijn van drie of vier dagen. Het positief effect van vooruitplannen neemt toe naarmate het gemiddeld aantal te plannen containers per dag stijgt. Hoe meer de planningsmarge van de containers varieert, hoe kleiner de invloed van de gewichten van de secundaire doelstelling wordt op het primaire resultaat. Logistieke dienstverleners die louter een 30 voet of 45 voet containertype ter beschikking hebben, zullen het aantal 'te laat' dagen via vooruitplannen niet kunnen reduceren.

Elke bevinding van dit onderzoek is steeds verbonden met de gebruikte containersets en de specifieke container-, wagon- en treinbeperkingen die in het TLVP-model opgesteld werden. Uitsluitende conclusies mogen er op basis van dit eerste onderzoek naar de impact van vooruitplannen op het intermodaal spoortransport dus niet getrokken worden. In deze eerste fase wordt er verondersteld dat de totale te transporteren containers voor een bepaalde periode bij aanvang van de planning gekend is, wat het (vooruit)plannen vanzelfsprekend gemakkelijker maakt. In de praktijk kan de transportvraag in laatste instantie echter nog wijzigen. Om de concurrentie met het wegvervoer aan te gaan en dus een modal shift naar het spoorvervoer te verwezenlijken, staat flexibiliteit centraal. Het simulatiemodel dat in deze masterproef opgesteld wordt, probeert met deze flexibiliteit in zekere mate rekening te houden. Het model maakt het namelijk mogelijk om tot op de laatste dag, zijnde de dag voor het uitrijden van een geplande trein, de vooropgestelde laadplanning te wijzigen. In de huidige dynamische planningswereld moeten real-time planners echter tot op de laatste uren voor vertrek van een geplande trein nog de mogelijkheid hebben om een alternatieve treinlaadplanning te kiezen, indien het origineel vooropgestelde plan niet uitvoerbaar blijkt te zijn. Deze dynamische real-time flexibiliteit, noodzakelijk om een goederentrein als volwaardig alternatief naar voren te

schuiven, ontbreekt in het model. In dit onderzoek worden bovendien 'slechts' laadplanningen voor 600 containers opgesteld. Planningsproblemen van grotere terminals kunnen door de exacte oplossingsmethode die in het model gehanteerd wordt, niet opgelost worden. Ook de planningstermijn van 10 dagen zou verder uitgebreid kunnen worden. Verder onderzoek omtrent het onderwerp is dus zeker vereist. Echter, de bevindingen van deze masterproef kunnen als een eerste stap dienen waarop verder gebouwd kan worden, teneinde een betere dienstverlening aan de klant te bieden en op die manier een modal shift te bewerkstelligen.

# Inhoud

Covid-19 crisis .....	
Woord vooraf .....	
Samenvatting .....	
1 Hoofdstuk I: Inleiding .....	2
1.1 Praktijkrelevantie .....	2
1.1.1 Groeiende milieuproblemen .....	2
1.1.2 Groeiende mobiliteitsproblemen .....	3
1.1.3 Andere externe kosten transportsector .....	4
1.1.4 Belemmeringen spoorvervoer .....	5
1.2 Probleemstelling & onderzoeksvraag .....	7
1.2.1 Probleemstelling .....	7
1.2.2 Onderzoeksvraag .....	10
1.2.3 Deelvragen .....	11
1.2.3.1 "Welke train load planning modellen bestaan er in de literatuur?" .....	11
1.2.3.2 "Hoe zal het vooruitplannen bij train load planning getest worden?" .....	12
1.2.3.3 "Wat is het effect van vooruitplannen binnen het TLP-model?" .....	12
1.3 Onderzoeksaanpak/methodologie .....	13
2 Hoofdstuk II: Literatuurstudie .....	16
2.1 TLP-problemen .....	16
2.1.1 Planning in het intermodaal spoortransport .....	16
2.1.2 Soorten TLP-modellen .....	18
2.1.2.1 LPA-model door Feo & Gonzalez-Velarde (1995) .....	19
2.1.2.2 Logistics Queuing Network .....	19
2.1.2.3 LPA-model door Corry & Kozan (2005) .....	20
2.1.2.4 Modellen van Bruns & Knust (2010) .....	21
2.1.2.5 Model van Heggen (2017) .....	21
2.2 Vooruitplannen .....	23
2.2.1 Vooruitplannen in het intermodaal spoortransport .....	23
2.2.2 Vooruitplannen in de transportsector .....	25
2.2.3 Vooruitplannen in de economische sector .....	26
3 Hoofdstuk III: Praktijkstudie .....	29
3.1 Inleiding tot praktijkstudie .....	29

3.2	TLVP-model .....	30
3.2.1	Inleiding tot TLVP-probleem .....	30
3.2.2	Formulering TLVP-probleem .....	32
3.2.2.1	Sets, indices en parameters .....	32
3.2.2.2	Beslissingsvariabelen .....	33
3.2.2.3	Doelfunctie .....	33
3.2.2.4	Beperkingen .....	36
3.2.2.5	Domein constraints .....	39
3.3	Gehanteerde oplossingsmethode .....	40
3.3.1	Oplossen TLP-probleem Heggen .....	40
3.3.2	Oplossen TLVP-probleem .....	41
3.4	Opzet experimenten .....	45
3.4.1	Instances .....	45
3.4.1.1	Lengte en gewicht .....	46
3.4.1.2	Categorieën per instance .....	48
3.4.2	Parameter settings .....	50
3.5	Resultaten .....	52
3.5.1	Instance 300 containers .....	52
3.5.2	Instance 400 containers .....	53
3.5.3	Instance 500 en 600 containers .....	57
3.5.4	Instance 30- en 45-voetcontainers .....	62
3.5.5	Discussie van de resultaten .....	64
3.6	Beperkingen .....	66
4	Conclusie en aanbevelingen .....	68
5	Appendix .....	
6	Bibliografie .....	



# 1 Hoofdstuk I: Inleiding

In dit onderzoeksplan wordt het effect van 'vooruitplannen' bij het opstellen van een laadplanning voor intermodaal spoortransport onderzocht. Het onderzoeksplan is opgesplitst in drie delen. Eerst wordt de relevantie van het onderwerp voor de economie en maatschappij beschreven. Vervolgens worden ook de deelvragen opgesteld en besproken. Deze zijn nodig om een concreet antwoord te krijgen op de centrale onderzoeksvraag die in deze masterproef behandeld zal worden. Tot slot wordt ook de aanpak van dit onderzoek kort aangehaald.

## 1.1 Praktijkrelevantie

Verschillende studies tonen aan dat het spoor vandaag één van de meest ecologische transportmiddelen is (Adolphy, Nicaise, & Counet, 2015). De trein wordt beschouwd als een ideale oplossing voor de groeiende mobiliteits- en milieuproblemen (De Vlieger, et al., 2012). Waar de CO<sub>2</sub>-uitstoot in 2017 in alle sectoren (inclusief de industrie) gedaald is ten opzichte van 1990, is de uitstoot in de transportsector met 8.2% gestegen (Klimaat.be, 2019). Ook het filerecord van 2018 met in totaal meer dan 925.000 uren file toont aan dat er op vlak van mobiliteit dringend nood is aan veranderingen binnen de transportsector (De Morgen, 2018).

### 1.1.1 Groeiende milieuproblemen

In 2017 was de transportsector verantwoordelijk voor 22.5% van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot in België (Klimaat.be, 2019). Volgens de meest recente cijfers van 2015 had het spoor in dat jaar slechts 1.2% aandeel in de - door alle transportmodi veroorzaakte - CO<sub>2</sub> uitstoot (Belgianrail.be, 2015). De stijging van de CO<sub>2</sub>-uitstoot in de transportsector is bijna uitsluitend toe te schrijven aan de stijging van de emissies door het wegverkeer, hoofdzakelijk te wijten aan het hoge dieselvebruik in die periode (Vlaamse milieumaatschappij, 2019). Uit het jaarlijks energie-rapport "World Energy Outlook 2018", gepubliceerd door het Internationaal Energieagentschap, blijkt dat de wereldwijde vraag naar energie en bijhorende CO<sub>2</sub>-uitstoot tegen 2040 dubbel zo groot zal zijn in vergelijking met het basisjaar 1990 (International Energy Agency, 2019). Dit terwijl de EU met haar zogenaamde 'Green Deal' naar een klimaatneutraal Europa in 2050 streeft (Europese Commissie, 2018). Momenteel is Europa op weg om slechts 60% van de uitstoot te verminderen tegen 2050 (Santens, 2019).

De wereldwijde handelspatronen die in de loop van de jaren veranderen, maken het nog extra moeilijk om de uitstoot terug te dringen. "Als transport zich meer en meer zal verplaatsen naar regio's met weinig spoorwegen of waterwegen, zal de uitstoot van broeikasgassen door wegverkeer bijna verdubbelen", aldus het ITF (International Transport Forum) (De Morgen, 2017).

Om op deze uitdagingen een antwoord te bieden, schuift ITF secretaris-generaal José Viegas snellere innovatie als mogelijke oplossing naar voor. "Met technologie kunnen we ongeveer 70 procent van de mogelijke CO<sub>2</sub>-reductie voor 2050 bereiken, de rest zal door een gedragsverandering moeten komen" (De Morgen, 2017). Net op die gedragsverandering (= 'mental shift') kan er nog veel terrein gewonnen worden. Hierbij moeten we denken aan gedeelde mobiliteit, veranderingen in de toeleveringsketens en ook nieuwe manieren/ verschuivingen van vervoer (De Morgen, 2017). Bij die

verschuivingen is er dan weer sprake van een modal shift, waarbij het spoor een milieuvriendelijk alternatief voor het wegvervoer zou kunnen zijn.

### 1.1.2 Groeiende mobiliteitsproblemen

De congestie op de weg gaat gepaard met een daling van de gemiddelde snelheid van de weg. Uit een studie van de federale overheidsdienst Mobiliteit en vervoer, uitgevoerd door het Federaal Planbureau, blijkt dat de snelheid op de weg zowel tijdens de piek- en daluren verder zou dalen. "In 2030 zou de gemiddelde snelheid tijdens de spitsuren 23% lager zijn dan in 2005" (Mayeres, 2008). Volgens uiteenlopende verkeersindicatoren als 'Inrix Traffic Scorecard' en 'TomTom Traffic Index' behalen Brussel en Antwerpen nu al de wereldtop als het gaat over tijdverlies in de file (Vias). Een mogelijke oplossing is ook hier om binnen het goederenvervoer een verschuiving (= 'modal shift') te creëren van het wegvervoer naar het spoor-, binnenvaart- en/of zeevervoer. Volgens het VIAS-instituut, dat als doel heeft om de verkeersveiligheid samen met mobiliteit en de maatschappelijke veiligheid te verbeteren, is er sinds 2002 nog nauwelijks een verschuiving in de modal shift. Ondanks het feit dat het Vlaamse spoorwegennet het dichtste is van Europa, scoort het spoorvervoer slechts gemiddeld (Vias).

De nood aan een gedragsverandering (= 'mental shift') die in punt 1.1.1 'Groeende milieuproblemen' aangehaald wordt, is dus ook hier van toepassing. Studies van onder meer de KU Leuven (Mayeres & Proost, 2004) en de Universiteit Antwerpen (Gérard, Struyf, Sys, Voorde, & Vanelslender, 2015) tonen aan dat die verandering/ verschuiving er niet zal komen zonder maatregelen die het wegvervoer ontmoedigen. Mogelijkheden hiervoor zijn het internaliseren van de externe kosten (CO<sub>2</sub>-uitstoot, congestie en verkeers(on)veiligheid) en een verbeterde infrastructuur van het spoor- en waternet, alsook een verbeterde flexibiliteit in de milieuvriendelijkere modi zoals het spoorvervoer en binnenvaart. Momenteel is de kostprijs van zowel personen- en goederenvervoer in beperkte mate gekoppeld aan de interne en externe kosten van de mobiliteit. Zo internaliseren zware vrachtwagens slechts tussen de 30% en de 66% van hun externe kosten (Vlaams Parlement). Die internalisatie gebeurt hoofdzakelijk via de opgelegde belastingen per type transportmiddel (Mayeres, 2008).

### 1.1.3 Andere externe kosten transportsector

Naast de groeiende milieu- en congestiekosten brengt de transportsector nog allerlei andere externe kosten met zich mee. Zo brengt luchtvervuiling niet enkel schade toe aan het milieu, maar leidt het op korte termijn eveneens tot gezondheidsklachten en zelfs tot acute effecten bij grote concentraties van vervuilende stoffen. "Hoge concentraties van stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>) doet het aantal astma-aanvallen en ziekenhuisopnames toenemen (Vlaamse milieumaatschappij, 2019). Ook een constante blootstelling aan lagere concentraties heeft een impact op de gezondheid. Vaak zijn chronische luchtwegeninfecties en cardiovasculaire aandoeningen een rechtstreeks gevolg hiervan (Vlaamse milieumaatschappij, 2019). In een stad als Brussel is het goederenverkeer verantwoordelijk voor respectievelijk 25% van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot in de stad en 41% van het fijn stof (Bruzz, 2014).

De studie van de Vlaamse milieumaatschappij besluit dat in 2018 meer dan 97% van de bevolking in een gebied woonde met een te hoog jaargemiddelde voor fijn stof en ozon. Positief is dat de concentraties fijn stof gestaag zakken, maar de adviesnormen van de Wereldgezondheidsorganisatie liggen nog steeds ver buiten bereik. Bij de concentratie ozon valt er geen dalende trend waar te nemen (Vlaamse milieumaatschappij, 2019). Ter illustratie: uit een studie van de Europese Unie blijkt dat maar liefst 555.000 Europeanen elk jaar vroeger sterven door de effecten van luchtvervuiling. "In Brussel bijvoorbeeld is de transportsector, met een aandeel in het verkeer van 14%, verantwoordelijk voor 33% van de totale uitstoot van fijnstof" (Bruzz, 2019). Bovendien voorspelt Mobiel Brussel - door een stijging van het aantal inwoners en de kleinere bestelwagens in de stad - een toename van het goederenverkeer tegen 2050 met 80% procent (Bruzz, 2014).

Naast de emissie- en congestieproblemen die een rechtstreeks gevolg hebben op milieu, mens en/of maatschappij, wordt ook de onveiligheid van het transport gezien als een externe transportkost. Uit gegevens van de FOD Economie AD Statistiek & FOD Mobiliteit blijkt dat het risico op een ongeval waarbij een vrachtwagen betrokken is, kleiner is dan voor andere weggebruikers. "Als we rekening houden met de afgelegde afstanden, zijn er minder ongevallen met vrachtwagens, maar leiden ze wel vaker tot dodelijke slachtoffers" (Temmerman, 2016). In 2014 waren ongevallen met vrachtwagens 3.4 keer zo ernstig als alle verkeersongevallen samen. De Europese spoorwegen behoren tot de veiligste ter wereld. De EU wil dit niveau verder aanhouden door hoge veiligheidsnormen te handhaven en veiligheidseisen in de hele EU te harmoniseren. "Harmonisatie op dit gebied zorgt niet alleen voor optimale veiligheid, maar helpt ook de comptabiliteit en de interoperabiliteit van de nationale spoorwegsystemen te verbeteren" (Europese Commissie, 2019). Door een standaardregelgeving in de EU omtrent spoorveiligheid, wordt het gebruik van het duurzame en veilige spoorvervoer nog meer gestimuleerd (Europese Commissie, 2019).

Het staat vast dat bestelwagens en vrachtwagens steeds milieuvriendelijker worden en in de toekomst wellicht volledig klimaatneutraal gemaakt zullen worden (Sociaal Economische Raad van Vlaanderen). De huidige mobiliteits- en onveiligheidsproblemen raken hiermee echter niet opgelost. "Als auto's door stadsstraten rijden zullen die stiller zijn, maar op de snelwegen - boven de 70 kilometer per uur - zullen we de banden even hard horen als vandaag. Ook fijn stof - niet van de uitlaatgassen uiteraard, maar wel van de banden en andere roterende onderdelen - blijft mogelijk een probleem" (Lauwers, 2017).



#### 1.1.4 Belemmeringen spoorvervoer

Vanuit economisch en maatschappelijk perspectief kan het spoorvervoer dus een oplossing bieden aan heel wat van bovenvermelde problemen. Een modal shift van de weg naar het spoorvervoer lijkt dus in de maak. Bovendien gebeurt veel van het dagelijkse goederenvervoer niet enkel via het unimodale (weg)transport, maar ook via intermodale wijze waarbij twee of meer transportmodi worden ingezet om een bepaald goed bij de eindbestemming te leveren. Net dit kan een mogelijke modal shift in de hand werken. Het grote voordeel is dat multimodaal vervoer de toegankelijkheid van het wegvervoer met de schaalvoordelen van het spoorvervoer combineert. "Intermodaal vervoer per spoor biedt een veelbelovende mogelijkheid om een modale verschuiving te realiseren van unimodaal wegtransport naar een duurzamer vervoerssysteem" (Heggen, 2019). Het spreekt voor zich dat dit absoluut voordelig is vanuit economisch en maatschappelijk perspectief: door het bundelen van ladingeenheden op treinen over lange afstanden worden de - nu al overvolle - snelwegen ontlast en de CO<sub>2</sub>-emissies fors verminderd.

Desondanks blijft een 'echte' modal shift van de weg naar het spoor uit (Heggen, 2019). Studies schuiven vooral de flexibiliteit als voornaamste factor naar voor. Zo is er een positieve relatie tussen economische groei en het vrachtvervoer, waarbij het wegtransport doorgaans beter reageert op veranderingen in de economische cyclus dan het spoor. Dit geldt zeker voor kortere afstanden. Naast de flexibiliteit, spelen de transportkosten natuurlijk ook een grote rol bij de modal shift. Momenteel is het vervoer per spoor relatief duur ten opzichte van vervoer over zowel de weg als het water. Het spoor kent vooral een relatief hoge prijs op korte en middellange afstanden. Oorzaken hiervan zijn onder andere de hogere overslagkosten. Ten opzichte van de binnenvaart wordt dit op de lange afstand wel gecompenseerd door de hogere snelheid van een trein. De literatuur wijst op een drempel van 200 à 300 km vanaf wanneer het spoor bijzonder concurrerend is en het potentieel voor een modal shift groter wordt (Steer Davies Gleave, 2015). De break-evenafstand tussen weg- en spoorvervoer voor maritieme containers (afkomstig van een zeeschip) ligt boven de 110-170 kilometer, voor continentale containers (afkomstig van een klant op het vaste land) boven de 230-300 kilometer en voor trailers-on-train (vrachtwagenopleggers op een trein) boven de 200-300 kilometer. "Voor vervoer over afstanden vanaf 200-300 kilometer is het spoor dus prijstechnisch concurrerend met de weg" (Meeuwissen, 2005). Naast prijs-flexibiliteit zijn er natuurlijk tal van andere factoren die meespelen. Ten opzichte van de weg zitten de grootste nadelen van het spoorvervoer op het gebied van traceerbaarheid en veiligheid van goederen. Zo is er bij het rangeren van wagons steeds een grotere kans op schade en neemt de kans op diefstal op lange afstanden toe. Niet te vergeten is ook het voor- en natransport dat hier veelal aan te pas komt, een extra factor dat in het nadeel van het spoorvervoer speelt (Meeuwissen, 2005).

De Europese Unie hoopt om in 2030 minimum 30% van alle goederenvervoer over afstanden van minimum 300 kilometer via het spoor te vervoeren. Tegen 2050 zou dit al zo'n 50% moeten zijn (Europese Commissie, 2011). Langs de andere kant beseft men ook dat er hiervoor ontegensprekelijk forse investeringen nodig zijn op vlak van spoorstaattechnologie. Verder wordt er ook gewerkt aan een verbetering van de uitwisseling van informatie tussen spoorwegbeheerders, vervoerders en verladers (Evofenedex, sd). Binnen Europa hebben enkele grote spoorbedrijven zich gegroepeerd om sterker voor de dag te komen en de druk op de politiek wat de modal shift betreft, op te voeren.

Grote namen als CFL Cargo, Deutsche Bahn, Lineas en SNCF Logistics vormen samen met nog 14 andere spoorgerelateerde bedrijven een coalitie onder de naam "Rail Freight Forward" die als doel hebben om negatieve effecten van mobiliteit en vrachtverkeer op onze planeet drastisch te verminderen via een modal shift van het wegvervoer naar het goederenvervoer per spoor. (Rail Freight Forward, 2019).

Tot slot vat de 'Rail Freight Forward' coalitie de voordelen van het spoor misschien nog het beste samen: "vrachtvervoer per spoor verbruikt gemiddeld zes keer minder energie, stoot negen keer minder CO2 uit en leidt tot 85 keer minder externe ongevallenkosten dan het wegvervoer (Rail Freight Forward, 2019). Als de impact van 'vooruitplannen' in het intermodaal spoorvervoer met dit onderzoek positief bevonden wordt, kan dit een bijkomende factor zijn die een verdere modal shift stimuleert, teneinde het leven voor mens, milieu en maatschappij opnieuw een stuk aangenamer te maken.

## 1.2 Probleemstelling & onderzoeksvraag

### 1.2.1 Probleemstelling

Containerterminals zijn een complex systeem waar er nood is aan optimalisatiemethodes om de cruciale beslissingen op verschillende planningsniveaus te ondersteunen op zowel strategisch, tactisch als operationeel vlak (Ambrosino & Siri, 2015). De optimalisatie van het spoorvervoer kan men behalen door een strategische planning van de nodige treinen te gebruiken. Op tactisch niveau kan men dat bereiken door de verschillende spoorweggebruikers die van het netwerk gebruik maken, beter op elkaar af te stemmen. Op operationeel niveau ligt de grootste optimalisatie binnen het spoorvervoer in de laadplanningen (Ambrosino & Siri, 2015). Een laadplan geeft een overzicht weer van welke containers op een wagon geplaatst moeten worden. Deze beslissing hangt af van de bestemming van de container, het type, het gewicht, maar ook van de specifieke karakteristieken van elke trein en wagon (Steenken, 2004). Het laadplan wordt opgesteld door een logistieke dienstverlener en uitgevoerd door de terminaloperatoren. Binnen het spoorvervoer kunnen we een logistieke dienstverlener beschrijven als een organisatie die een trein inlegt voor een bepaald traject, zijnde nationaal of internationaal. Aangezien het vrachtvervoer per spoor steeds meer en meer geliberaliseerd wordt en er bovendien ook nog passagierstreinen op het net aanwezig zijn, moet elke LSP ruim op voorhand een rijpad huren bij de verantwoordelijke infrastructuurbeheerder van dat land. Zo staat Infrabel in voor de toekenning en het onderhoud van de spoorwegen in België.

Punt 1.1 'Praktijkrelevantie' haalt aan dat het spoorvervoer bepaalde voordelen heeft en belangrijk is om een modal shift te bewerkstelligen. In de context van deze modal shift ligt de klemtoon in de masterproef op één operationeel planningsprobleem binnen het intermodaal spoorvervoer, zijnde de toewijzing van containers aan de beschikbare wagons door de logistieke dienstverlener. De laadplanning van treinen bestaat uit het toekennen van containers aan een specifieke locatie op wagons van treinen (Heggen, 2014).

De hoofdoorzaak van het ontbreken van een modal shift blijft de mate van flexibiliteit. Dit is een aspect waar planningsafdelingen kunnen op inspelen. Hier is er al heel wat onderzoek naar verricht. Er bestaan verschillende beladingsmodellen met elk hun eigen doel waarvan in punt 2.1.2 'Soorten TLP-modellen' een beknopt overzicht terug te vinden is. Bij het éne train load planning (TLP) model is het hoofddoel om een wagon zo optimaal mogelijk vol te stuwen, terwijl het andere dan weer een zo klein mogelijke handling time beoogt. Studies van onder andere Corry & Kozan (2005), Bruns (2013) en Heggen (2017) veronderstellen steevast enkele onzekere parameters waarbij ze - een in werkelijkheid - onzekere factor beschouwen als een zekerheid. Ter illustratie: bij het inplannen van een hoeveelheid lading wordt bij het model van Heggen (2017) verondersteld dat die lading over 20 wagons verdeeld moet worden. Men probeert dus telkens de laadeenheden van vandaag optimaal (lees: zo vol mogelijk) over de 20 wagons in te plannen, zonder rekening te houden met de zendingen van morgen. Hierbij neemt men bovendien aan dat de hoeveelheid lading ruim op voorhand gekend is. In de praktijk kan die hoeveelheid echter in laatste instantie wijzigen en kan er wat 'gespeeld' worden met de manier van inplannen door middel van 'vooruitplannen'.

Bij het vooruitplannen wordt er namelijk gekeken welke zendingen gecombineerd kunnen worden met elkaar teneinde een betere globale planning te bekomen, zijnde het verbeteren van de belading over verschillende treinen heen in plaats van één enkele trein. Ter illustratie: Stel dat zending X op maandag moet vertrekken om dinsdag op zijn bestemming te komen. Zending Y moet pas donderdag op zijn bestemming zien te geraken en kan dus woensdag vertrekken, maar is echter nu al beschikbaar op de terminal en dus klaar voor vertrek. Bij vooruitplannen gaan we kijken of we die zending Y misschien eerder kunnen gaan inplannen door bijvoorbeeld te gaan combineren met de zending X die op maandag vertrekt. Het is ook perfect mogelijk dat het net voordeliger is om zending Y te laten staan tot woensdag. Bij het 'gewone' inplannen kijkt men niet naar wat blijft staan (zending Y) waardoor men dus steeds suboptimale beslissingen neemt, namelijk het optimaal beladen van één bepaalde trein.

De rechtstreekse concurrent van het spoor, namelijk de weg, staat al veel verder omtrent het onderwerp 'vooruitplannen'. 'Transport prognose' komt in hun planningsafdeling meer en meer als een gekend begrip naar boven. Het wordt als de nieuwe manier van plannen beschouwd. "Het is de ontbrekende schakel die planning- en logistieke systemen voor vraag en aanbod met elkaar verbindt, waardoor verladers meer inzicht krijgen in de toekomstige vrachtcapaciteitseisen per route, transportmiddel en temperatuurklasse" (Byrne, 2013). Vele multinationals gebruiken de standaard warehousing- en transport managementsystemen, maar die geven geen inzicht in de toekomstige vraag waardoor vooruitplannen moeilijk is. Het grote voordeel van vooruitplannen bestaat erin dat een vrachtwagen bijvoorbeeld een dag later kan vertrekken wanneer die helemaal volgeladen is, en er op die manier een rit uitgespaard wordt. Bij het spoorvervoer blijkt deze manier van werken in de praktijk niet mogelijk omdat elke trein een vast slot krijgt waarbinnen hij toegang heeft tot een bepaald rijpad. Een trein de éne dag wel en de andere dag niet laten rijden, is in principe dus niet mogelijk. Dankzij algoritmen die gebruik maken van complexe patroonherkenningstechnieken gecombineerd met nieuwe logistieke logica, kan transportprognose mogelijk gemaakt worden (Byrne, 2013). Dit wordt vervolgens afgestemd met productvoorspellingen van de verkoop- en operationele afdelingen (Sales and operations planning). Planners kunnen op hun beurt vervolgens de voorspelde transportcapaciteit per route (vooruit)plannen in de beschikbare vrachtwagens (Byrne, 2013). Als deze manier van plannen ook in het spoorvervoer geïntegreerd kan worden, is de stap naar een modal shift opnieuw iets gemakkelijker, wat de economie en maatschappij enkel maar ten goede zal komen.

De laadplanning van treinen bestaat uit het toekennen van laadeenheden aan een specifieke locatie op de wagons, rekening houdend met onder andere de afmetingen van de laadeenheid, gewichtsbependingen per wagon en/of trein en de dringendheid waarmee deze laadeenheden verzonden moeten worden (Heggen, 2017). In de huidige literatuur omtrent TLP (Train Load Planning) ligt de focus hoofdzakelijk op het plannen van één enkele trein, waarbij niet-verzonden laadeenheden worden doorgeschoven naar een trein die bijvoorbeeld de volgende dag vertrekt.

Het doel van dit onderzoek is om te bekijken of het een meerwaarde biedt om tijdens het plannen vooruit te kijken en reeds rekening te houden met de laadplanning van toekomstige treinen, en op welke manier dit best kan gebeuren. Het idee is dus om vandaag al naar de zendingen van morgen te kijken, om op die manier een trein optimaler te plannen door eventueel zendingen te verschuiven

naar/ van een andere trein. Het algemene doel hiervan is niet per se om de trein van vandaag optimaal in te plannen, maar om - door de verschillende zendingen heen - tot een zo optimaal mogelijke planning te komen. Hierover is er echter nog niet veel onderzoekswerk verricht.

### 1.2.2 Onderzoeksvraag

De centrale onderzoeksvraag luidt als volgt: "Wat is de impact van het vooruitplannen bij laadplanning in het intermodaal spoortransport?". Merk op dat de focus op intermodaal spoortransport wordt gelegd. "Intermodaal transport is de combinatie van minimum twee transportmodi in één enkele transportketen en in één en dezelfde laadeenheid waarbij men het hoofdtransport via spoorvervoer, binnenvaart of zeevaart probeert te houden en het voor- en natransport vaak noodgedwongen via de weg zal uitvoeren (Macharis, Pekin, & Rietveld, 2011)." Omdat bij dit soort vervoer vaak een vrij groot aantal containers per trein geladen kan worden, is de relatieve CO<sub>2</sub>-uitstoot van het spoor ten opzichte van de weg beduidend veel lager. Zoals eerder vermeld is er al veel onderzoekswerk verricht naar optimale laadplanning van treinen, elk met hun eigen specifieke parameters en beperkingen. Nu zal de nadruk liggen op het vooruitplannen.

Om een antwoord te krijgen op deze centrale onderzoeksvraag moeten er eerst enkele deelvragen beantwoord worden.

### 1.2.3 Deelvragen

#### 1.2.3.1 *“Welke train load planning modellen bestaan er in de literatuur?”*

Bij laadplanning van treinen in intermodaal transport gaat men de laadeenheden aan een specifieke locatie op de trein toewijzen. Afhankelijk van het gebruikte model zijn mogelijke doelen een optimale bezetting van de trein, een optimale gewichtsverdeling of het minimaliseren van de setup- en transportkosten in de terminal. Een optimale gewichtsverdeling leidt bovendien ook tot een kleinere belasting van de remmen van een trein waardoor die minder snel verslijten, wat resulteert in een daling van de onderhoudskosten (Heggen, 2014). Door het genereren van een laadplanning aan de hand van een planningsmodel/ planningssoftware in plaats van de traditioneel manuele toewijzing van containers, kunnen terminaloperatoren zich meer focussen op hun kerntaken. Daar de toewijzing van laadeenheden al gebeurd is, kunnen de terminals zich concentreren op het uitvoeren van hun werk met het laadplan als leidraad (Heggen, 2014). Volgens Caris (2008) kunnen de planningsbeslissingen in het intermodaal vrachttransport toegewezen worden aan vier soorten beslissingsmakers. Ten eerste zijn er de 'drayage operators' die instaan voor het plannen van vrachtwagens tussen de terminal en verzenders en/of ontvangers. De 'terminal operators' beheren de overslagoperaties van de éne transportmodi naar de andere (bijvoorbeeld van wegvervoer naar spoor/binnenvaart). 'Netwerkoperatoren' zijn verantwoordelijk voor infrastructuurplanning en organisatie van rail- en/ of bargetransport, de zogenaamde infrastructuurbeheerders waarvan sprake in punt 1.2.1 'Probleemstelling'. Uiteindelijk maken de 'intermodale operatoren', zijnde de logistieke dienstverleners (LSP), gebruik van de intermodale infrastructuur en diensten. Het spreekt voor zich dat het onderzoek rond 'vooruitplannen' vooral betrekking heeft op de intermodale operatoren. Dit speelt zich af op het operationele planniveau (Caris, Macharis, & Janssens, 2008).

Als er meer laadeenheden op eenzelfde trein geplaatst kunnen worden, neemt de kost per laadeenheid af en neemt het competitief voordeel van het (intermodaal) spoorvervoer ten opzichte van de weg toe (Heggen, 2014). Een kanttekening bij treinlaadmodellen is dat vele noodzakelijke parameters (zoals het aantal wagons of het aantal uitgaande containers) niet exact gekend zijn. Een mogelijke oplossing hiervoor is het werken met een robuuste optimalisatie. Dit principe gaat uit van het slechtste scenario, waardoor alle mogelijke scenario's dus worden toegestaan (Bruns, 2013). Hier wordt er verder niet op ingegaan.

### 1.2.3.2 “Hoe zal het vooruitplannen bij train load planning getest worden?”

Bij het vooruitplannen zal er worden gekeken welke zendingen gecombineerd kunnen worden met elkaar teneinde een betere globale planning te bekomen waarbij men dus een optimale bezetting over verschillende treinen beoogt in plaats van over één enkele trein zoals vandaag het geval is. Bijgevolg moet er een planning opgesteld worden voor een bepaalde periode, zijnde over x aantal dagen waarop de goederentrein rijdt. Men spreekt hierbij van een '(multi-)periode planning'. Er kan echter tijdens die periode nieuwe informatie bijkomen waardoor de planning van een bepaalde dag(en) optimaler kan worden opgesteld, steeds rekening houdend met de andere dagen van die periode. Vandaar moeten planners elke dag de vooropgestelde planningen voor die periode herzien. In de literatuur spreekt men van een 'rolling horizon based planning'. Deze thesis maakt gebruik van een nieuw model dat verder bouwt op het TLP-model van Heggen (2017) waarbij nu het aspect 'vooruitplannen' geïntegreerd zal worden. Die combinatie zal tot een model leiden dat het mogelijk maakt om zowel conventioneel te plannen (TLP) als 'vooruit' te plannen. Vandaar wordt het nieuwe model het 'TLVP-model' genoemd, wat staat voor het 'treinlaad(vooruit)planningsmodel'. Het vooruitplannen zal getest worden aan de hand van een simulatie waarbij er verschillende inputdata in het TLVP-model gebracht zullen worden. Belangrijk is echter dat er steeds rekening gehouden wordt met de termijn waarbinnen een bepaald goed geleverd moet worden. Sommige goederen kunnen niet wachten op een latere trein omdat ze dan te laat op hun bestemming komen. Verwijzend naar het onderzoek van Heggen (2017) kunnen enkel de minder- en niet-dringende laadeenheden 'uitgesteld' worden naar een latere goederentrein. Maar ook de termijn van het vooruitplannen zelf is vrij beperkt. Hoe vroeger planners willen in- of vooruitplannen, hoe minder gegevens (aantal en omvang) van de laadeenheden er op voorhand gekend zijn en dus hoe groter de kans dat er met forecastingsmodellen gewerkt zal moeten worden. Dit resulteert in een grotere onzekerheid en een minder nauwkeurige planning. Er zal dus een afweging gemaakt moeten worden.

Er wordt bovendien verondersteld dat de zendingen verschillende afmetingen kunnen hebben. Indien er bijvoorbeeld uitsluitend met de standaard 40 voet container gewerkt zou worden, zou het vooruitplannen weinig zin hebben. In de literatuurstudie van Heggen (2014) wordt de opmerking gemaakt dat het belangrijk is om na te gaan in welke mate de afmetingen van de verschillende ladingen de efficiëntie van het laadplan beïnvloeden. Door een standaardisatie van laadeenheden kan de efficiëntie van een laadplan nog verder verhoogd worden.

### 1.2.3.3 “Wat is het effect van vooruitplannen binnen het TLP-model?”

Eénmaal de simulatie van het TL(V)P-model uitgevoerd werd, zullen in de laatste fase van deze masterproef de bekomen resultaten onderzocht worden om op die manier na te gaan of het vooruitplannen effectief een positief effect met zich meebrengt. Dit zal gebeuren door een vergelijking te maken tussen éénerzijds het laadplan dat het TLP-model gesimuleerd heeft en anderzijds het laadplan dat voortkomt uit het TLVP-model. Hiervoor zullen voor elk model telkens dezelfde inputdata ingebracht worden. De vergelijking van de resultaten onderling zal gebeuren via één 'Key Performance Indicator': het aantal dagen dat de laadeenheden in totaal te laat op hun bestemming aankomen. Het doel is om dit aantal zo klein mogelijk te houden. Wat de invloed van 'het vooruitplannen' hierop zal zijn, vormt de centrale onderzoeksvraag van deze thesis.



### 1.3 Onderzoeksaanpak/methodologie

Het verhaal 'vooruitplannen' bouwt verder op het onderzoek 'A multi-objective approach for intermodal train load planning' van Heggen (2017). Hierin wordt er een bepaald TLP-model met als oplossingsmethode het 'Multi Directional Local Search heuristic' model opgesteld waarbij men voor het inplannen van een bepaalde zending op een wagon rekening houdt met verschillende parameters zoals onder meer de dringendheid van de zending. Bovendien wordt er hier ook gewerkt met - de steeds meer voorkomende - wagons bestaande uit 3 assen. De 'MDLS-heuristiek' biedt verschillende mogelijke TLP-oplossingen aan, rekening houdend met elke opgegeven parameter. Aangezien deze masterproef verder werkt op het model van Heggen (2017) zal er worden gekeken in welke mate de doelfunctie en de 'constraints' (voorwaarden) van het TLP-model ook van belang zijn voor het aspect 'vooruitplannen'. Dit model beoogt vooral een optimale bezetting van één enkele trein, zonder te kijken naar de andere ladingen die verzonden moeten worden in een bepaalde periode. Bij een eerder uitgevoerde studie van Heggen (2014), wordt er wel rekening gehouden met de andere laadeenheden die in dezelfde periode nog op de bestemming moeten aankomen en is er hier dus in zekere mate wel sprake van vooruitplannen. De doelfunctie blijft echter dezelfde, namelijk het maximaliseren van de bezetting van één trein. Dus ook hier worden suboptimale beslissingen genomen waarbij men niet streeft naar het maximaliseren van de belading over de verschillende treinen heen.

Als literatuurstudie omtrent 'vooruitplannen' worden hoofdzakelijk twee papers doorgenomen. Enerzijds ligt de basis van dit onderzoek in het TLP-model van Heggen (2017), waarbij anderzijds elementen uit een - door haar - eerder gemaakte studie (Heggen, Braekers, & Caris, 2014) in rekening gebracht zullen worden. Naast deze twee papers, zal er via allerhande kanalen ook literatuur bestudeerd worden die zich focust op het vooruitplannen 'an sich'. Hiervoor zullen er zoveel mogelijk databases onder de loep worden genomen in de zoektocht naar relevante literatuur. Volgende databases worden geraadpleegd: Google Scholar, Dissertation Abstracts, Sciences Citation Index (via Web of sciences), UHasselt-Universiteitsbibliotheek, ResearchGate, ScienceDirect, EBSCOhost en Springer Link. Zoektermen zoals "train load planning", "periode-planning", "multi-period scheduling" en "rolling horizon based planning" zullen deel uitmaken van de trefwoorden bij deze databases. Vervolgens zullen er ook zoekopdrachten uitgevoerd worden in elektronische tijdschriften die betrekking hebben tot transportthema's die niet in de databases te vinden zijn. Voorbeelden van deze tijdschriften zijn Flows.be, Logistiek.nl en Business Logistics. Per uitzondering kan sporadisch een relevant artikel uit de populaire literatuur (kranten, websites,...) als naslagwerk dienen. Naast deze deskresearch, werd er gedurende mijn 28-daagse stage in het tweede semester bij Lineas Headquarter te Brussel ook aan fieldresearch gedaan. Het was de bedoeling om hierbij tot een beter globaal inzicht te komen met betrekking tot het intermodaal spoorvervoer om zo ook conclusies te kunnen trekken omtrent het vooruitplannen in het algemeen.

Wanneer het vooruitplannen op grond van de literatuurstudie als positief blijkt, zal er in het praktijkgedeelte van deze masterproef onderzocht worden hoe het TLP-model van Heggen (2017) om te vormen tot een model dat rekening houdt met de mogelijkheid van vooruitplannen, teneinde een betere globale optimale belading te bekomen. Eénmaal dit gebeurd is, zal dat nieuwe (TLVP-) model getest worden aan de hand van een analyse en interpretatie van de outputdata van het bestaand optimalisatiemodel.

Kortom, de focus van dit onderzoek ligt eerst op het theoretische gedeelte van het vooruitplannen van laadplanning voor intermodaal spoortransport om dan vervolgens via simulatiesoftware de resultaten in de praktijk te gaan meten.



## 2 Hoofdstuk II: Literatuurstudie

Dit onderzoek bouwt verder op de studie van Heggen 'A multi-objective approach for intermodal train load planning' (2017) waarbij men streeft naar een optimale belading van één bepaalde trein. In dit hoofdstuk zal er begonnen worden met de algemene werking van een treinbeladingsmodel. Vervolgens is er in punt 2.1.2 'Soorten TLP-modellen' een summier overzicht van veelgebruikte treinbeladingsmodellen met bijhorende oplossingsmethode terug te vinden. In het laatste punt van sectie 2.1 wordt ook het specifieke TLP-model van Heggen (2017) aangekaart. Sectie 2.2 van dit hoofdstuk focust zich dan specifiek op het vooruitplannen. Hierbij zal er gekeken worden hoe ver de literatuur staat op dit gebied en in welke mate het vooruitplannen in de praktijk gekend is, al dan niet binnen de context van het spoorvervoer.

### 2.1 TLP-problemen

#### 2.1.1 Planning in het intermodaal spoortransport

Het opstellen van een planning voor treinen is eenvoudiger voor unimodaal transport dan voor intermodaal transport omdat er bij dit laatste steevast meerdere partijen betrokken zijn die van elkaar afhangen (Caris, Janssens, Ramaekers, & Macharis, 2014). Bij intermodaal spoortransport worden laadeenheden minstens twee keer tussen een vrachtwagen (of andere transportmodus) en een trein verladen, zijnde aan de begin-en eindterminal.

Een factor die cruciaal is voor de efficiëntie van het laadplan is het aantal laadpatronen waarmee gewerkt wordt. Het aantal mogelijke laadpatronen van een wagon/ trein hangt af van zowel de containerlengte als de wagonlengte. In het intermodaal transport wordt er gebruik gemaakt van verschillende containertypes volgens lengte, uitgedrukt in voet (= " ' "). Veelvoorkomende types zijn de 20 en 40 voetcontainer. In containertermen drukt men de capaciteit van een schip, een trein of een wagon ook vaak uit in TEU ('twenty feet equivalent unit'). Elk intermodaal vervoermiddel kan slechts een beperkt aantal - afhankelijk van TEU - containers dragen, steeds rekening houdend met de lengte- en gewichtsbependingen van dat vervoermiddel. Een 60'-wagon kan 3 TEU containers vervoeren. Wanneer er met zowel 20 als 40 voetcontainers gewerkt zou worden, hebben planners per wagon vijf mogelijke laadpatronen waaruit ze kunnen kiezen: 1\*20', 2\*20', 3\*20', 1\*40' of 1\*20'+1\*40'. Voor elk laadplan is het aantal toegestane patronen vooraf gedefinieerd waarbij het alle mogelijke combinaties van dezelfde/ verschillende containertypes op één wagon bepaalt (Heggen, 2014). Die verschillende combinaties van patronen, ook wel configuraties genoemd, worden dan samengebracht in een laadplan, waarbij de patronen gestructureerd zijn dankzij 'slots' (Heggen, 2014).

In deze masterproef wordt er gebruik gemaakt van respectievelijk 20', 25', 30', 40' en 45' containers. Hoe hoger de standaardisatie van laadeenheden, hoe hoger de efficiëntie van een laadplan. Als er met slechts één type container gewerkt zou worden die de beschikbare ruimte van elke wagon zo optimaal mogelijk benut, is de trein op basis van bezettingsgraad in principe alreeds optimaal beladen. Om aan de verschillende klantenwensen te voldoen, is dit echter in de praktijk meestal niet haalbaar. Onafhankelijk van het gewicht, zou je ook kunnen stellen dat vooruitplannen in principe geen zin zou mogen hebben indien alle laadeenheden dezelfde lengte hebben. Dit komt verder in deze masterproef nog aan bod. Ook double handling en de gewichtsverdeling op een trein spelen een prominente rol in de efficiëntie van een laadplan (Heggen, 2014). Double handling ontstaat als de container wordt toegewezen aan een slot van een wagon die nog niet vrij is waardoor die container tijdelijk dient worden neergezet naast de trein. Een betere gewichtsverdeling kan leiden tot kostenbesparingen aangezien het beter is om het (grootste) gewicht vooraan de trein te leggen omdat dit resulteert in een kleinere slijtage van de remmen (Heggen, 2014).

Nu de voornaamste factoren voor een efficiënt treinlaadplan beschreven werden, volgt in punt 2.1.2 'Soorten TLP-modellen' een kort overzicht van de verschillende soorten TLP-modellen.

### 2.1.2 Soorten TLP-modellen

In de meeste spoorbedrijven gebeurt de laadplanning manueel. Dit geldt ook voor de Belgische spoorwegmaatschappij Lineas. Hier wordt de planning verdeeld over verschillende periodes. Reeds één jaar op voorhand begint men een eerste maal aan het opstellen van een tactische planning. Vervolgens gaat men na negen maanden de planning herbekijken om op die manier rekening te houden met de wijzigingen die zich de afgelopen maanden voorgedaan hebben. Zo kunnen er bepaalde klanten weggevallen of verworven zijn. In een volgende fase gaat men die planning één week voor het vertrek van de trein opnieuw gaan bekijken om dan uiteindelijk de dag zelf de real-time planning uit te voeren. Dit gebeurt allemaal manueel en is dus zéér arbeidsintensief.

De wetenschappelijke literatuur voorziet echter verschillende modellen die toelaten om dit te automatiseren. Elk model focust op één of meerdere doel(en) en heeft bijkomend ook zijn beperkingen. Een veelvoorkomend objectief is om een maximalisatie van de bezettingsgraad van alle toe te wijzen laadeenheden te realiseren. Verder kan er ook rekening gehouden worden met de dringendheid van elke container en de bestemming ervan. Containers met dezelfde bestemming kunnen dan gegroepeerd worden zodat het lossen vlotter gaat. Zoals eerder in punt 2.1.1 'Planning in het intermodaal spoortransport' aangehaald, kan ook een verdeling van containers volgens gewicht tot een kostenreductie leiden. Bij het optimaal zoeken naar een oplossing van een doelfunctie moeten er steevast ook enkele beperkingen in acht genomen worden. Elke trein, wagon en laadeenheid heeft zijn gewichtsbependingen. Bovendien wordt er vaak gewerkt met verschillende type wagons die elk een verschillende volumecapaciteit hebben. Tot slot moet er ook steeds rekening gehouden worden met de inhoud van de laadeenheden. Zo mogen voedingswaren nooit in éénzelfde laadeenheid gecombineerd worden met giftige stoffen of worden gevaarlijke stoffen niet naast elkaar geplaatst op éénzelfde trein.

In de volgende alinea worden enkele modellen voor de opstelling van een laadplanning van treinen kort beschreven.

#### 2.1.2.1 LPA-model door Feo & Gonzalez-Velarde (1995)

Feo en Gonzalez-Velarde (1995) stellen hun laadplanningsmodel op aan de hand van de 'set-covering'-modelleringsstechniek waarbij een gewogen som methode van het aantal gebruikte wagons en de kost die nodig is om dat aantal wagons in te zetten, gehanteerd wordt. Het doel is hier om alle ladingen aan een minimale kost te behandelen (Heggen, 2014) waarbij men voor elke configuratie kijkt of een trailerpaar al dan niet toegewezen mag worden aan een 'railcar'. Het model wordt via een lineaire relaxatie opgelost. Hierbij werkt men met geheeltallige beperkingen waarbij de eis van geheeltalligheid van de variabelen niet wordt opgenomen. Vandaar dat men spreekt van zogenaamde 'gerelaxeerde' beperkingen (Feo & Gonzalez-Velarde, 1995). Het toegelaten gebied wordt hierdoor groter waardoor het probleem bijgevolg gemakkelijker opgelost kan worden. Dit doen Feo en Gonzalez-Velarde (1995) via een 'branch-and-bound' code waarbij men een minimalisatie beoogt van de gewogen som van het aantal gebruikte wagons en de kost die nodig is om de vertrekkende containers te vervoeren met de kost die nodig is om dat aantal wagons in te zetten. Dit principe is gebaseerd op het feit dat het laden van meer dan één trailer op dezelfde wagon resulteert in een hogere bezettingsgraad van de uitrusting (Heggen, Braekers, & Caris, 2014). Het uiteindelijke doel van dit 'intermodal trailer assignment' probleem is om alle ladingen aan een minimale kost te behandelen. Speciaal aan dit model is de mogelijkheid tot flexibiliteit die via de doelfunctie in het model opgenomen kan worden via een bepaalde coëfficiënt. Wanneer de waarde van elke coëfficiënt van de doelfunctie 1 is, zal het model zo min mogelijk aantal 'railcars' gebruiken. Men kan echter ook een geldwaarde aan de coëfficiënt toekennen. Dat bedrag mag dan ingezet worden om die specifieke wagon te gebruiken. Een derde mogelijkheid bestaat erin om de coëfficiënt gelijk te stellen aan de lengte van de 'railcar' waardoor de 'branch-and-bound' code niet naar de laagst mogelijke kost, maar wel naar de totale minimale treinlengte zoekt (Feo & Gonzalez-Velarde, 1995).

#### 2.1.2.2 Logistics Queuing Network

Powell en Carvalho (1998) formuleren het toewijzingsprobleem als een logistiek wachtrijnetwerk waarbij er wordt nagegaan hoe de verschillende combinaties van trailers en containers toegewezen kunnen worden aan een wagon (Powell & Carvalho, 1998). Binnen dit toewijzingsprobleem onderscheidt men twee soorten dynamische toewijzingsmodellen. Een eerste model wijst ladingen toe aan klantverzoeken (Heggen, 2014). Hiervoor worden de lege laadeenheden voortdurend in opslagplaatsen bewaard. Wanneer de klant erom vraagt, kan de operator de laadeenheid van die specifieke klant per vrachtwagen ophalen en vervolgens per trein vervoeren naar de eindbestemming. Het tweede model wijst wagons toe aan ladingen (Heggen, 2014). Omdat beide modellen telkens nieuwe bijkomende informatie als input voor het model kunnen gebruiken, spreekt men hier van een dynamische benadering (Heggen, 2014). Het selecteren van een laadpatroon gebeurt op heuristische wijze en is dus niet per se optimaal. Aangezien laadeenheden dynamisch worden toegewezen doorheen de tijd waardoor een real-time optimalisatie bekomen wordt, lijkt dit model in eerste instantie erg bruikbaar bij het onderzoek naar de impact van 'vooruitplannen'. Echter, het model van Powell en Carvalho (1998) legt de focus eerder op de strategische allocatie van middelen doorheen het netwerk in plaats van het real-time operationele niveau van laadplanning dat in deze thesis wel centraal staat. Vandaar wordt er hier verder niet op ingegaan.

### 2.1.2.3 LPA-model door Corry & Kozan (2005)

Het 'load planning assignment' (LPA) model werkt met strafpunten die worden verkregen wanneer er op de terminal dubbele goederenbehandeling en beweging van transportmateriaal gebeurt. Dit is vooral nodig wanneer een rechtstreekse overslag van containers niet mogelijk is en de goederen dus voor een bepaalde tijd aan de kant moeten staan. Bij het 'LPA model' van Corry en Kozan (2005) worden die strafpunten geminimaliseerd via een heuristiek. Hiervoor is er echter nood aan een 'trade-off' tussen de beweging van transportmateriaal en de hoeveelheid double handling. Het kan namelijk zijn dat het verhogen van de éne, een verlaging van de andere factor impliceert en vice versa. Telkens er een binnenkomende lading van de trein afgenomen wordt of als een vrachtwagen aankomt aan de terminal, gebeurt er een herziening van het laadplan (Heggen, 2014). Dit 'multi-period model' kan dus als dynamisch beschouwd worden en voldoet in dat opzicht aan de vereisten van het intermodaal transport.

Twee jaar later breidden Corry en Kozan (2007) dit verder uit tot een aangepast en realistischer model op basis van gemengd geheeltallig programmeren. Dit TLP-model streeft naar een minimalisatie van de gewogen som van het vereiste aantal wagons met de tijd die het transportmaterieel nodig heeft om het laadplan uit te voeren (Heggen, 2014). Dit model maakt gebruik van de 'Pareto-dominantieregel'. Deze regel houdt in dat een oplossing X een oplossing X' domineert indien er minstens één doelfunctie van oplossing X beter is dan oplossing X' en geen enkele oplossing van X slechter is/ gedomineerd wordt. Omwille van het grote aantal variabelen stellen Corry & Kozan (2007) enkele heuristische algoritmes voor om het probleem ook in de praktijk oplosbaar te maken, waaronder de 'local search' heuristiek, die verder bouwt op de 'Pareto-dominantieregel' (Ambrosino & Siri, 2015). Het doel hiervan is niet enkel om de optimale oplossing te vinden, maar de volledige set van 'Pareto optimale' oplossingen. Hoewel in de praktijk slechts één oplossing kan worden geïmplementeerd, is het voordeel van de 'Pareto approach' dat de voorkeur van de beslissingsmaker niet op voorhand gekend moet zijn (Tricoire, 2012). Wat de voorkeur ook moge zijn, de oplossing die optimaal is, behoort sowieso tot de 'Pareto optimale' oplossing.

Een nadeel aan het model van Corry en Kozan blijft echter dat het geen rekening houdt met gewichtsbependingen voor zowel wagon als trein, die er in de praktijk altijd zijn.



#### 2.1.2.4 *Modellen van Bruns & Knust (2010)*

Bruns en Knust streven op hun beurt dan weer naar een maximalisatie van de bezettingsgraad van de trein en een minimalisatie van de transport- en opstartkosten voor de verandering van configuratie van wagons (Bruns & Knust, 2010). Bijzonder hier is dat hun model ook rekening houdt met gewichtsbependingen van de wagon, wat niet het geval is bij de voorgaande modellen. Bovendien veronderstellen Feo en Gonzalez-Velarde (1995) in hun model, beschreven in punt 2.1.2.1 'LPA-model door Feo & Gonzalez-Velarde (1995)', dat slechts twee trailers samen op één wagon passen waardoor hun model in de praktijk niet overal toepasbaar is (Bruns & Knust, 2010). Ze focussen enkel op het toewijzen van trailers aan een wagon, terwijl Bruns en Knust ook naar een minimalisatie van de transport- en opstartkosten streven. Het nadeel bij Powell en Carvalho (1998) is dan weer dat de nadruk ligt op het tactische planningsprobleem, zijnde de circulatie van intermodale wagons. Bruns en Knust (2010) hebben specifiek oog voor het operationele planningsgebeuren. Ook in het model van Corry en Kozan (2005) ontbreekt een gewichtsbepending voor zowel wagons als trein. Bovendien maken ze slechts gebruik van één type container, waardoor elke laadeenheid (ongeacht het gewicht) op een container past. Dit is in de praktijk ook weinig realistisch. Bruns en Knust werken in hun model met 24 verschillende laadeenheden en stellen gewichtsbependingen op voor elk wagontype en de volledige trein.

#### 2.1.2.5 *Model van Heggen (2017)*

Het onderzoek van Heggen (2017) kan als innovatief worden beschouwd omdat het de eerste keer is dat er een 'multi-objective' heuristisch gebruikt wordt als oplossing voor het treinbeladingsprobleem. Het TLP-model focust zich op de samenstelling van laadplannen tijdens het planningsproces en dus niet op het gebruik van het materiaal (reach stacker, gantry cranes,...) op een terminal. Bovendien veronderstelt men dat de vraag naar het transport van de laadeenheden hoger is dan de beschikbare ruimte op de trein. Traditionele treinplanningsmodellen, in voorgaande punten alreeds aangehaald, focussen zich voornamelijk op een minimalisering van de handlingkosten op een terminal. Het TLP-model wijkt hier sterk van af.

Ten eerste doelt het model van Heggen (2017) op het maximaliseren van het gebruik van de treinelengte, door zoveel mogelijk containers op een trein te plaatsen. Hoe meer containers er op één trein geladen kunnen worden en dus hoe hoger de bezetting, hoe meer de vaste kosten (huren rijpad, personeel, locomotieven,...) gerecupereerd kunnen worden uit de inkomsten die men haalt uit het transport van die containers. Vervolgens zal dit model ook rekening houden met de mate van dringendheid van elke container. Die kan namelijk sterk verschillen. De heel dringende (=kritische) laadeenheden krijgen via een bepaalde prioriteitsscore voorrang op andere zendingen. Hierdoor zal dit soort zendingen op een trein toegewezen worden zodat men er zeker van is dat die zending op tijd op zijn bestemming aankomt. Tot slot tracht men ook de scores voor het toewijzen van laadeenheden aan een voorkeursbestemming te maximaliseren. Het model van Heggen (2017) heeft namelijk betrekking op treinen die eerst halt houden op een tussenterminal, waar er al een deel containers gelost zullen worden, om vervolgens het traject verder te zetten naar de eindterminal om daar de rest van de lading te lossen. Laadeenheden hebben dus een flexibele bestemming. De keuze voor het lossen van een container op de tussentijdse of de laatste terminal hangt af van de afstand

tussen de terminal waar de container gelost wordt en de eindbestemming van de laadeenheid zelf, meestal de plaats van de geadresseerde (Heggen, 2017). Het doel is om via het toelaten van een 'flexibele bestemming' het aantal kilometers dat via de weg afgelegd moet worden, de 'last mile', zo klein mogelijk te houden. Men zal de containers bijgevolg ook proberen te groeperen volgens bestemming. Deze doelfunctie zal niet in het TLVP-model opgenomen worden.

Verder onderzoek van Heggen (2017) leidde tot de opstelling van een nieuw oplossingsmodel voor het TLP-probleem dat rekening houdt met verschillende doelen, de zogenaamde 'multi-directional local search' (MDLS) heuristiek. Zoals de naam het doet vermoeden kan er met behulp van deze heuristiek rekening gehouden worden met verschillende doelen. Met de MDLS-heuristiek in dit TLP-model beoogt men een maximalisatie van zowel de benutting van de beschikbare treinlengte als de prioriteitsscores voor dringende laadeenheden die toegewezen moeten worden aan de locatie op de trein. Een ander element waarbij het model van Heggen (2017) zich onderscheidt van oudere planningsmodellen is het feit dat, naast het gebruikelijke twee-bogie wagontype, er ook gewerkt wordt met de steeds meer voorkomende drie-bogie wagons. In het dagelijkse leven spreekt men van een twee- en drie-assen wagon. Het onderscheid tussen beide wagontypes wordt in onderstaande figuren 1 en 2 geïllustreerd.

In dit model wordt er dus niet enkel gekeken naar welke container er op de trein geladen moet worden, maar ook op welke specifieke locatie van de trein een container het best wordt vastgepind.



Figuur 1: Voorstelling zij aanzicht twee-bogie wagon met een totale lengte van 60 voet, gevuld door respectievelijk een 20- en een 40-voetcontainer (Container carrier)



Figuur 2: Voorstelling zij aanzicht drie-bogie wagon met een totale lengte van 90 voet, links en rechts beladen door een 20-voetcontainer (HO & OO spoor)

## 2.2 Vooruitplannen

### 2.2.1 Vooruitplannen in het intermodaal spoortransport

In de huidige literatuur ligt de focus, toch zeker binnen het domein van het intermodaal spoortransport, louter op het optimaal inplannen van één bepaalde trein. Complexere modellen zoals deze van Bruns en Knust (2010) en van Heggen (2017) houden ook rekening met enkele extra parameters zoals het minimaliseren van de transportkosten op een terminal of het maximaliseren van de prioriteitsscores. De basis van deze modellen leunt op hetzelfde principe, zijnde de laadeenheden van vandaag optimaal (lees: zo vol mogelijk) inplannen over een gegeven aantal wagons, zonder te gaan kijken naar zendingen van morgen. Bovendien neemt men hierbij aan dat de hoeveelheid lading ruim op voorhand gekend is.

Deze modellen focussen zich, met uitzondering van het model van Powell en Carvalho (1998), op de korte-termijn operationele planning waar onzekerheid een grote factor speelt. De terminaloperatoren beschikken over een boekingssysteem waarbij ze een beeld krijgen over het aantal en soort zendingen die op een bepaalde trein ingepland kunnen worden. Die informatie over de treinwagons en de laadeenheden die op de trein geplaatst dienen te worden, zijn in de praktijk echter vaak onzeker (Heggen, 2014). Gegevens over het exacte aantal wagons van een bepaalde klant, het exacte gewicht, het soort containertype, ... zullen vaak in laatste instantie nog wijzigen. Dit maakt de planning binnen het (intermodaal) spoortransport net zo uitdagend. Enerzijds wil men een flexibele transportmodus worden om de concurrentie met het wegvervoer aan te gaan, anderzijds is men gebonden aan bepaalde inflexibele factoren zoals een rijpad dat vaak één jaar op voorhand door de spoorwegoperator gereserveerd moet worden bij de infrastructuurbeheerder van een bepaald net. Vervolgens moeten er dan - afhankelijk van het gewicht van de totale trein - één of twee locomotieven gereserveerd worden, al dan niet ingehuurd via een externe partij. Men weet op dit moment echter de klantenvraag nog niet, laat staan het gewicht van elke zending om het aantal nodige locomotieven te bepalen. Het operationeel management moet vandaag dus veel beslissingen nemen waarbij nog steeds een grote vorm van onzekerheid meespeelt. Een voorbeeld hierbij is de aankomsttijd van een vrachtwagen, die in de praktijk vaak onzeker is (Heggen, 2014). Zo kan een bepaalde zending de trein niet halen omdat er iets misloopt in de 'first mile', zoals een vrachtwagen die in een file vaststaat.

Deze 'last-minute' wijzigingen in hoeveelheid worden - met uitzondering van het 'set covering probleem' van Feo en Gonzalez-Velarde - in acht genomen bij de besproken modellen uit punt 2.1.2 'Soorten TLP-modellen'. Bovendien zal men bij het toewijzen van containers aan een slot in dynamische laadplanningen niet enkel kijken naar de 'last-minute' hoeveelheidswijzigingen, maar ook naar de zendingen die op een terminal blijven staan. Op die manier zou men dan niet per se tot de optimale belading van één bepaalde trein moeten komen, maar wel tot een betere globale planning. Hierbij is het perfect mogelijk om een bepaalde trein niet volledig optimaal in te plannen en dus bepaalde zendingen op een terminal te laten staan, waardoor andere treinen wel optimaal beladen zijn en de operator op het einde van het verhaal wel een betere globale planning bekommt. Bij het 'gewone' inplannen kijkt men niet naar wat blijft staan waardoor men dus steeds suboptimale beslissingen neemt, namelijk het optimaal beladen van één bepaalde trein.

Het vooruitplannen neemt het basisprincipe van deze dynamische modellen mee: bij het opstellen van een laadplan wordt - afhankelijk van de vooruitplanningstermijn - steeds rekening gehouden met alle containers die op een terminal beschikbaar staan. De informatie van later geplande containers kan echter nog wijzigen, waardoor het TLVP-model nieuwe planningen zal genereren, rekening houdend met deze wijzigingen. Het doel is om op die manier via vooruitplannen een beter antwoord te bieden op de sterk dynamische omgeving die het intermodaal spoortransport wel degelijk kenmerkt. Echter, het model blijft in zekere zin wel statisch voor een bepaalde dag. Voor de finale planning die de dag zelf opgesteld wordt, veronderstelt het TLVP-model namelijk dat alle gegevens statisch zijn. De exacte oplossingsmethode die in dit model gehanteerd wordt, laat - in tegenstelling tot de meeste dynamische modellen - dus geen real-time flexibiliteit toe. Toch kan het TLVP-model in beperkte mate als dynamisch beschouwd worden aangezien er - bij het vooruitplannen - ook alreeds beslissingen genomen kunnen worden voor de volgende dagen en deze wel nog kunnen wijzigen wanneer er nieuwe informatie binnenkomt.

Het optimale laadplan door de operatoren finaal uit te voeren, kan pas berekend worden éénmaal alle gegevens van de te beladen laadeenheden gekend zijn. 'Early-stage' planningshulp kan het algehele treinbeladingsproces verder verbeteren (Heggen, 2017). Zoals in punt 2.1.2 'Soorten TLP-modellen' reeds vermeld, gebeurt de planning bij de Belgische railoperator Lineas in verschillende fases met als startdatum jaar -1. In deze fase zorgt men dat er een trein kan rijden en er dus een locomotief, bestuurder en rijpad gereserveerd is. Ondanks het feit dat een concrete klantenvraag dan nog ontbreekt, moet men hier toch al een trein inplannen. Indien men deze stap in hun 'early-stage' planningsproces niet zou uitvoeren, kan men in een later stadium in de problemen komen. Naarmate er concretere informatie over de zendingen bijkomt, kan men het oorspronkelijke planningsmodel aanpassen. Eén week voor het vertrek van de trein wordt de planning door de KT-planners opnieuw herzien. KT-planners krijgen op die manier een - voor hen - lange termijn inzicht. Vervolgens zullen zij dit plan dan dagelijks herbekijken op basis van nieuwe inkomende informatie, zoals bijvoorbeeld een annulatie van een bepaalde zending. Wanneer de dag van vertrek aangebroken is en dus alle informatie beschikbaar moet zijn, wordt uiteindelijk het optimale laadplan berekend in de real-time planning, waarna de trein beladen kan worden door de operatoren.

In de literatuur spreekt men vooral over een 'rolling horizon approach'. Deze manier van plannen is zeker geen synoniem van vooruitplannen, maar beide begrippen zijn wel geconnecteerd met elkaar. Om het vooruitplannen toe te passen, moet het principe 'rolling horizon' gebruikt worden. Tot op heden bestaan er voor het intermodaal spoortransport weinig tot geen modellen en gebeurt deze planning dus (net als bij Lineas) manueel (Heggen, Braekers, & Caris, 2014). Bijgevolg valt er hieromtrent dus weinig tot geen literatuur te vinden. Corry en Kozan (2007) hebben geprobeerd die 'rolling horizon' te integreren in hun uitgebreidere (en realistischere) TLP-model waarbij verschillende containertypes aan bod kwamen. Via gemengd geheeltalig (MIP) programmeren werd hun model dan berekend. Dit model is wiskundig gezien minder complex dan zijn voorgangers en bovendien is een decompositie van het model mogelijk (Heggen, 2014). Theoretisch gezien zou 'rolling horizon' in hun model dus mogelijk geïntegreerd kunnen worden. Verder onderzoek daaromtrent werd er echter niet verricht.

### 2.2.2 Vooruitplannen in de transportsector

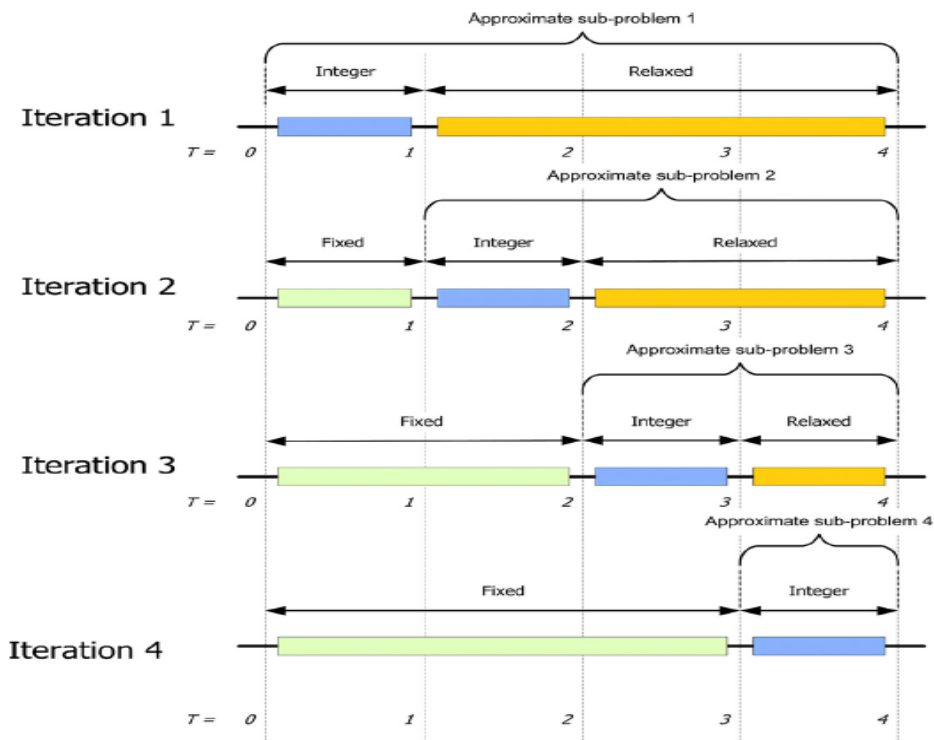
Cordeau, Dell'Amico, Falavigna en Iori (2015) introduceren een 'rolling horizon' algoritme om de levering van verschillende types voertuigen per vrachtwagen in te plannen. Het probleem bestaat erin de leveringen over een 'multiple-day planning horizon' in te plannen waarbij de vraag dag na dag verschillend kan zijn. Bovendien worden er ook gewichtsbependingen aan de formulering toegevoegd. Het doel is om de som van de afgelegde afstanden, de vaste kost voor het gebruik van de vrachtwagen, de handlingkosten van de auto-carrier, de servicekosten voor het bezoeken van de dealers (klanten) en de boetes voor te late leveringen, te minimaliseren. Dit 'multi-objective' probleem wordt op heuristische wijze opgelost volgens de 'local search'-procedure (Cordeau, Dell'Amico, Falavigna, & Iori, 2015), zoals ook bij het LPA-model van Corry & Kozan (punt 2.1.2.3) het geval is. Aangezien bepaalde informatie, zoals de toekomstige vraag, niet op voorhand gekend is bij het opstellen van het initiële transportplan, gaat het hier opnieuw om een dynamisch probleem (Cordeau, Dell'Amico, Falavigna, & Iori, 2015). Nieuwe aanvragen kunnen uiterlijk in de loop van de morgen van vertrek nog ontvangen worden. Daarom nemen Cordeau, Dell'Amico, Falavigna en Iori (2015) het 'rolling horizon' principe in het model mee op. 'Rolling horizon' algoritmes zullen de oplossingen van het 'full space' model benaderen via een set van submodels, die elk een bepaald deel van die volledige planningshorizon in detail zullen nemen en opgelost worden in volgorde van de tijd (Kostina, Guillén-Gosálbeza, Meleb, Bagajewicz, & Jiménez, 2011). Hierbij gebeurt er dus een decompositie van de volledige horizon waardoor het origineel probleem opgesplitst (en dus vereenvoudigd) wordt in een bepaald aantal vaste periodes (vaak per dag) die samen de volledige horizon vormen. Het grote voordeel is dat er aan de hand van dit 'rolling horizon' principe beter ingespeeld kan worden op het dynamische karakter van het probleem, zijnde de voortdurend wijzigende vraag. Nieuwe aanvragen kunnen de dag van de transportrit nog behandeld worden door het algoritme up to date met de laatst verkregen informatie. Het algoritme plant vervolgens zowel de routes als de ladingen van de eerste dag in, maar ook die voor de komende dagen. Enkel de optimale beslissing, zijnde het transportplan, van de eerste dag wordt uitgevoerd (Cordeau, Dell'Amico, Falavigna, & Iori, 2015). De volgende dag gebeurt deze berekening opnieuw indien de set van de te leveren voertuigen gewijzigd is.

Punt 2.2.2 'Vooruitplannen in de transportsector' heeft voornamelijk als doel het principe 'rolling horizon' te verduidelijken. De werking van het algoritme en de logica van het selecteren van de voertuigen is sterk verschillend met de configuratie van de containers in het TLVP-model. Vandaar wordt er voor gekozen om hier verder niet op in te gaan.

Bij dit onderzoek kwam men tot de conclusie dat het 'rolling horizon' algoritme veel effectiever is dan de sequentiële berekening. Ook de kwaliteit van de oplossingen verbeterde. Men was in staat om de gesplitste aanvragen te verminderen, waardoor hetzelfde aantal voertuigen geleverd kon worden met minder bezoeken aan de dealers met een lagere kost en betere service tot gevolg. Over de volledige horizon bekeken, realiseerde men besparingen tot 20.000 kilometer.

### 2.2.3 Vooruitplannen in de economische sector

Omwille van de heel beperkte literatuurstudie rond 'vooruitplannen' in het intermodaal spoortransport' en in de transportsector in het algemeen werd geopteerd de literatuur omtrent dit onderwerp te verruimen naar de volledige economische sector. Kostina et al. (2011) proberen in hun werk om een optimale planning van geïntegreerde suiker -en ethanol supply chains te verkrijgen, toegepast op de Argentijnse suikerrietindustrie. Via een MIP ('Mixed-Integer Programming') geformuleerd probleem probeert men om de ROI (Return on Investment) te maximaliseren. Dit doet men door verschillende MILP's ('Mixed-Integer Linear Programming') via 'branch-and-bound' technieken op te lossen waarbij men telkens de NPV ('Net Present Value') voor verschillende waarden van investeringen in vaste activa maximaliseert. Het gaat hierbij respectievelijk om het aantal productiefaciliteiten (NP), het aantal opslagplaatsen (NS) en het aantal aangekochte transportmodi (NT). Merk op dat dit integere variabelen zijn. De variabelen die het bestaan van een transportlink tussen subregio's weergeven, worden binair opgesteld. Alle andere variabelen zijn continu. Omdat het berekenen van die MILP's over de volledige horizon (= 'full space') vrij veel tijd vergt, wordt er een benaderingsalgoritme opgesteld op basis van de 'rolling horizon' strategie. Kostina et al. (2011) beschouwen de bevindingen van hun onderzoek als een nieuwe decompositie methode gebaseerd op een 'rolling horizon' algoritme die heel dicht bij de optimale oplossingen komt, en toch een veel kleinere berekenings-/ CPU tijd nodig heeft vergeleken met de traditionele MILP's formuleringen.



Figuur 3: Toepassing van de 'rolling horizon' strategie op een vier-tijdperiode probleem (Kostina, Guillén-Gosálbeza, Meleb, Bagajewicz, & Jiménez, 2011)

Figuur 3 illustreert de werking van hun 'rolling horizon' algoritme voor een probleem met vier tijdperiodes, waarbij de tijdshorizon van elk benaderingssubprobleem opgesplitst wordt in twee delen. Het integere deel bedekt de volledige eerste periode van het huidige subprobleem waarbij alle integere beslissingsvariabelen NPpgt, NSsgt and NTIt onveranderd blijven. Het eerste interval schuift mee op van zodra de volgende iteratie aan de beurt komt. Het 'gerelaxeerde' deel bevat alle periodes

die na de huidige iteratie volgen waarbij de integere variabelen de NP, NS en NT vertegenwoordigen. Elke iteratie concentreert zich dus op het bepalen van de waarden van de integere variabelen van één enkele periode, terwijl het 'gerelaxeerde' deel van het probleem bij benadering alreeds het effect van deze beslissingen op latere periodes bepaalt. Men kijkt dus ook hier 'vooruit' naar latere dagen. Elk benaderingsmodel wordt telkens opgelost via een 'branch-and-bound' methode. De oplossingen van deze subproblemen, die dus elk op zijn beurt gerelaxeed werden ten opzichte van het origineel volledige horizon model, worden uiteindelijk gebruikt om de optimale oplossing te benaderen.

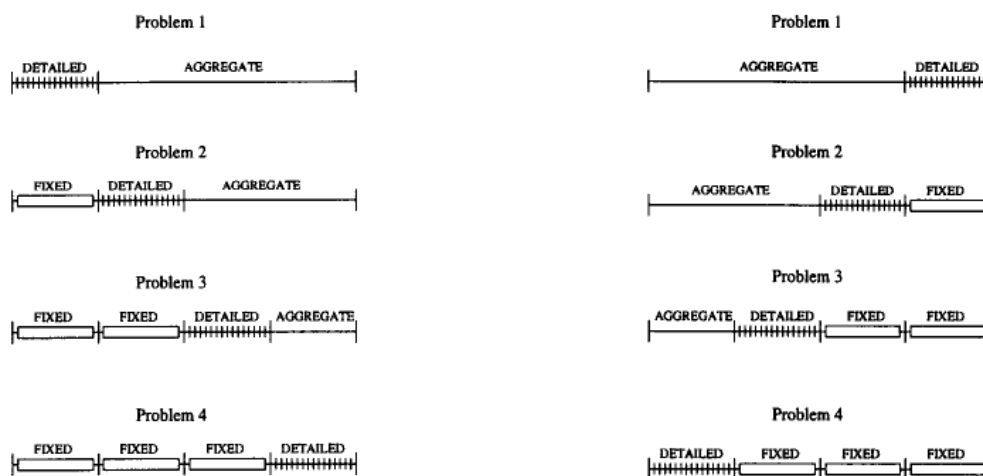
Deze paper focust zich hoofdzakelijk op een oplossing voor strategische supply chain design problemen met specifieke nadruk op toepassingen in de publieke sector. Centraal hierbij staat de zoektocht naar de optimale configuratie van het volledige SC-netwerk. Het (vooruit)plannen van een trein - het centrale thema van mijn thesis - situeert zich echter op het operationele niveau. De werking van het 'rolling horizon' principe dat in het model van Kostina et al. (2011) gehanteerd wordt, reeds uitgelegd aan de hand van figuur 3, loopt echter wel gelijk met de 'rolling horizon' methode van het TLVP-model.

Verder zijn 'rolling horizon' algoritmes ook populair op het gebied van 'inventory routing' waar de leverancier verschillende klanten belevt over een planningshorizon met meerdere perioden waarbij een optimalisatie van de totale voertuigrouteringen en voorraadbeslissingen nagestreefd wordt (Cordeau, Dell'Amico, Falavigna, & Iori, 2015). Bij Bostel, Dejax, Guez en Tricoire (2008) wordt dit principe ook gebruikt voor de routing en planning van technici die klanten bezoeken voor onderhouds-of serviceactiviteiten.

Dimitriadis, Shah en Pantelides (1997) gebruiken hun 'rolling horizon' algoritme dan weer voor de planning van multifunctionele fabrieken waar een ruim gamma aan productsoorten gefabriceerd kan worden. Typisch aan dit soort fabrieken is dat de klantenresponsiviteit heel hoog ligt en men snel van de fabricage van het éne product naar het andere kan omschakelen. Door die flexibiliteit is de planning van het toewijzen van de verschillende resources aan bepaalde taken over een bepaalde horizon dus heel belangrijk. Zoals elk bedrijf streeft men hierbij naar een minimalisatie van de (materiaal)kosten of dus een maximalisatie van de winst. Bij voorgaand onderzoek naar de planning van multifunctionele fabrieken werd er telkens gebruik gemaakt van tijdsintervalgrenzen, voorgesteld volgens een MILP-probleem met zowel discrete en continue variabelen. De discrete variabelen staan voor het aantal taken dat wordt toegewezen aan een bepaald tijdstip. De totale materiaalkosten worden uitgedrukt in continue variabelen. Deze modellen zijn heel goed voor KT-planning, maar worden te omvangrijk wanneer de tijdshorizon toeneemt. Dimitriadis, Shah en Pantelides (1997) maken gebruik van een probleemformulering op basis van het 'Resource-Task Network' (RTN) proces. Zo'n netwerk is vrij uitgebreid en bovendien neemt de omvang ook hier toe volgens de lengte van de beschouwde horizon (Dimitriadis, Shah, & Pantelides, 1997). Vandaar werd geopteerd om hier het 'rolling horizon' principe toe te passen. Het planningsprobleem wordt hierbij opgesplitst in 'geaggregeerde tijdsperiodes' (ATP) waarbij elke ATP bestaat uit geaggregeerde variabelen die overeenkomen met de gewogen som van de overeenkomstige exacte variabelen (aantal toegewezen taken voor een bepaalde tijdsperiode) over het tijdsinterval van die specifieke ATP. Elke iteratie neemt een bepaald deel van de volledige horizon in detail, terwijl de rest van de horizon op een geaggregeerde manier wordt weergegeven. Hierbij spreekt men respectievelijk van

een 'detailed time block' en een 'aggregate time block', waarbij men - net zoals het model van Kostina et al. (2011) - gebruik maakt van een relaxatie. De meest optimale oplossing die resulteert uit een bepaalde 'detailed time block' wordt telkens opgeslagen en zo doorloopt het algoritme elke ATP.

De meeste modellen maken gebruik van een 'forward rolling horizon' omdat het eerste deel van de planningshorizon in de praktijk belangrijker is. Dit werd immers afgeleid uit gegevens die een kleinere onzekerheid met zich meedragen, omdat ze dichterbij het moment van uitvoering liggen. Dimitriadis, Shah en Pantelides (1997) stellen echter ook een 'backward rolling horizon' voor waarbij het geaggregeerde tijdsblok het gedetailleerde tijdsblok voorgaat in plaats van volgt. Hier wordt er dus geen rekening gehouden met informatie van eerdere perioden uit de volledige planningshorizon. Voor het vooruitplannen lijkt dit aspect minder relevant. Vandaar wordt ervoor gekozen om hier niet verder op in te gaan. In onderstaande afbeelding wordt het verschil tussen de 'forward rolling horizon' (FRH) en 'backward rolling horizon' (BRH) werkwijze schematisch weergegeven.



Figuur 4: Toepassing van de 'rolling horizon' strategie op een vier-tijdsperiode probleem volgens FRH (links) en BRH (rechts) (Dimitriadis, Shah, & Pantelides, 1997)

Beide algoritmes bleken een heel goede schatting te voorzien van de optimale oplossing met een veel kleinere CPU-tijd. Bovendien zijn zowel de FRH als de BRH ook bruikbaar voor middellange en lange termijn planningen, waar traditionele MILP-problemen enkel geschikt zijn voor de toewijzing van beschikbare capaciteit op korte termijn.

Nu het principe en de verschillende toepassingen van 'rolling horizon' in voorgaande punten van sectie 2.2 'Vooruitplannen' uitgebreid beschreven zijn, kan dit vervolgens in een treinlaadplan geïntegreerd worden. In punt 2.2.1 'Vooruitplannen in het intermodaal transport' werd namelijk duidelijk dat het 'rolling horizon' principe gebruikt moet worden om vooruitplannen toe te passen. Om de impact van dat 'vooruitplannen' te onderzoeken wordt het model van Heggen (2017) als vertrekpunt genomen. Dit model wordt - samen met de aanpassingen die nodig zijn om het aspect 'vooruitplannen' te kunnen integreren - uitgebreid beschreven in het volgende hoofdstuk 'Praktijkstudie'.



# 3 Hoofdstuk III: Praktijkstudie

## 3.1 Inleiding tot praktijkstudie

Voorgaand hoofdstuk gaf een uitgebreid overzicht van veelgebruikte TLP-modellen, elk met hun eigen kenmerken. Via het 'rolling horizon' principe werd duidelijk dat planningsproblemen met een grote tijdsperiode ook relatief eenvoudig en met een beperkte berekeningstijd opgelost kunnen worden. Uit sectie 2.2 'Vooruitplannen' bleek dat het 'rolling horizon' principe tot op heden heel weinig toegepast wordt binnen het beladingsprobleem van intermodale goederentreinen. Daarop ligt de focus nu in 'Hoofdstuk III: Praktijkstudie'. In sectie 3.2 wordt het TLP-model van Heggen (2017) geanalyseerd om op die manier te ontdekken welke onderdelen van het model gewijzigd moeten worden om het aspect 'vooruitplannen' te laten integreren in het nieuwe TLVP-model. Sectie 3.3 beschrijft de oplossingsmethode voor het TLVP-model en vergelijkt dit kort met de oplossingsmethode die gebruikt wordt in het model van Heggen (2017). In sectie 3.5 wordt het TLVP-model getest op basis van de containersets en parameters die in sectie 3.4 beschreven worden. De opstelling van de verschillende soorten containersets gebeurt op basis van bestaande data en resultaten van het TLP-model van Heggen (2017) waarbij ditmaal rekening zal gehouden worden met het vooruitplannen. Bij elke simulatie van een bepaalde containerset, wordt in sectie 3.5 ook meteen een vergelijkingsanalyse uitgevoerd tussen de resultaten van beide modellen. Deze resultaten worden gemeten op basis van één KPI ('Key Performance Indicator'), zijnde het totaal aantal dagen dat de laadeenheden niet op tijd op hun voorziene bestemming geraken. Het is de bedoeling om dit zo klein mogelijk te houden. In punt 3.5.5 'Discussie van de resultaten' volgt een algemene bespreking van de resultaten en wordt een antwoord geformuleerd op de centrale onderzoeksvraag van deze thesis: "Wat is de impact van vooruitplannen in het intermodaal spoortransport?". Indien de resultaten met vooruitplannen significant kleiner (lees: beter) zijn dan bij het traditionele TLP-model, dan wordt de impact van 'vooruitplannen' positief bevonden. Sectie 3.6 bespreekt tot slot de beperkingen die aan het TLVP-model vasthangen.

## 3.2 TLVP-model

### 3.2.1 Inleiding tot TLVP-probleem

Waar de focus in de huidige literatuur omtrent de TLP-kwestie hoofdzakelijk op het plannen van één enkele trein ligt, is het doel nu om via vooruitplannen tot een globale optimale planning te komen over verschillende treinen heen. Zoals in punt 2.2.1 'Vooruitplannen in het intermodaal spoortransport' alreeds aan bod kwam, kijken operatoren vandaag niet naar welke containers op een terminal blijven staan. Ze concentreren zich louter op het optimaal beladen van één trein en nemen dus steevast suboptimale beslissingen. Dit houdt concreet in dat er bij het vooruitplannen telkens een planning voor een bepaald aantal dagen (bijvoorbeeld 5 werkdagen) zal worden opgesteld. Ter illustratie: Elke weekdag vertrekt er 's avonds een goederentrein vanuit een terminal. Vrijdagnamiddag worden 5 planningen opgesteld voor elke dag van de volgende week. Maandagmorgen wordt de planning voor de trein die op maandagavond vertrekt, herbekeken op basis van nieuwe informatie. Zo kunnen er in de loop van het afgelopen weekend bepaalde zendingen door de klant geannuleerd worden of kunnen er ook bijkomende containers op de terminal per vrachtwagen aangeleverd worden. In dit model ligt het 'cut-off' moment op de dag van vertrek. Dit is het moment waarop er niet meer kan ingespeeld worden op nieuwe informatie. De terminaloperatoren zullen vervolgens in de loop van maandagnamiddag de opgestelde planning uitvoeren. Na verschillende remproeven en andere nodige controles kan de trein dan 's avonds vertrekken. De planning op zijn beurt herbekijkt vervolgens de opgestelde planning voor de andere dagen van de week. Met die nieuwe bijkomende informatie kan men, indien nodig, deze planningen aanpassen door nieuwe containers op de trein van dinsdag in te plannen en andere geplande zendingen van de dinsdagtrein te verplaatsen naar een latere trein. Bij deze beslissingen staat de prioriteit van de zending telkens centraal. Er moet ten alle tijde vermeden worden dat een zending te laat op zijn voorziene bestemming komt. Op die manier wordt de planning elke dag herbekeken, rekening houdend met de (nieuwe) beschikbare informatie. Het 'gewone' TLP-model kijkt niet naar welke goederen er blijven staan. Zo is de planning van één bepaalde trein wel optimaal, maar die van de volgende trein hoogstwaarschijnlijk niet. Men neemt hier dus steevast suboptimale beslissingen.

Momenteel is er in het TLP-model van Heggen (2017) geen hiërarchie tussen de verschillende doelfuncties terug te vinden. Zowel het maximaliseren van de lengte, de prioriteitsscores als de voorkeursbestemming scores worden alle drie als even belangrijk beschouwd. Bij vooruitplannen zal er echter wel nood zijn aan een bepaalde hiërarchie. Indien de globale benutting van  $x$  aantal treinen groter is als men een bepaalde zending  $Y$  laat staan, moet er eerst gekeken worden naar de prioriteitsklasse waarin die zending zich bevindt. Sommige goederen kunnen namelijk niet wachten op een latere trein omdat ze dan te laat op hun bestemming komen.

Bij het vooruitplannen zal er daarom gefocust worden op één doel. Men wil ten alle koste vermijden dat een bepaalde laadeenheid te laat bij de klant aankomt. In de volgende fase kan er dan rekening gehouden worden met de optimale benutting van de trein. De minimumvoorwaarde voor elke configuratie moet het op tijd beleveren van een bepaalde zending zijn. Dit vereist een zekere hiërarchie in het model om vooruitplannen mogelijk te maken. In onderstaande punten wordt er dieper ingegaan op de formulering van de doelfuncties en de bijhorende beperkingen van het TLP-

model. Eveneens worden hier dan ook de noodzakelijke aanpassingen aangehaald die moeten gebeuren om het vooruitplannen in het model te kunnen opnemen.

### 3.2.2 Formulering TLVP-probleem

De formulering van het specifiek probleem dat in de studie van Heggen (2017) onderzocht wordt, is gebaseerd op de mathematische formulering van Bruns en Knust (2010). Bijzonder is dat hun TLP-model de ééigste is die asbelasting als een continue functie beschouwt. "Dit biedt meer flexibiliteit aan het model aangezien niet alle gewichtsconfiguraties gebruikt moeten worden wat leidt tot kleinere looptijden" (Heggen, 2017). In onderstaande punten volgt er een overzicht van de gebruikte symbolen, beslissingsvariabelen, doelfunctie en de beperkingen (constraints) van het TLP-model van Heggen (2017).

#### 3.2.2.1 Sets, indices en parameters

$I = \{1, \dots, n\}$  = Verzameling van alle laadeenheden met index  $i$

$J = \{1, \dots, m\}$  = Verzameling van wagons met index  $j$

$R = \{1, \dots, r\}$  = Verzameling van wagontypes met index  $r$

$K_r$  = Verzameling van fysieke configuraties voor wagons van type  $r$ , met index  $k$

$K_{\tau_j}$  = Verzameling van fysieke configuraties voor wagon  $j$  met wagontype  $r$

$S_{jk}$  = Verzameling van mogelijke slots van configuratie  $k$  voor wagon  $j$ , met index  $s$

$l_i$  = Lengte van laadeenheid  $i$

$p_i$  = Prioriteit van laadeenheid  $i$

$g_i$  = Gewicht van een laadeenheid  $i$ , inclusief het tarragewicht (hier container) van de laadeenheid

$w_j$  = Tarragewicht van wagon  $j$

$G$  = Maximaal toegelaten gewicht trein, inclusief het tarragewicht van wagon  $w_j$ , voor de wagons die worden gelost op de eindterminal.

$W_j$  = Maximaal toegelaten gewicht voor wagon  $j$

$D_j$  = Bestemming van wagon  $j$

$\tau_j$  = Wagontype van wagon  $j$ , waar  $\tau_j \in R$

$\gamma_{\tau_j}$  = Maximaal toegelaten belasting ('payload') voor een as van wagon  $j$  met wagontype  $\tau_j$

$d_{\tau_j}$  = Afstand tussen twee opeenvolgende assen voor wagontype  $\tau_j$

$e_{\tau_j}^{ks}$  = Afstand tussen het midden van een laadeenheid en de as rechtover slot  $s$  in configuratie  $k$  voor wagontype  $\tau_j$

$z_j = 1$  als wagon  $j$  over twee assen beschikt

$z_j = 0$  als wagon  $j$  over drie assen beschikt

Het model van Heggen (2017) streeft naar een maximalisatie van zowel de gebruikte treinlengte als de prioriteitsscore. Echter, men tracht ook de scores voor het toewijzen van laadeenheden aan een voorkeursbestemming te maximaliseren. Laadeenheden hebben hier een flexibele bestemming. Er wordt gebruik gemaakt van een trein die eerst halt houdt op een tussenterminal waar er al een deel containers gelost zullen worden, om vervolgens het traject verder te zetten naar de eindterminal om daar de rest van de lading te lossen. Omdat de nadruk van deze thesis op het vooruitplannen ligt, werd besloten om deze laatste doelfunctie niet in het vernieuwde model op te nemen.

### 3.2.2.2 Beslissingsvariabelen

$a_j$  = Belasting op as a voor wagon j

$b_j$  = Belasting op as b voor wagon j

$c_j$  = Belasting op as c voor wagon j, gebruiken indien wagon j over drie assen beschikt ( $z_j = 0$ )

$y_{jk} = 1$  als configuratie k gekozen wordt voor wagon j

$y_{jk} = 0$  als configuratie k niet gekozen wordt voor wagon j

$x_{ijks} = 1$  als laadeenheid i toegewezen wordt aan slot s in configuratie k van wagon j

$x_{ijks} = 0$  als laadeenheid i niet toegewezen wordt aan slot s in configuratie k van wagon j, variabele

$x_{ijks}$  is enkel gedefinieerd als laadeenheid i past op slot s van wagon j.

Het TLVP-model neemt exact dezelfde beslissingsvariabelen op als dat van Heggen (2017).

### 3.2.2.3 Doelfunctie

Max  $f = (f_1, f_2, f_3)$

$$f_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in \tau_j} \sum_{s \in S_{jk}} l_i \cdot x_{ijks}$$

$$f_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in \tau_j} \sum_{s \in S_{jk}} p_i \cdot x_{ijks}$$

$$f_3 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in \tau_j} \sum_{s \in S_{jk}} \lambda_{ij} \cdot x_{ijks}$$

Het TLP-model van Heggen (2017) focust zich op de samenstelling van laadplannen tijdens het planningsproces en dus niet op het gebruik van het materiaal (reach stacker, gantry cranes,...) op een terminal. Bovendien veronderstelt men dat de vraag naar het transport van de laadeenheden hoger is dan de beschikbare ruimte op de trein. Traditionele treinplanningsmodellen focussen zich voornamelijk op een minimalisering van de handlingkosten op een terminal. Het TLP-model wijkt hier sterk van af.

Ten eerste doelt het model van Heggen (2017) op het maximaliseren van het gebruik van de treinlengte, door zoveel mogelijk containers op een trein te plaatsen. Hoe meer containers er op één trein geladen kunnen worden en dus hoe hoger de bezetting, hoe meer de vaste kosten (huren rijpad, personeel, locomotieven,...) gerecupereerd kunnen worden uit de inkomsten die men haalt uit het transport van die containers. Dit wordt weergegeven door functie  $f_1$ .

Vervolgens zal dit model ook rekening houden met de mate van dringendheid van elke container. Die kan namelijk sterk verschillen. De heel dringende (=kritische) laadeenheden krijgen via een

bepaalde prioriteitsscore voorrang op andere zendingen. Hierdoor zal dit soort zendingen op een trein worden toegewezen zodat men er zeker van is dat die zending op tijd op zijn bestemming aankomt. Dit wordt voorgesteld door doelfunctie  $f_2$ .

Zoals in punt 2.1.2.5 'Model van Heggen (2017)' beschreven staat, tracht men om via een derde doelfunctie ook de scores voor het toewijzen van laadeenheden aan een voorkeursbestemming te maximaliseren waarbij gebruik gemaakt wordt van treinen die eerst halt houden op een tussenterminal, alvorens het traject verder te zetten naar de eindterminal. In welke terminal een container gelost zal worden, hangt af van de 'last mile', die men zo kort mogelijk wenst te houden. Wagons met dezelfde bestemming (terminal), worden bij elkaar geplaatst om het lossen in de tussenterminal te bespoedigen. Om het doel van vooruitplannen niet uit de weg te gaan, wordt ervoor gekozen om die flexibele bestemming niet in het TLVP-model op te nemen en dus uitsluitend twee functies te gebruiken. Punt 3.2.1 'Inleiding tot TLVP-probleem' vermeldt dat er in het TLP-model van Heggen (2017) geen hiërarchie tussen de verschillende doelfuncties terug te vinden is. Bij vooruitplannen zal het zwaartepunt op de prioriteitsfunctie van het model liggen. Men wil zo veel mogelijk vermijden dat goederen te laat op hun bestemming komen. Daarom wordt hier voorgesteld om met een bepaalde volgorde/ hiërarchie te werken. In een eerste fase probeert het TLVP-algoritme het aantal dagen dat de containers te laat zullen zijn te minimaliseren, alvorens de beschikbare capaciteit te optimaliseren.

Een bijkomend verschil is dat bij het model van Heggen (2017) een beperking werd opgenomen die garandeert dat alle kritische en dus prioritaire zendingen, zeker mee berekend moeten worden bij de eerstvolgende planning (kritische zending). Om dit te verwezenlijken werden deze zendingen uit het model gehaald zodat er op die manier geen keuze was en deze dus automatisch op een trein gepland werden. Eénmaal alle kritische zendingen op een trein geplaatst waren, zoekt de configuratie verder naar niet-gedomineerde oplossingen voor  $f_1$ ,  $f_2$  en  $f_3$ . Bij vooruitplannen wordt het model nu echter over meerdere dagen gerund waardoor er zich op een gegeven moment een situatie zal voordoen waarbij er geen oplossing meer bestaat die alle kritische zendingen op de trein kan meenemen. Indien diezelfde beperking in het TLVP-model opgenomen wordt, betekent dit dat er op een bepaald moment geen oplossing ('infeasible solution') mogelijk zal zijn.

In een eerste doelfunctie wordt het aantal kritische ladingen die niet op de trein gepland worden, en dus te laat op de bestemming zullen aankomen, geminimaliseerd. Door vooruit te plannen wordt op die manier ook het aantal dagen dat de kritische laadeenheden samen - over alle dagen ( $d$ ) heen in de planning - te laat zijn, bijgevolg geminimaliseerd. Het is de bedoeling dat er geen enkele zending te laat is. Stel dat uit de eerste iteratie blijkt dat er geen enkele oplossing mogelijk is waarbij er geen zendingen te laat op hun bestemming aankomen, zal er in een tweede stap meteen overgegaan worden naar het gegeven dat er maximum één te laat is. Indien ook dit niet mogelijk zou zijn, aanvaardt het model dat er twee kritische zendingen niet ingepland worden.

De eerste doelfunctie van het TLVP-model minimaliseert dus enkel het aantal "te laat" dagen. Eénmaal de primaire doelstelling berekend is, kan ook de tweede iteratie gestart worden. In deze iteratie wordt er enerzijds rekening gehouden met de capaciteit en prioriteit, wat overeenkomt met  $f_1$  en  $f_2$  van het TLP-model van Heggen (2017). Echter, in het TLVP-model hebben deze functies betrekking op de zendingen die nog niet "te laat" zijn en die dus nog niet in de primaire doelfunctie

opgenomen werden. Bovendien wordt bij dit model ervoor gekozen om de capaciteits- en prioriteitsfunctie te combineren in één (secundaire) functie. Dit betekent dat er voor de secundaire doelfunctie, rekening houdend met de capaciteit en prioriteit van de zendingen, een 'Pareto-front' opgesteld moet worden met oplossingen waarvan er niet gezegd kan worden dat de ene beter is dan de andere, zogenaamde niet-gedomineerde oplossingen. Als men bij vooruitplannen het probleem over meerdere dagen gaat runnen, moet er uiterlijk op de dag van het vertrek van de trein een uiteindelijke beslissing genomen worden welk punt op het 'Pareto-front' er nu effectief gekozen zal worden. De eenvoudigste methode hiervoor is om een gewicht toe te kennen aan enerzijds de capaciteitsdoelstelling (C) en anderzijds de prioriteitsdoelstelling (P) van het probleem. Het komt er dus op neer dat de gewogen som methode toegepast wordt om een probleem met meerdere doelstellingen te herleiden naar een probleem met één doelstelling. Daarnaast zijn er zendingen die ook wel als prioritair gekwalificeerd kunnen worden en bijvoorbeeld nog één tot twee dagen marge in de planning hebben om op tijd op de bestemming te geraken. In dit geval gaat het om dringende zendingen in plaats van kritische. Een container die één dag marge heeft, kan bij vooruitplannen op zowel de trein van vandaag als die van morgen gepland worden. Dit is geen kritische zending, maar is wel meer prioritair dan een zending die bijvoorbeeld drie dagen marge heeft. De prioriteitsscore die elke laadeenheid krijgt, gebeurt op basis van het aantal dagen marge dat een container heeft. Hoe kleiner het aantal dagen marge, hoe groter de prioriteit(score). Dit principe wordt in de secundaire doelfunctie (1) opgenomen waarbij een maximalisatie beoogd wordt van enerzijds de 'bezette' capaciteit en anderzijds de prioriteitsscores. Dit leidt tot onderstaande functie.

$$(1) f = \alpha \times C + (1-\alpha) \times P$$

De zendingen die vandaag effectief moeten vertrekken en dus een marge '0' of kleiner hebben, zijn in de primaire doelfunctie geformuleerd. Deze zendingen krijgen geen prioriteitsscore omdat ze gewoonweg mee moeten. Met deze redenering wordt er prioriteit gegeven aan de containers die al te laat zijn of te laat zouden zijn indien ze vandaag niet met de trein vertrekken. In een tweede fase spelen zowel de capaciteitsfunctie als de prioriteitsfunctie - verschillend van de kritische zendingen die alreeds in de primaire doelfunctie opgenomen werden - mee. De optimale waarde van  $\alpha$  en  $1-\alpha$  zal bij de simulatie van sectie 3.5 getest worden. Een  $\alpha$  0 betekent dat er geen belang wordt gehecht aan de capaciteitsbezetting van een wagon, terwijl een waarde 0 bij  $1-\alpha$  de overblijvende ruimte van een trein(en) zo minimaal mogelijk probeert te houden, zonder de dringendheid van de zendingen in acht te nemen. Vervolgens zullen ook de best mogelijke 'settings' van de prioriteitsscores geanalyseerd worden. Zo wordt er onder meer gekeken naar de verhouding van een container met één dag marge ten opzichte van een container die twee dagen marge heeft. Zowel de capaciteits- als prioriteitsfunctie hebben een verschillende eenheid waarop hun 'optimaal' berekend wordt, respectievelijk het totaal aantal beschikbare voet en het totaal aantal prioriteitsscores. Om de verhoudingen ten opzichte van elkaar te doen kloppen, werden beide parameters genormaliseerd op een schaal van 0 tot 1.

Echter, bij deze tweede doelstelling moet er in de formulering een onderscheid gemaakt worden tussen de traditionele planning en een planning waarbij er vooruit gekeken wordt. Hiervoor behoudt bovenvermelde functie (1) zijn vorm, met dat verschil dat hierbij de som van de capaciteit en prioriteitsscores voor elke trein/ dag die gepland wordt, is opgeteld. Bovendien wordt aan deze formulering nog een extra parameter, een bèta, toegevoegd zodat er minder gewicht kan toegekend worden aan latere dagen. Hoe verder vooruitgekeken wordt, hoe minder zekerheid er is over de beschikbare containers voor die dagen. Als er gekozen wordt om één dag vooruit te plannen, zal er een planning opgesteld worden voor dag 1 en dag 2. Echter, de planning van dag 2 kent een kleinere zekerheid dan de beschikbare containers die op dag 1 ingepland zijn. In de praktijk kunnen er zich namelijk nog wijzigingen in de vraag voordoen, waardoor het geplande laadplan voor dag 2 niet meer optimaal is en dus gewijzigd moet worden. Dankzij die bèta kan er een kleiner gewicht gegeven worden aan latere dagen. Deze formulering wordt in (2) weergegeven.

$$(2) \sum_{d \in D} (f_d * \beta^d)$$

Door een onderscheid te maken in de secundaire doelstelling bij het wel en niet vooruitplannen, zou het tijdens de simulatie snel duidelijk moeten worden wanneer en voor welke waardes het vooruitplannen effectief een meerwaarde biedt. Dit optimalisatiemodel lijkt vrij complex, maar zit logisch in elkaar. Het enige complexe is dat er met drie doelstellingen gewerkt wordt waarvan één, het minimaliseren van het aantal 'te laat' containers, hiërarchisch is opgesteld en de andere twee, capaciteitsbezetting en prioriteitsfunctie, gewogen worden. Bij het vooruitplannen is er dan nog de mogelijkheid om een gewicht volgens het aantal dagen toe te voegen. Dit is de grootste wijziging ten opzichte van het TLP-model van Heggen (2017).

#### 3.2.2.4 Beperkingen

$$(4) \sum_{j \in J} \sum_{k \in \kappa_j} \sum_{s \in S_{jk}} x_{ijks} \leq 1 \quad \text{met } \forall i \in I$$

$$(5) \sum_{i \in I} x_{ijks} \leq 1 \quad \text{met } \forall j \in J, k \in \kappa_j \text{ en } s \in S_{jk}$$

$$(6) \sum_{k \in \kappa_j} y_{jk} = 1 \quad \text{met } \forall j \in J$$

Elke laadeenheid kan worden toegewezen aan maximaal één slot (4), en één slot kan slechts één laadeenheid dragen (5). Vaak kunnen containers gegroepeerd worden op één wagon. Net dit kan het aspect vooruitplannen interessant maken. Dit wordt later behandeld in sectie 3.5 'Resultaten'. Aangezien het TLP-model van Heggen (2017) één trein - en dus elke wagon - zo optimaal mogelijk



probeert te beladen, wordt één configuratie per wagon gekozen, vandaar dat (6) gelijk is aan 1. Ook bij het vooruitplannen zal er op dezelfde manier gewerkt worden. Het verschil is hier echter dat die configuratie - voor die specifieke trein - niet altijd optimaal zal zijn.

$$(7) \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in \kappa_{\tau_j}} \sum_{s \in S_{jk}} g_i \cdot x_{ijks} + \sum_{j \in J} w_j \leq G$$

$$(8) \sum_{i \in I} \sum_{k \in \kappa_{\tau_j}} \sum_{s \in S_{jk}} g_i \cdot x_{ijks} \leq W_j \quad \text{met } \forall j \in J$$

Vervolgens kent elke trein ook bepaalde gewichtsbeperkingen. Zo is niet enkel het totale gewicht van een trein beperkt (7), maar heeft elke wagon ook een maximaal toegelaten massa (=M.T.M.) (8). Heggen (2017) werkt met een gewichtsbeperking op het rijpad tussen de tussen- en eindterminal waardoor het toegelaten gewicht van de trein die rijdt van vertrekterminal naar tussenterminal groter is dan dezelfde trein die zijn traject verder zet, na het lossen van de wagons op die tussenterminal, richting eindterminal. Aangezien die doelfunctie niet in het TLVP-model werd geïntegreerd, wordt die extra beperking vanzelfsprekend niet opgenomen. Elke trein heeft hier slechts één bestemming.

$$(9) a_j \leq \gamma \tau_j \quad \text{met } \forall j \in J$$

$$(10) b_j \leq \gamma \tau_j \quad \text{met } \forall j \in J$$

$$(11) c_j \leq \gamma \tau \quad \text{met } \forall j \in J$$

$$(12) a_j = \frac{w_j}{2} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in \kappa_{\tau_j}} \sum_{s \in S_{jk}} g_i \cdot \frac{d_{\tau_j} - e_{\tau_j}^{ks}}{d_{\tau_j}} \cdot x_{ijks} \quad \text{met } \forall j \in J, z_j = 1$$

$$(13) b_j = \frac{w_j}{2} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in \kappa_{\tau_j}} \sum_{s \in S_{jk}} g_i \cdot \frac{e_{\tau_j}^{ks}}{d_{\tau_j}} \cdot x_{ijks} \quad \text{met } \forall j \in J, z_j = 1$$

$$(14) a_j = \frac{w_j}{4} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in \kappa_{\tau_j}} \sum_{s=1}^2 g_i \cdot \frac{d_{\tau_j} - e_{\tau_j}^{ks}}{d_{\tau_j}} \cdot x_{ijks} \quad \text{met } \forall j \in J, z_j = 0$$

$$(15) b_j = \frac{w_j}{2} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in \kappa_{\tau_j}} \sum_{s=1}^2 g_i \cdot \frac{e_{\tau_j}^{ks}}{d_{\tau_j}} \cdot x_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in \kappa_{\tau_j}} \sum_{s=3}^4 g_i \cdot \frac{d_{\tau_j} - e_{\tau_j}^{ks}}{d_{\tau_j}} \cdot x_{ijks} \quad \text{met } \forall j \in J, z_j = 0$$

$$(16) c_j = \frac{w_j}{4} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in \kappa_{\tau_j}} \sum_{s=3}^4 g_i \cdot \frac{e_{\tau_j}^{ks}}{d_{\tau_j}} \cdot x_{ijks} \quad \text{met } \forall j \in J, z_j = 0$$

Bij een twee-bogie wagon (60 voet lang) wordt de asbelasting gelimiteerd door beperkingen (9) & (10), bij een drie-bogie wagon van 90 voet door beperkingen (9), (10) & (11). Bijgevolg gebeurt de berekening van de toegelaten asbelasting voor beide soorten ook op een verschillende wijze. Bij de twee-bogie wagons, geeft (12) de berekening van de voorste as weer en (13) die van de laatste as. Beide assen hebben dezelfde belasting. De toegelaten belasting voor elke as van een drie-bogie wagon wordt in volgorde weergegeven door respectievelijk (14), (15) & (16). De drie-bogie wagons kunnen maximaal vier laadeenheden dragen, twee langs elke kant van de middelste as. De middelste as kan niet beladen worden waardoor bijvoorbeeld een 3\*30 voetcontainer niet mogelijk is. Het voordeel bij de drie-bogie wagon is dat het toegelaten nettogewicht van de lading hoger mag zijn dan bij de klassieke twee-bogie wagon omdat de belasting van de lading meer verdeeld is. De belasting van het tarragewicht (gewicht van de wagon zelf) ligt met dit model voor 50% op de middelste as, en voor 25% op de voorste en achterste as (Heggen, 2017). Bij de twee-bogie wagons kunnen er maximum drie laadeenheden geladen worden, zijnde drie containers van elk 20 voet. Voor deze twee slots worden index  $s=1$  en  $s=3$  gebruikt.  $S_{jk}$  is hier namelijk de verzameling van alle mogelijke sloten van configuratie  $k$  voor wagon  $j$ , met dus als index  $s$ .

$$(17) a_j - 3 * b_j \leq 0 \quad \text{met } \forall j \in J$$

$$(18) b_j - 3 * a_j \leq 0 \quad \text{met } \forall j \in J$$

$$(19) b_j - 3 * c_j \leq 0 \quad \text{met } \forall j \in J$$

$$(20) c_j - 3 * b_j \leq 0 \quad \text{met } \forall j \in J$$

Om stabiliteitsredenen moet de lading van een wagon bovendien in evenwicht zijn. Ook hier dient het nodige onderscheid gemaakt te worden tussen de twee- en drie-bogie wagons. Om te vermijden dat er één as van een wagon te veel gewicht moet dragen ten opzichte van de andere assen en overbelast wordt, wordt er een extra beperking aan het model toegevoegd. Deze zijn respectievelijk (17) & (18) voor een twee-bogie wagon en (17), (18), (19) & (20) voor een drie-bogie wagon. Dit zorgt ervoor dat één as maximaal drie keer zo veel gewicht mag dragen als het gewicht van de as ervoor en omgekeerd.

$$(21) \sum_{j \in J} \sum_{k \in \kappa_{\tau_j}} \sum_{s \in S_{jk}} x_{ijks} = 1 \quad \text{met } \forall i \in I, p_i = 2$$

Naast een opsplitsing volgens lengte en bestemming van de laadeenheid, worden de containers in het TLP-model van Heggen (2017) ook opgesplitst volgens prioriteit. Ten eerste zijn er kritische goederen ( $p_i = 2$ ) die aan een locatie op een trein moeten worden toegewezen zodat ze met zekerheid, bij normale omstandigheden, op tijd op hun bestemming aankomen. De dringende

laadeenheden ( $p_i = 1$ ) hebben één dag marge om gepland te worden, zonder te laat op hun bestemming te komen. Alle andere goederen behoren tot de laatste categorie ( $p_i = 0$ ) die niet dringend zijn. Om te voorkomen dat een kritische zending op de eerstvolgende trein ontbreekt, wordt beperking (21) aan het model toegevoegd. Bijgevolg hoeft enkel de toewijzing van de dringende zendingen ( $p_i = 1$ ) in de doelfunctie gemaximaliseerd te worden. In het TLVP-model is dit licht anders aangezien in bepaalde situaties zelfs de kritische zendingen niet steeds op tijd op hun bestemming zullen geraken. Vandaar dat er voor de kritische zendingen in dit model geen extra beperking gecreëerd moet worden, omdat dit alreeds in beperking (4) opgenomen werd. Het feit dat deze laadeenheden absolute voorrang krijgen op andere, wordt bekomen via de primaire doelfunctie. Ook het onderscheid dringende en niet-dringende zendingen wordt in het TLVP-model wat uitgebreider.

### 3.2.2.5 *Domein constraints*

$$(22) y_{jk} \in \{0,1\} \quad \text{en dus integer met } \forall j \in J, k \in \mathcal{K}_{\tau_j}$$

$$(23) x_{i,jks} \in \{0,1\} \quad \text{en dus integer met } \forall i \in I, j \in J, k \in \mathcal{K}_{\tau_j} \text{ en } s \in S_{jk}$$

Tot slot definiëren beperkingen (22) & (23) het domein van de beslissingsvariabelen.  $Y_{jk}$  is gelijk aan 1 als de configuratie  $k$  gekozen wordt voor wagon  $j$ , indien niet is  $Y_{jk}$  gelijk aan 0.  $x_{i,jks}$  is gelijk aan 1 als laadeenheid  $i$  toegewezen wordt aan slot  $s$  in configuratie  $k$  van wagon  $j$  en gelijk aan 0 indien dit niet het geval is.

### 3.3 Gehanteerde oplossingsmethode

#### 3.3.1 Oplossen TLP-probleem Heggen

Punt 2.1.2.5 'Model van Heggen (2017)' gaf reeds aan dat er bij het TLP-model van Heggen (2017) gebruik gemaakt wordt van een innovatieve 'multi-directional local search' (MDLS) heuristiek. In tegenstelling tot veel andere 'multi-objective' methoden zal deze heuristiek enkel de niet-gedomineerde oplossingen bijhouden in een tijdelijke set (archief). Het archief van niet-gedomineerde oplossingen wordt telkens geüpdatet wanneer er een betere (en dus niet-gedomineerde) oplossing voor elke 'local search' gevonden wordt. De - ondertussen - gedomineerde oplossingen verdwijnen uit het archief waardoor deze niet overvol komt te staan. Bij een relatief eenvoudige probleemstructuur waarbij de verschillende doelstellingen niet te veel van elkaar variëren, verlopen de updates van het archief telkens vrij vlot. Door het gebruik van een gewogen-som doelfunctie, kan er bovendien rekening gehouden worden met de onderlinge gewichten van elk doel ten opzichte van het resultaat. Complexe 'multi-objective' problemen hebben echter als nadeel dat er vaak een groot aantal niet-gedomineerde oplossingen bestaan waardoor het archief te uitgebreid wordt en de berekeningstijd bijgevolg sterk oploopt.

Heuristieken in het algemeen hebben de specifieke eigenschap dat ze geen exacte oplossingsmethode zijn: ze leiden hoogstwaarschijnlijk tot de optimale oplossing, zoniet tot een goede oplossing die zeker in de buurt van het optimum ligt. Het TLVP-model maakt 'slechts' gebruik van twee doelstellingen. Het aantal mogelijke oplossingen blijft dus relatief klein waardoor een exacte oplossingsmethode gehanteerd kan worden, die in een vrije korte CPU-tijd kwalitatieve oplossingen brengt.

### 3.3.2 Oplossen TLVP-probleem

Het TLVP-probleem bestaat uit twee doelfuncties waarbij de primaire doelfunctie - zo min mogelijk aantal laadeenheden die te laat op hun bestemming komen - hiërarchisch is opgesteld en waarbij de secundaire doelfunctie twee parameters kent - prioriteit en capaciteit - die gewogen worden ten opzichte van elkaar. Door deze samenstelling is het aantal beschikbare mogelijkheden relatief beperkt. Bovendien gebruikt het model slechts twee wagentypes, zijnde een twee- en drie-bogie wagon. Door deze - relatief - beperkte mogelijkheden wordt een exacte/ optimale oplossingsmethode gehanteerd.

Vooraleer een planningsprobleem opgelost kan worden, moeten planners weten hoeveel containers er in totaal op de terminal klaar staan om gepland te worden. Verder is er ook nood aan informatie over de lengte, gewicht en dringendheid van elke container. Deze gegevens worden in punt 3.4.1 'Instances' concreet bepaald. Planners kennen in de praktijk de vraag naar transport vaak pas één week op voorhand. In deze beginfase van het onderzoek naar de impact van vooruitplannen in het intermodaal spoortransport, wordt ervoor gekozen om de zogenaamde 'known date' van elke container op dag 0 te plaatsen. Het totaal aantal containers dat over de volledige planningstermijn getransporteerd moet worden, is dus gekend. Dit betekent echter niet dat deze containers op eender welke dag ingepland kunnen worden. Het kan namelijk zijn dat bepaalde laadeenheden onderhevig zijn aan extra douanecontroles. De container mag dan wel klaar staan op de terminal, zolang de douaneautoriteiten de laadeenheid niet vrijgeven, kan deze niet op een trein beladen en dus ook niet gepland worden. De dag waarop een container effectief beschikbaar is, wordt de 'release date' genoemd.

Tot slot verschillen containers ook in 'due date', zijnde de ultieme dag waarop een laadeenheid uiterlijk gepland moet worden om niet te laat op zijn bestemming aan te komen. Onderstaand kader somt de verschillende gegevens op die per container gekend moeten zijn om - door het TLVP-model - gepland te kunnen worden.

<b>Gegevens per container</b>	<b>Betekenis</b>
Known date	De dag waarop de zending gekend is, in dit model altijd 0.
Release date	De eerste dag waarop de laadeenheid beschikbaar is om te plannen.
Due date	De laatste dag waarop de laadeenheid verzonden moet worden.
Lengte	De lengte van de laadeenheid, uitgedrukt in voet (20'-25'-30'-40'-45').
Gewicht	Het gewicht van de laadeenheid, uitgedrukt in kilogram.

Figuur 5: Overzicht van de benodigde gegevens per container voor het TLVP-model met bijhorende betekenis

Voor elk wagentype maakt het model een opsomming van alle mogelijke combinaties van laadeenheden voor beide wagentypes, rekening houdend met de lengte- en gewichtsbeperving van dat type wagon (60' of 90'). Voor elke mogelijkheid (al dan niet combinatie van meerdere containers) wordt een binaire beslissingsvariabele gecreëerd die aangeeft of deze mogelijkheid uiteindelijk gekozen wordt of niet. Om te garanderen dat elke mogelijkheid/ variabele aan de lengtebeperving van de wagon voldoet, krijgt het model alle mogelijke configuraties als input mee. Een 60'-wagon heeft 13 mogelijke configuraties, een 90'-wagon beschikt over 37 mogelijke configuraties. Op die

manier ontstaat een 'lijst' waarbij bijvoorbeeld variabele X1 containernummer 1 van 40' bezit, variabele X2 containernummers 1 en 2 bevat waarbij de tweede laadeenheid een 20'-container is en de combinatie dus net voldoet aan de lengtebeperking van een 60' wagon. Variabele X3 kan dan weer enkel containernummer 2 op zich nemen, wetende dat slechts één derde (20'/60') van de wagon gevuld is. Dit kan wel van pas komen bij de selectie van de configuraties (zie later). Variabele X4 kan op zijn beurt laadeenheidnummers 2, 3 en 4 opnemen zonder de lengtebeperking te overschrijden. Ook wordt voor elke combinatie iedere mogelijke volgorde in een variabele opgenomen. Verdergaand op dit voorbeeld zou variabele X5 dan uit volgorde 2-4-3 kunnen bestaan, variabele X6 volgens ordening 3-4-2, ... Bij de rangschikking wordt er naast de algemene gewichts- en lengtebeperking, ook telkens rekening gehouden met de toegestane asbelasting, weergegeven door beperking (8) tot en met (15) van punt 3.2.2.4 'Beperkingen'. Het kan namelijk zijn dat variabele X4 in volgorde 2-3-4 wel mogelijk is, maar dit - omwille van een te zwaar gewicht op een bepaalde as - niet mogelijk is bij de volgorde van variabelen X5 en/ of X6. De code berekent op die manier alle mogelijke combinaties en volgorde van laadeenheden voor zowel de twee-als drie bogie-wagon.

Wanneer alle laadnummers (al dan niet gecombineerd met andere containers) in beide lijsten zijn opgenomen, kijkt de code vervolgens naar de dag waarvoor er gepland moet worden. De code neemt enkel de variabelen op die aan de voorwaarden voor die planningsdag voldoen. Ter illustratie: wanneer er voor dag 3 gepland moet worden, schrapt de code alle variabelen die niet gepland kunnen worden. Dit zijn enerzijds laadeenheden die alreeds ingepland zijn op dag 0-1-2, en anderzijds laadeenheden die nog niet beschikbaar zijn omdat ze nog niet vrijgegeven werden. Containers met een 'release date' van dag 4 of later, kunnen dus ook niet ingepland worden. Alle andere variabelen worden niet uit de lijst geëlimineerd en zouden dus in principe op de trein van dag 3 ingepland kunnen worden. Net als in de eerste fase wordt hiervoor steeds rekening gehouden met de gegeven inputconfiguraties die betrekking hebben op de lengte, het gewicht en de asbelasting van elk wagontype. Het model genereert op die manier een nieuwe lijst per wagontype van alle variabelen die deze eliminatiefase 'overleefd' hebben, zonder alreeds te kijken naar de primaire en secundaire doelfuncties van dit model. Deze lijst kan - zeker wanneer verschillende types containers in het model worden opgenomen - tot een 100.000-tal configuraties oplopen.

Eénmaal alle opties voor die bepaalde planningsdag gegenereerd zijn, kan in een vierde fase het optimalisatieprobleem opgelost worden. Uit de lijst moeten er 12 en 8 variabelen/ opties geselecteerd worden voor respectievelijk de 60'-wagon en de 90'-wagon. Die selectie wordt gemaakt op basis van de twee doelfuncties. Ten eerste zoekt de code naar een combinatie van variabelen (laadplan per trein) waarbij zo min mogelijk containers te laat zullen aankomen. Hiervoor kijkt de code naar het verschil in aantal dagen tussen de huidige planningsdag en de dag waarop een container uiterlijk gepland moet worden om niet te laat op zijn bestemming aan te komen, de zogenaamde 'due date'. Indien een bepaalde laadeenheid een marge van 0 dagen of kleiner heeft, tracht het model de variabele van die laadeenheid te selecteren. Lukt dit niet, dan betekent het dat die container(s) niet meegenomen kan/ kunnen worden. Indien er meerdere opties zijn waarbij het aantal 'te laat' dagen even groot zijn, kijkt de code vervolgens naar de secundaire doelfunctie. Hierbij houdt deze enerzijds rekening met de capaciteit die de configuratie inneemt ten opzichte van de beschikbare capaciteit van een bepaald wagontype. Hoe hoger de bezettingsgraad, hoe meer de capaciteitsfunctie volstaan

wordt. Anderzijds kijkt de selectiecode ook naar de prioriteiten van de containers, verschillend van marge 0 of kleiner, want die zijn alreeds opgenomen in de primaire doelfunctie. Die prioriteitscore wordt per optie berekend op basis van het aantal dagen marge tussen de 'release date' en 'due date'. Hoe hoger het aantal dagen, hoe hoger de marge en dus hoe kleiner de prioriteit van die optie. Voor elke optie kan worden berekend hoeveel die bijdraagt aan de doelfunctie. Afhankelijk van het gewicht dat er gegeven wordt aan de capaciteitsparameter (via  $\alpha$ ) en het gewicht dat gegeven wordt aan de prioriteitenparameter ( $1-\alpha$ ), selecteert de code 12 configuraties voor de 60' wagon en 8 configuraties voor de 90'-wagon. Beide doelstellingen worden - afhankelijk van gewicht - geoptimaliseerd. Het is als het ware een formuleringsprobleem waarbij de som van de mogelijke variabelen van de twee-bogie wagon kleiner of gelijk moet zijn aan 12 en de som van de variabelen van de drie-bogie wagon kleiner of gelijk moet zijn aan 8. Elke variabele is binair; 1 indien de optie gekozen wordt, 0 indien niet. Elke variabele heeft een bepaalde opbrengst volgens capaciteitsbezetting en prioriteitscores. De som van die variabelen moet via de doelfunctie gemaximaliseerd worden waardoor de meest optimale optie uiteindelijk geselecteerd wordt.

Een bijkomende beperking in de selectie is dat elk laadeenhedennummer slechts één keer mag voorkomen in de gekozen 12 en 8 configuraties zodat in geen enkel geval een container dubbel wordt ingepland. Op die manier wordt één trein optimaal gevuld, rekening houdend met de 'release date' en 'due date' van alle aanwezige containers op de terminal. Dit is het fundamenteel verschil met andere TLP-modellen, in het bijzonder dat van Heggen (2017).

Kortom, in de eerste fase worden alle mogelijke combinaties van containers opgelijst waarbij elke container(combinatie) een variabele krijgt. Elke variabele bestaat dus uit één container of uit een combinatie van meerdere containers, maximum drie voor een 60'-wagon en vier voor een 90'-wagon. Op basis van de planningsdag kunnen er vervolgens een groot aantal variabelen geschrapt worden. Na die eliminatiefase wordt gekeken welke variabelen of combinaties van variabelen er mogelijk zijn door ook hier steeds rekening te houden met de mogelijke configuraties, as- en gewichtsbeperving. Het effectief selecteren van de meest optimale configuraties gebeurt op basis van de capaciteits- en prioriteitenparameters.

Het gebruik van twee wagontypes en de bijhorende inputbeperkingen zorgen ervoor dat het aantal beschikbare opties die geselecteerd kunnen worden relatief beperkt is. Hierdoor wordt een exacte oplossingsmethode gehanteerd en komen er dus geen heuristieken aan te pas. Het model geeft de optimale selectie weer. Algemeen wordt er verondersteld dat het grootste deel van de CPU-tijd eerder bij het genereren van de verschillende opties ligt, dan bij het effectief oplossen (selecteren) van het optimalisatieprobleem. Zeker wanneer er tijdens de simulatie tot 4 dagen vooruitgepland zal worden, loopt de berekeningstijd van dit model sterk op. Hoe verder er vooruitgepland zal worden, hoe meer laadeenheden de code zal meenemen op basis van de 'release date'. Hierdoor worden de lijsten - waaruit er maximaal 20 configuraties (één per wagon) geselecteerd moeten worden - groter. Vandaar de mogelijkheid van het toekennen van een gewicht (via  $\beta$ ) aan latere dagen. Bovendien moeten die selecties in dit voorbeeld voor alle 5 dagen gebeuren waardoor mogelijkheden opnieuw exponentieel toenemen. Veel zal afhangen van de flexibiliteit die aan de verschillende planningsscenario's gegeven zal worden. Als het verschil tussen 'release date' en 'due date' voor elke container slechts twee dagen is, kunnen de containers enkel maar op drie verschillende treinen/

dagen ingepland worden zonder te laat op hun bestemming te komen. Wanneer in een verdere studie rond dit onderwerp die flexibiliteit en het aantal in te plannen containers groter wordt, zal de rekenkracht die in dit TLVP-model gebruikt wordt wellicht niet sterk genoeg zijn. Hiervoor is de overstap naar heuristieken - zoals de MDLS-heuristiek van Heggen (2017) - een weloverwogen optie. In deze thesis wordt er gewerkt met problemen die oplosbaar blijven met de gegeven codering. Volgende sectie gaat hier verder op in.



### 3.4 Opzet experimenten

Deze sectie bespreekt de totstandkoming van de containersets en de verschillende parameters die door het TLVP-model getest kunnen worden. Eerst worden enkele soorten scenario's opgezet. Elk scenario bevat een olijsting van een aantal containers met elk hun specifieke lengte en gewicht. Deze olijsting noemt men in de programmeertaal een 'instance'. Elke 'instance' zal opgesplitst worden in verschillende categorieën, die vervolgens door het model 'gerund' - en dus gepland - kunnen worden. Eénmaal er verschillende realistische 'instances' opgesteld zijn, kan er 'gespeeld' worden met de 'settings' van het model. Het model zal per 'setting'/ parameter de gegeven 'instance(s)' runnen en hiervoor telkens het best mogelijke laadplan berekenen. Op basis van de outputdata die het model genereert, kan dan de best mogelijke 'setting' voor elke 'instance' gevonden worden op basis van het kleinst aantal 'te laat' dagen (primaire doelfunctie). Met diezelfde redenering kan ook gekeken worden (vanaf) wanneer het vooruitplannen een positief effect heeft ten opzichte van het conventioneel plannen.

#### 3.4.1 Instances

Voor elke 'instance' (containerset) wordt in het TLVP-model gebruik gemaakt van een trein met slechts één bestemming, bestaande uit 12 60-voet wagons en 8 90-voet wagons. Dit betekent dat er in totaal maximum 1440 voet per trein beladen kan worden. De volledige trein mag 1 800 000 kilogram wegen. Hierin zit ook het gewicht van lege wagons vervat. Niet enkel het totale gewicht van de trein is beperkt, ook heeft elke wagon een maximaal toegelaten massa (=M.T.M.). Afhankelijk van wagoontype bedraagt die respectievelijk 70 000 en 107 500 kilogram. Er kunnen vijf verschillende containertypes door het model gepland worden, variërende van 20, 25, 30, 40 en 45 voet. Bepaalde containers kunnen gegroepeerd worden op één wagon. Deze combinatie van laadeenheden wordt 'een configuratie' genoemd, wat reeds in punt 3.3.2 'Oplossen TLVP-probleem' aan bod kwam. Een twee-bogie wagon heeft 13 mogelijke configuraties, elke drie-bogie wagon kent 37 mogelijke combinaties. Onderstaand kader (figuur 6) brengt alles in schema.

<b>Twee-bogie wagon</b>	<b>Drie-bogie wagon</b>
60 voet	90 voet
Maximum 3 laadeenheden	Maximum 4 laadeenheden
13 mogelijke configuraties voor elke wagon	37 mogelijke configuraties voor elke wagon
Ongeladen gewicht: 20 000 kg	Ongeladen gewicht: 29 000 kg
M.T.M.: 70 000 kg	M.T.M.: 107500 kg
12 wagons beschikbaar	8 wagons beschikbaar

Figuur 6: Overzicht van gegevens van respectievelijk de twee-bogie wagon en de drie-bogie wagon voor het TLVP-model

De samenstelling van een 'instance' waarbij elke container een eigen gewicht, lengte, 'release date' en 'due date' heeft, kwam er op basis van een downsamplingmethode, toegepast op de inputdata van Heggen (2017). In onderstaande punten van 3.4.1 'Instances' wordt de totstandkoming van de verschillende 'instances' beschreven. Punt 3.4.2 'Parameter settings' gaat vervolgens dieper in op de verschillende gewichten voor de capaciteitsdoelstelling (alfa), het prioriteitsdoel (1-alfa) en het vooruitplannen (aantal dagen vooruitkijken), die getest zullen worden in sectie 3.5 'Resultaten'.

#### 3.4.1.1 *Lengte en gewicht*

Om de lengte en gewicht van iedere container zo realistisch mogelijk op te stellen, worden alle 'instances' van het TLP-model van Heggen (2017) onderzocht. Aangezien er geen 'benchmark instances' beschikbaar zijn, haalde Heggen de containerinformatie van een real-life treintrafiek tussen België en Noord-Italië (spooroperator onbekend). Op die manier kon ze 180 realistische scenario's opzetten. Al deze verschillende 'instances' worden voor dit onderzoek in één bestand opgesomd. Op die manier worden 7057 containers bekomen met elk hun specifieke lengte en gewicht. De grootste 'instance' die door Heggen (2017) opgesteld werd, bestaat uit een 60-tal containers. Hieruit probeerde haar TLP-model twintig configuraties te selecteren teneinde één trein optimaal te beladen. Echter, er zal bij het TLVP-model minstens tot 10 dagen gepland worden, waardoor er zeker meer dan 60 containers - over de 10 treinen heen - ingepland kunnen worden. Bovendien moet de 'instance' bij vooruitplannen op die wijze opgesteld zijn zodat het onmogelijk is dat alle containers over de tien treinen ingepland kunnen worden, net zoals het bij de grootste 'instance' van Heggen (2017), bestaande uit 60 containers, ook onmogelijk was om alle containers op één trein in te plannen. Met diezelfde redenering bevat de grootste 'instance' in het TLVP-model 600 containers, gemiddeld dus 60 per dag. Hiernaast worden nog drie andere 'instances' opgezet van respectievelijk 300, 400 en 500 containers. Uit verder onderzoek zal dan moeten blijken vanaf welke hoeveelheid containers vooruitplannen interessant wordt. Om elke 'instance' zo realistisch mogelijk te maken, moeten dus ook het gewicht en lengte van de containers in lijn liggen met het gewicht en lengte die gebruikt werden voor de 'instances' van Heggen (2017). Daarom werd een analyse uitgevoerd op de data van deze 'instances'. Omdat de nadruk van deze masterproef op de resultaten van de simulatie ligt, en niet zozeer op de totstandkoming van de verschillende containersets, kan de gebruikte downsamplingmethode, toegepast op het werk van Heggen (2017), teruggevonden worden in punt 5 'Appendix'.

De containers verschillen in type (voetlengte) en gewicht. Heggen (2017) werkte met treinen die 5, 10 en 20 wagons konden transporteren die respectievelijk een maximale beladingslengte van 360', 720' en 1440' voet hadden. Dit komt voor de drie gevallen overeen met 72 voet per wagon. In het TLVP-model wordt er enkel gebruik gemaakt van een trein bestaande uit 20 wagons (12 60'-wagons en 8 90'-wagons), die samen dus 1440 voet vormen. Ook dit geeft een gewogen cijfer van 72 voet. Er wordt dus verondersteld dat elke 'gewogen' wagon 72 voet kan laden indien deze optimaal beladen is en er zich dus geen lege ruimtes meer op de trein bevinden. Wanneer alle containertypes voor elke wagon perfect in elkaar passen, kan er in het TLVP-model - over alle 10 dagen waarop telkens één trein zal rijden - dus maximaal 14400 voet ingepland worden. Het maximale toegelaten gewicht komt dan overeen met 18 miljoen kilogram, zijnde een gewichtsbeperving van 1,8 miljoen per trein. Indien de verschillende 'instances' aan deze voorwaarden zouden voldoen, lijkt het nut van vooruitplannen weinig interessant aangezien alle zendingen - over de 10 treinen heen - ingepland kunnen worden. Vandaar wordt ervoor gekozen om de 'instances' in die grootte op te stellen - met uitzondering van de 'instance' bestaande uit 300 en 400 containers - dat het totaal aantal te beladen voet zeker groter is dan 14400 voet. Een voorbeeld van de verdeling in aantal voet per containertype toegepast op de grootste 'instance' (600 containers), is terug te vinden in de laatste kolom van figuur C, weergegeven in punt 5 'Appendix'. Stel dat elke trein in die mate beladen zou kunnen worden

waarbij er geen enkele lege ruimte overschiet, dan nog zou het onmogelijk zijn om alle zendingen in te plannen, net omwille van de beperking in lengte.

Bovendien zal het in de praktijk weinig voorkomen dat een intermodale trein met verschillende containertypes optimaal beladen is. Naast lengte- en gewichtsbependingen, heeft elke container namelijk ook een bepaalde dag waarop die 'beladingsklaar' is en verschillen de containers ook in tijdstip waarop ze uiterlijk op hun bestemming moeten geraken. Deze zogenaamde 'release date' en 'due date' werden reeds beschreven in punt 3.3.2 'Oplossen TLVP-probleem'. Het totaal aantal te plannen containers wordt verondersteld van bij aanvang (dag 0) gekend te zijn. De 'known date' is dus het enige kenmerk dat de laadeenheden gemeenschappelijk hebben.

### 3.4.1.2 *Categorieën per instance*

Naast lengte en gewicht verschillen containers dus ook in 'release date' en 'due date'. Het is op basis van het verschil tussen deze twee data dat er voor elke containerset, bestaande uit respectievelijk 300, 400, 500 en 600 containers, verschillende categorieën opgesteld kunnen worden. Het bepalen van de 'release date' en 'due date' hangt samen met de gekozen planningstermijn. Aangezien in een eerste fase van dit onderzoek naar 'vooruitplannen' telkens een planning voor 10 dagen gemaakt zal worden - wat overeenkomt met 9 dagen vooruitplannen - resulteert dit in een gemiddeld te transporteren aantal containers van respectievelijk 30, 40, 50 en 60 containers per dag. Dit is echter enkel het geval wanneer er geen onderscheid gemaakt wordt tussen de 'release date' en 'due date'. Er is met andere woorden geen flexibiliteit/ marge om containers in te plannen. De dag waarop een container vrijgegeven wordt, komt overeen met de uiterste dag waarop die container gepland moet worden. Indien de container niet aan de trein van die planningsdag toegewezen wordt, zal deze laadeenheid te laat op zijn bestemming aankomen, wat uiteraard vermeden moet worden (primaire doelfunctie). Voor elke containerset met een planningsmarge van 0 dagen worden de 'release dates' en 'due dates' gespreid over alle dagen van de planningshorizon. De eerste containers krijgen een 'release date' van 0, de laatste containers worden uiterlijk op dag 9 vrijgegeven, wat dus in lijn ligt met de planningshorizon van 10 dagen. Deze toewijzing gebeurt telkens evenredig waardoor elke 'release date' (en dus ook 'due date') - afhankelijk van de containerset - 30, 40, 50 of 60 keer zal voorkomen.

In de praktijk staan containers vaak wel al enkele dagen op een terminal klaar om gepland te worden. Vandaar wordt ervoor gekozen om elke 'instance' nu op basis van de 'release date' en 'due date' verder op te splitsen in meerdere categorieën. De containerlengte en het containergewicht blijven voor elke categorie van éénzelfde 'instance' gelijk. De categorieën onderling onderscheiden zich volgens flexibiliteit. Hoe groter het aantal dagen tussen de 'release date' en 'due date', hoe groter het aantal dagen marge een container heeft en dus hoe flexibeler die container ingepland kan worden. Een laadeenheid met vier dagen marge heeft meer mogelijkheden om gepland te worden dan een container met één dag marge. Er worden in eerste instantie voor elke 'instance' vier soorten categorieën opgemaakt op basis van het aantal dagen marge. De eerste categorie begint dus met een marge van 0 dagen, in de laatste categorie krijgt elke container een marge van 4 dagen. Het gemiddeld aantal te plannen containers per dag zal hierdoor wel wijzigen. Bij de 'instance' bestaande uit 600 containers bedraagt het gemiddelde (per dag) aantal vrijgegeven containers bij een planningsmarge van 0 dagen 60 containers, terwijl dit bij een planningsmarge van bijvoorbeeld 3 dagen om 75 containers gaat. Aangezien er voor elke container steeds een planningsmarge van 3 dagen in acht genomen wordt, moeten de laatste containers uiterlijk op dag 6 vrijgegeven worden in plaats van dag 9. De 600 containers moeten dus verdeeld worden over 8 dagen in plaats van 10. Met diezelfde redenering kent het eerste containernummer een 'due date' op dag 2 in plaats van dag 0. De eerste container moet dus uiterlijk op dag 2 ingepland worden, maar kan ook reeds op dag 0 of dag 1 toegewezen worden. Bij een planningsmarge van drie dagen variëren de 'release dates' tussen dag 0 en dag 6, de 'due dates' bevinden zich tussen dag 3 en dag 9. De planningstermijn van 10 dagen blijft op die manier wel steeds behouden. De vier categorieën (planningsmarge variërende tussen 0 en 3 dagen) worden voor de vier 'instances' aangemaakt. De 'due dates' worden telkens evenredig aangepast met de 'release dates' op basis van de categorie.

Hoe groter het aantal dagen marge, hoe meer flexibiliteit de laadeenheden krijgen, hoe groter het aantal verschillende opties en dus hoe groter de CPU-tijd. Het onderlinge verschil in marge in een bepaalde categorie is over alle laadeenheden van die categorie hetzelfde, respectievelijk een marge van nul, één, twee of drie dagen. Gezien de vlotte CPU-tijd van die eerste vier categorieën, wordt het aantal dagen marge tussen laadeenheden wat gevarieerd, zodoende de containersets ook wat realistischer te maken. De vijfde categorie werkt met 50% van het totaal aantal laadeenheden die geen marge hebben, de andere 50% laadeenheden krijgen één dag marge. In de zesde categorie varieert het aantal dagen marge tussen nul, één of twee dagen, elk met een aandeel van 33%. Bij de laatste categorie varieert het verschil tussen 'release date' en 'due date' van nul tot en met drie dagen, wat telkens overeenkomt met een aandeel van 25%. De spreiding van de 'release dates' over alle containers komt overeen met deze van de tweede, derde of vierde categorie, volgens hun dagen marge. Voor de 'instance' bestaande uit 600 containers betekent dit bijvoorbeeld dat wanneer er een planningsmarge van 0, 1 of 2 dagen voorzien wordt, de 'release dates' variëren tussen 0 en 7 dagen, net zoals dit ook bij de derde categorie, waar alle containers een marge van 2 dagen krijgen, het geval is. Elke release date komt in dit voorbeeld - net zoals ook bij de tweede categorie het geval is - 75 keer voor (600 containers gedeeld door 8 'release dates'). Voor alle containers van deze categorie met een 'release date' van dag 0, betekent dit dat er 25 containers zijn die geen planningsmarge hebben ('due date' = 0), 25 containers die een planningsmarge van 1 dag hebben en 25 containers met een 'due date' op dag 2. De 'due dates' worden ook hier telkens evenredig aangepast op basis van de categorie, waarbij het aantal dagen marge per 'release date' min of meer hetzelfde is. In tegenstelling tot de tweede, derde en vierde categorie kunnen de 'due dates' bij de vijfde, zesde en zevende categorie hier wel telkens gespreid worden over alle dagen van de planningshorizon, net omdat ze alle drie ook de mogelijkheid 'geen planningsmarge' opnemen. De uiterlijke dag waarop de containers van de laatste drie categorieën gepland moeten worden, variëren dus tussen dag 0 en 9. Op die manier kunnen 28 containersets - 4 sets met elk 7 categorieën - getest worden waarbij elke 'instance' zowel varieert in het aantal laadeenheden dat gepland moet worden, alsook in tijd tussen 'release' en 'due' dag. Onderstaande figuur 7 geeft een overzicht van de soorten categorieën.

	Aantal dagen marge (= verschil tussen 'release date' en 'due date')
Categorie 1	0 dagen
Categorie 2	1 dag
Categorie 3	2 dagen
Categorie 4	3 dagen
Categorie 5	0 dagen (50%) - 1 dag (50%)
Categorie 6	0 dagen (±33%) - 1 dag (±33%) - 2 dagen (±33%)
Categorie 7	0 dagen (25%) - 1 dag (25%) - 2 dagen (25%) - 3 dagen (25%)

Figuur 7: Overzicht van het aantal dagen marge per categorie voor elke 'instance'

Gemakshalve wordt de 'instance' bestaande uit 300 containers 'instances 300' genoemd. Wanneer er in de simulatie gesproken wordt van categorie 3 van 'instance 300', handelt het zich om de 'instance' die uit 300 laadeenheden bestaat, waarbij elke laadeenheid een planningsmarge van 2 dagen heeft. Diezelfde redenering kan ook doorgetrokken worden naar de overige 'instances' met bijhorende categorieën.

### 3.4.2 Parameter settings

In sectie 3.5 'Resultaten' worden naast het optimale aantal containers met bijhorende categorie ook de best mogelijke 'settings' van vier parameters geanalyseerd. Een eerste parameter bepaalt hoe groot het aantal dagen vooruitplannen is. Ofwel wordt er niet vooruitgepland - zoals bij de traditionele TLP-modellen - ofwel kan er in het TLVP-model tot maximum 4 dagen vooruitgepland worden wat telkens resulteert in een optimale planning voor 5 dagen. Naarmate de code over de volledige planningshorizon van 10 dagen opschuift, wordt elke - reeds opgestelde - dagplanning volgens het 'rolling horizon' principe geüpdatet. Aangezien dit onderzoek focust naar de impact van 'vooruitplannen' ten opzichte van het traditionele plannen, ligt de klemtoon op deze parameter. Het effect van 'vooruitplannen' zal direct waarneembaar zijn via de primaire doelfunctie.

Voor de secundaire doelstelling wordt er met een capaciteits- en prioriteitsdoelstelling gewerkt. Die prioriteitsfunctie wordt in een tweede parameter bepaald. Een container krijgt een prioriteitscore op basis van het aantal dagen marge (=het verschil tussen 'release date' en 'due date') toegekend. Een container met een marge van 0 dagen of kleiner zal geen prioriteitscore toegekend krijgen aangezien die al in de primaire doelfunctie (=het minimaliseren van het aantal 'te laat' dagen) is opgenomen. De categorieën zijn zo opgesteld dat het maximum aantal dagen marge gelijk is aan drie. Een container met één of twee dagen marge is iets dringender dan een container met drie dagen marge en zou in principe dus een iets hogere prioriteitscore kunnen krijgen. Er zijn vier mogelijke opties waarbij de scores tussen het aantal dagen marges onderling verschillen, wat weergegeven wordt in onderstaande figuur 8.

Level	Prioriteitscores		
	<i>1 dag marge</i>	<i>2 dagen marge</i>	<i>3 of meer dagen marge</i>
0	1	0	0
1	2	1	0
2	3	1	0
3	10	1	0

Figuur 8: Overzicht van de opties in prioriteitscores

Het grootste onderscheid bevindt zich tussen level 0 en 1. Bij level 0 krijgen enkel de containers met één dag marge een score, de containers die twee of drie dagen marge hebben, worden als even (niet) dringend beschouwd. Vanaf level 1 wordt dit onderscheid wel gemaakt. Tijdens de simulaties zal onder meer onderzocht worden wat de impact van de verschillende prioriteitsopties zijn.

Hoe hard de prioriteitsdoelstelling doorweegt ten opzichte van de capaciteitsdoelstelling, wordt rechtstreeks bepaald door het gewicht alfa toegekend aan de capaciteitsfunctie. Voor alfa zijn er 11 mogelijke 'settings' die evenredig liggen tussen 0 en 1. Het gewicht van de prioriteitsfunctie is bijgevolg alfa -1, wat alreeds aan bod kwam in punt 3.2.2.3 'Doelfunctie'.

Een laatste parameter maakt het mogelijk om - wanneer er minstens één dag vooruitgepland wordt - een kleiner gewicht te geven aan latere dagen van die vooruitplanningstermijn. Het gewicht dat gegeven kan worden aan latere dagen ( $\beta$ ) kan in dit TLVP-model variëren tussen 0.7, 0.8, 0.9 en 1.

In de simulatie wordt dus niet enkel gekeken of het vooruitplannen iets bijbrengt, maar ook welke waarde voor elke parameter het best gezet kan worden om op die manier ook de verhouding van een container met bijvoorbeeld één dag marge ten opzichte van een container met twee dagen marge, te vergelijken. Ook de verhouding van de verschillende prioriteiten ten opzichte van elkaar kunnen op die manier getest worden. Al deze mogelijkheden zullen in de simulatie getest worden aan de hand van een factorieel experimenteel ontwerp. Bij zo'n ontwerp worden minstens twee onafhankelijke variabelen opgenomen, waarbij elke onafhankelijke variabele een factor wordt genoemd. Aangezien het TLVP-model zich in dit eerste onderzoek baseert op drie onafhankelijke parameters, spreekt men hier van een 'three-way design' (ScienceDirect, sd). Tijdens de simulatie zullen de verschillende factoren met elkaar gekruist worden: ieder level van elke onafhankelijke variabele zal getoetst worden met ieder level van elke andere onafhankelijke variabele. In de literatuur spreekt men van 'crossing the factors' (Eye, 2008). Door elk level van elke factor met elkaar te kruisen, zou op die manier de meest 'optimale' combinatie voor het vooruitplannen gevonden moeten worden.

## 3.5 Resultaten

### 3.5.1 Instance 300 containers

Nu alle 'instances' met bijhorende categorieën opgesteld zijn, wordt er begonnen met een eerste simulatie van de basiscontainerset, bestaande uit 300 containers. Elke categorie van deze set wordt door het model gerund, telkens met een planningshorizon van 10 dagen. Het gewicht van de capaciteitsdoelstelling (alfa) en de prioriteitsdoelstelling (1-alfa) wordt zo zwaar mogelijk geplaatst, wat dus resulteert in een waarde van 0.5 voor beide parameters. Uit de resultaten blijkt dat alle containers voor elke categorie op tijd op hun bestemming kunnen komen. Gevolg hiervan is dat het vooruitplannen voor deze containerset geen direct voordeel biedt, althans niet voor de primaire doelfunctie. Het aantal 'te laat' containers is voor beide planmethodes (TLP en TLVP) gelijk aan nul. Het heeft dus geen nut om verder naar de secundaire doelstelling te kijken. Gezien de primaire doelfunctie alreeds aangaf dat er geen 'te laat' containers zijn bij het gewone TLP-model, zullen andere 'settings' voor de secundaire doelfunctie tot hetzelfde 'primaire' resultaat leiden. De parameters hebben in dit geval dus geen invloed op het aantal 'te laat' dagen. Punt '3.3.2 Oplossen TLVP-probleem' maakt namelijk duidelijk dat de code eerst zal zoeken naar het aantal 'te laat' dagen. Dit wordt in eerste instantie geminimaliseerd. Wanneer dit minimum aantal 'te laat' dagen bij verschillende opties voorkomt, kijkt de code vervolgens naar de secundaire doelfunctie waarbij er dan rekening kan gehouden worden met de capaciteitsgraad en prioriteitsscores. Aangezien dit 'slechts' hulpdoelstellingen zijn om de primaire doelstelling te bereiken, heeft het bij 0 aantal 'te laat' containers geen nut om hiernaar te kijken. Over de hele planningsperiode is er dus maar één primaire doelstelling, zijnde het aantal 'te laat' dagen.

In een eerste simulatiepoging kan er geconcludeerd worden dat vooruitplannen geen zin heeft indien het aantal te plannen containers ten opzichte van de planningshorizon klein is. Voor dit specifieke model met de gegeven container-, wagon- en treinbeperkingen, biedt vooruitplannen bij een gemiddelde van 30 (of minder) te plannen containers per dag geen meerwaarde en lijkt de traditionele TLP-methode eerder aan te raden.



### 3.5.2 Instance 400 containers

Wanneer de simulatie uitgevoerd wordt op de set van 400 containers, blijkt uit de output dat de laatste twee categorieën van deze 'instance' een bepaald aantal 'te laat' dagen zullen hebben. De totale te beladen lengte van deze set bedraagt 13038 voet terwijl de maximaal te beladen lengte over de 10 treinen 14400 voet bedraagt. Echter, bij een variatie van 0-1-2 (ongeveer elk 33%) en 0-1-2-3 (elk 25%) dagen marge, blijkt het aantal mogelijke configuraties die kunnen worden ingepland veel beperkter te zijn waardoor bepaalde containers hun 'due date' niet halen. Categorie 6 zou bij een traditioneel laadplan in bepaalde gevallen (afhankelijk van de ingegeven gewichten voor de capaciteits- en prioriteitsdoelstelling) tot maximaal 14 'te laat' dagen hebben, categorie 7 zou er zelfs 49 hebben. De overige categorieën bekomen in geen enkel geval - volgens de verschillende parameters - 'te laat' containers. Vandaar wordt er voor deze 'instance' gewerkt met categorieën 6 en 7. De eerste vijf categorieën worden in dit onderdeel voorlopig buiten beschouwing gelaten. In de praktijk zal ook een TLP-planner vanzelfsprekend naar de meest optimale combinatie van gewichten zoeken teneinde een zo min mogelijk aantal 'te laat' containers te bekomen. Die optimale combinatie voor beide categorieën kan in onderstaande figuren 9 en 10 teruggevonden worden. De optimale combinaties die beide categorieën gemeenschappelijk hebben, worden vetgedrukt weergegeven.

<b>Categorie 6</b>	'Te laat' dagen	Prior.level	Alfa
0 dagen vooruitplannen (= telkens planning voor één dag optimaal)	9	1 <b>2</b> 3	0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; <b>0.5</b> 0.1; 0.2; 0.3

Figuur 9: Overzicht van de optimale 'settings' bij categorie 6 van 'instance 400' indien er niet vooruitgepland wordt

<b>Categorie 7</b>	'Te laat' dagen	Prior.level	Alfa
0 dagen vooruitplannen (= telkens planning voor één dag optimaal)	33	<b>2</b>	<b>0.5</b>

Figuur 10: Overzicht van de optimale 'settings' bij categorie 7 van 'instance 400' indien er niet vooruitgepland wordt.

Bovenstaande figuren 9 en 10 veronderstellen dat er telkens voor één trein een planning opgesteld moet worden, zonder vooruit te kijken naar zendingen met een grotere planningsmarge. De trein van vandaag moet gewoon zo optimaal mogelijk beladen worden. Op die manier hoeft het model geen rekening te houden met latere 'due dates' van containers en worden er minder opties gegenereerd, wat de CPU-tijd ten goede komt. Om het effect van 'vooruitplannen' positief te bevinden, moet er een oplossing voor de primaire doelfunctie gevonden worden waarbij het aantal 'te laat' dagen voor categorie 6 kleiner is dan 9 en het aantal 'te laat' dagen van categorie 7 kleiner is dan 33. Onderstaande figuren 11 en 12 geven een overzicht van de minimale waarde van de primaire doelfunctie die bereikt kan worden volgens de bijhorende 'setting' bij de vier verschillende 'vooruitplanningstermijnen'. Aangezien het model - afhankelijk van de ingegeven vooruitplanningstermijn - nu wel rekening moet houden met latere 'due dates', varieert de CPU-tijd

van het algoritme voor elk van deze twee categorieën tussen 15 seconden en 4 minuten afhankelijk van de 'setting'.

<b>Categorie 6</b>	'Te laat' dagen	Prior.level	Alfa
1 dag vooruitplannen	7	<b>1</b> <b>2</b> 3	0.1; <b>0.7</b> <b>0.1</b> ; 0.6 0.1; 0.4
2 dagen vooruitplannen	8	<b>0</b> 1 2 3	0.1; <b>0.3</b> ; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8 0.1 tot en met 0.9 0.1; 0.3; 0.4; 0.7; 0.8; 0.9 0.1; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6 0.7; 0.9
3 dagen vooruitplannen	7	<b>0</b> <b>1</b> <b>2</b> <b>3</b>	0.1; <b>0.5</b> ; 0.6; <b>0.7</b> ; 0.9; <b>1</b> <b>0.5; 0.6; 0.8; 0.9; 1</b> <b>0.2</b> ; 0.3; 0.4; <b>0.8; 0.9; 1</b> 0.1; <b>0.3; 0.4</b> ; 0.6; <b>0.7; 0.8</b> ; <b>0.9; 1</b>
4 dagen vooruitplannen	6	<b>0</b>	<b>0.7</b>

Figuur 11: Overzicht van de optimale 'settings' bij categorie 6 van 'instance 400' volgens aantal dagen vooruitplannen

<b>Categorie 7</b>	'Te laat' dagen	Prior.level	Alfa
1 dag vooruitplannen	33	<b>1</b> <b>2</b> 3	0.4; <b>0.7</b> <b>0.1</b> ; 0.4 0.2
2 dagen vooruitplannen	33	<b>0</b>	<b>0.3</b>
3 dagen vooruitplannen	33	<b>0</b> <b>1</b> <b>2</b> <b>3</b>	<b>0.5; 0.7; 1</b> 0.3; <b>0.5; 0.6</b> ; 0.7; <b>0.8; 0.9; 1</b> 0.1; <b>0.2</b> ; 0.7; <b>0.8; 0.9; 1</b> <b>0.3; 0.4</b> ; 0.5; <b>0.7; 0.8; 0.9; 1</b>
4 dagen vooruitplannen	31	<b>0</b> 1 2 3	<b>0.7</b> ; 0.9 0.5; 0.8 0.2; 0.7; 0.8; 0.9 0.4; 0.6; 0.7

Figuur 12: Overzicht van de optimale 'settings' bij categorie 7 van 'instance 400' volgens aantal dagen vooruitplannen

Uit een vergelijkende studie van de resultaten uit figuren 9 en 11, wordt het duidelijk dat vooruitplannen voor categorie 6 sowieso een meerwaarde biedt. In het beste geval kunnen er tot drie 'te laat' dagen vermeden worden wanneer er voor 4 dagen vooruitgepland is. De resultaten uit figuur 12 voor categorie 7 blijken dan weer minder voordelig, althans wanneer er een vooruitplanningstermijn van 1,2 of 3 dagen gehanteerd wordt. Bij het vooruitkijken van 4 dagen, leidt dit opnieuw tot een daling van 2 'te laat' dagen. Voor beide categorieën kan geconcludeerd worden dat een vooruitplanningstermijn van vier dagen, waarbij een gewicht aan de capaciteitsdoelstelling wordt gegeven van 0.7 met enkel een onderscheid in prioriteitscores bij containers met een marge van één dag (level 0), de beste resultaten levert ten opzichte van het traditionele TLP-model. Enkel de optimale waarden per categorie worden in de figuren vermeld. Alle verschillende alfawaardes komen in figuren 9-12 minstens één maal voor, met uitzondering van alfawaarde 0. Het volledige gewicht aan de prioriteitsdoelstelling geven (ongeacht vooruitplannen of niet), zal voor categorieën 6 en 7 van 'instance 400' dus nooit tot het optimale resultaat leiden.

Het vooruitplannen kan in bepaalde gevallen echter ook nadelig zijn voor het primaire resultaat. De eerste vijf categorieën genereren bij beide planningsmethodes telkens 0 'te laat' containers, vandaar de reden waarom enkel categorie 6 en 7 in bovenstaande figuren opgenomen zijn. Echter, wanneer voor 'instance 400' een alfawaarde 0 gehanteerd zou worden, blijkt vooruitplannen vanaf categorie 2 in de meeste gevallen nadelig ten opzichte van het TLP-model. Met andere woorden: enkel wanneer containers geen planningsmarge hebben, maakt het gebruik van alfawaarde 0 bij het (vooruit) plannen niet uit.

0 dagen vooruitplannen					1 dag vooruitplannen				
Alfa 0					Alfa 0				
	Prior0	Prior1	Prior2	Prior3		Prior0	Prior1	Prior2	Prior3
Cat.1	0	0	0	0	Cat.1	0	0	0	0
Cat.2	0	0	0	0	Cat.2	25	0	0	0
Cat.3	42	0	0	0	Cat.3	112	0	0	0
Cat.4	173	27	26	26	Cat.4	249	40	41	38
Cat.5	0	0	0	0	Cat.5	29	0	0	0
Cat.6	32	11	9	11	Cat.6	80	14	17	12
Cat.7	99	42	39	38	Cat.7	155	62	63	54
2 dagen vooruitplannen					3 dagen vooruitplannen				
Alfa 0					Alfa 0				
	Prior0	Prior1	Prior2	Prior3		Prior0	Prior1	Prior2	Prior3
Cat.1	0	0	0	0	Cat.1	0	0	0	0
Cat.2	9	9	9	9	Cat.2	5	5	5	5
Cat.3	39	39	39	39	Cat.3	23	23	23	23
Cat.4	73	73	73	73	Cat.4	32	32	32	32
Cat.5	19	20	20	20	Cat.5	13	13	13	13
Cat.6	57	57	57	57	Cat.6	29	29	29	29
Cat.7	100	99	100	100	Cat.7	67	67	67	67
4 dagen vooruitplannen									
Alfa 0									
	Prior1	Prior2	Prior3	Prior4					
Cat.1	0	0	0	0					
Cat.2	4	4	4	4					
Cat.3	15	15	15	15					
Cat.4	24	24	24	24					
Cat.5	4	4	4	4					
Cat.6	16	16	16	16					
Cat.7	38	38	38	38					

Figuur 13: Overzicht van het aantal 'te laat' dagen bij 'instance 400' volgens aantal dagen vooruitplannen en prioriteitslevel, bij een alfawaarde 0

Voor categorie 2 (1 dag planningsmarge) genereert het TLP-model bij prioriteitslevel 0 geen 'te laat' containers, waar het TLVP-model er - volgens aantal dagen vooruitplannen - respectievelijk 25, 9, 5 en 4 genereert. Wat de overige prioriteitslevels betreft, kan er vastgesteld worden dat het conventioneel plannen en het vooruitplannen van één dag, geen 'te laat' containers met zich meebrengen, terwijl alle andere vooruitplanningstermijnen wel tot een bepaald aantal 'te laat' dagen leiden. Ook bij categorie 5 (0 en 1 dag planningsmarge) is er bij het traditioneel plannen geen enkel aantal 'te laat' containers terug te vinden. Wanneer er wel vooruitgepland wordt, bekomt het TLVP-model bij elke prioriteitslevel een aantal containers die te laat op hun bestemming zullen aankomen, met uitzondering van 1 dag vooruitplannen, dat enkel bij een prioriteitslevel 0 een bepaald aantal (29) 'te laat' dagen genereert. Bij categorie 3 geldt bij ditzelfde prioriteitslevel het omgekeerde. Met uitzondering van 1 dag vooruitplannen is het hier net voordeliger om vooruit te kijken, met een minimale waarde van 15 'te laat' dagen, te bekomen bij een vooruitplanningstermijn van vier dagen. Bij de overige prioriteitslevels van diezelfde categorie, leidt de traditionele planningsmethode en het vooruitplannen van één dag opnieuw tot geen enkele 'te laat' container, terwijl alle andere vooruitplanningstermijnen wel een bepaald aantal containers genereren, wat dus opnieuw overeenkomt met de bevindingen uit categorie 2 en 5. Elke planner zal natuurlijk de parameters op die wijze samenstellen, waarbij er zo min mogelijk aantal 'te laat' containers zijn. Met deze redenering kan er besloten worden dat voor categorieën 1-2-3-5 er ofwel maximaal één dag vooruitgekeken mag worden, ofwel de traditionele planningsmethode behouden moet worden.

Een positief effect van het vooruitplannen bij een alfawaarde 0 voor 'instance 400', wordt voor het eerst waargenomen bij categorie 4, waar elke laadeenheid 3 dagen planningsmarge krijgt. Het TLVP-model genereert voor elke prioriteitslevel 24 aantal 'te laat' dagen, waar de minimum waarde bij het niet-vooruitplannen 26 laadeenheden is. Een kleinere vooruitplanningstermijn is hier nefaster voor de primaire doelfunctie. Wanneer de planningsmarge van de containers variëren tussen 0-1-2-3 dagen (categorie 7), wordt opnieuw een gelijkaardige trend waargenomen. Bij vier dagen vooruitplannen, wordt een minimaal aantal 'te laat' dagen van 38 bekomen, waar kleinere vooruitplanningstermijnen, duidelijk opnieuw nadeliger zijn. Tot slot, waar categorieën 1-2-3-5 aantonen dat er maximaal 1 dag vooruitplannen gekozen mag worden om evenwaardig te zijn met het conventioneel plannen, toont categorie 6 (planningsmarge van 2 dagen of kleiner) aan dat er geenszins voordeel gehaald kan worden bij het vooruitkijken. Het minimum aantal 'te laat' dagen bij het vooruitplannen is in deze categorie bijna dubbel zo groot als het traditioneel plannen, zijnde 16 laadeenheden ten opzichte van 9 'te laat' dagen.

Het mag duidelijk zijn dat in de meeste gevallen een alfawaarde 0 (volledige gewicht aan de prioriteitsdoelstelling) nefast is voor het TLVP-model, althans wat 'instance 400' betreft. Het vooruitplannen biedt maar echt een meerwaarde als alle containers een planningsmarge van 3 dagen hebben (categorie 4). Wanneer de marge evenredig varieert tussen 0-1-2-3 dagen, is het minimum aantal 'te laat' dagen bij de traditionele planningsmethode gelijklopend met dat van vier dagen vooruitplannen. Bij een kleinere vooruitplanningstermijn of een kleinere planningsmarge, is vooruitplannen af te raden, althans wat de alfawaarde 0 betreft. Categorie 6 en 7 bij alle andere alfawaardes maken duidelijk dat vooruitplannen duidelijk wel een positief effect heeft, wat reeds in figuren 9-12 aangetoond werd.

### 3.5.3 Instance 500 en 600 containers

Bij de laatste twee 'instances' van 500 en 600 containers, wordt de planningstermijn in het model op 20 dagen geplaatst. Wanneer de planningsperiode van 10 dagen voor deze 'instances' gehanteerd zou worden, zullen sommige containers na die planningsperiode nog niet verzonden zijn waardoor er uit de output bijgevolg niet af te leiden valt hoeveel dagen die containers 'te laat' zullen aankomen, enkel dat ze effectief 'te laat' zullen zijn. Deze info is vereist aangezien net dit de KPI is waarmee de resultaten onderling vergeleken worden. Wanneer het totaal aantal in te plannen voet groter is dan de beschikbare 14400 voet (voor 10 treinen), kan het algoritme van dit TLVP-model geen planningsberekeningen maken. Aangezien de 'instances' met 500 en 600 containers een totale te beladen lengte hebben van respectievelijk 16297 en 19557 voet, wordt het aantal beschikbare voet uitgebreid naar 28800, wat dus overeenkomt met 20 treinen. De verschillende 'release dates' en 'due dates' van elke categorie blijven behouden tussen dag 0 en dag 9 (10 dagen), enkel het aantal te plannen dagen wijzigt. Hierdoor zal de code telkens voor 19 dagen vooruitplannen, waarbij de laatste treinen een kleinere beladingsgraad zullen hebben. Enkel de nog niet-geplande laadeenheden, zullen op die laatste treinen beladen worden. Hieruit kan dan het totaal aantal 'te laat' dagen afgeleid worden.

Wat meteen opvalt bij het runnen van beide sets, is dat het aantal 'te laat' dagen zeer sterk is toegenomen in vergelijking met dezelfde categorieën van 'instance 400'. Waar het minimum aantal 'te laat' dagen van categorie 6 en 7 respectievelijk 6 en 31 bedroegen, loopt het aantal 'te laat' dagen in diezelfde categorieën op tot meer dan 400 dagen.

Wanneer éénzelfde combinatie van een bepaalde prioriteitslevel met een bepaalde alfa van elke categorie vergeleken wordt tussen de 5 verschillende planningsmethodes, valt het op dat een vooruitplanningstermijn van vier dagen voor elke combinatie van elke categorie tot een veel beter resultaat leidt. Hiervoor valt één uitzondering waar te nemen. Indien een planner met een planningsprobleem te maken heeft dat overeenkomt met categorie 3 van 'instance 500', dan is het bij een alfawaarde 0 beter om niet vooruit te plannen, tenzij er een prioriteitslevel van 0 gehanteerd zou worden. Alle overige combinaties zijn bij 4 dagen vooruitplannen voor elke parametercombinatie beter ten opzichte van het traditioneel plannen. Bij kleinere vooruitplanningstermijnen vallen al meer uitzonderingen waar te nemen: hoe lager het aantal dagen vooruitplannen, hoe groter de kans dat het niet-vooruitplannen voor éénzelfde combinatie beter is. Stel dus dat een planner éénzelfde setting moet gebruiken, is hij bij een vooruitplanningstermijn van 4 dagen zeker dat er sowieso minder 'te laat' eenheden gegenereerd zullen worden dan bij het conventioneel plannen, met uitzondering van de reeds besproken combinaties 4-1-10-0, 4-2-10-0 en 4-3-10-0. Wanneer dit ook onderzocht wordt voor 'instance 600', is dit feit al vanaf drie dagen vooruitplannen waarneembaar. Hoe groter het aantal te plannen containers en hoe groter de vooruitplanningstermijn, hoe voordeliger het vooruitplannen bij éénzelfde combinatie is, zelfs als de planningsmarge van elke container nihil is (categorie 1). Een planner zal in de praktijk echter niet vasthangen aan éénzelfde combinatie, maar steeds de meest optimale parametercombinatie kiezen. Figuren 14-17 illustreren het kleinste aantal 'te laat' dagen dat per categorie gegenereerd wordt volgens het aantal dagen (vooruit)plannen.

Aantal dagen (vooruit)plannen	'Te laat' dagen	Prior.level	Alfa
<b>Categorie 1</b>			
Niet vooruitplannen	438	0, 1, 2, 3	0.9
1 dag vooruitplannen	431	0, 1	0.6
2 dagen vooruitplannen	428	0, 2	0.8
3 dagen vooruitplannen	428	0 1 2 3	0.1, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9 0.1 0.2, 0.3, 0.7 0.3, 0.8
4 dagen vooruitplannen	426	0 1 2 3	0.1 tot en met 1 0.1 tot en met 1 0.1 tot en met 1 0 tot en met 1
<b>Categorie 2</b>			
Niet vooruitplannen	268	0 1 2 3	0.5 0.5 0.4, 0.5 0.1, 0.5
1 dag vooruitplannen	263	1 2 3	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 0, 0.1, 0.2, 0.3 0.1
2 dagen vooruitplannen	263	0	0.5
3 dagen vooruitplannen	261	0, 1, 2, 3	0.1 tot en met 1
4 dagen vooruitplannen	261	0 1 2 3	0.1 tot en met 1 0.1 tot en met 1 0 tot en met 1 0 tot en met 1

Figuur 14: Overzicht van de optimale 'settings' bij categorie 1 & 2 van 'instance 500' volgens aantal dagen vooruitplannen

Wanneer de containers geen tot een zeer kleine (1 dag) planningsmarge hebben, is er toch duidelijk een positieve impact van vooruitplannen te merken. Bij de eerste categorie kan er dankzij vooruitplannen een reductie tot 12 'te laat' dagen plaatsvinden. Het totaal aantal containers die te laat op hun bestemming aankomt in de tweede categorie, kan met 7 dagen teruggebracht worden. Hiervoor is er dan een vooruitplanningstermijn van drie of vier dagen vereist. Het grootste verschil in daling van aantal 'te laat' dagen, wordt voor beide categorieën bekomen bij de vergelijking van één dag vooruitplannen ten opzichte van het conventioneel plannen, wat er duidelijk op wijst dat 'het vooruitkijken' voor 'instance 500' zeker een meerwaarde biedt. Dit wordt nu ook voor de overige categorieën onderzocht.

Aantal dagen (vooruit)plannen	'Te laat' dagen	Prior.level	Alfa
<b>Categorie 3</b>			
Niet vooruitplannen	191	1	0.1
		2	0.2
		3	0.1
1 dag vooruitplannen	188	1	0.3
2 dagen vooruitplannen	185	1	0.5
3 dagen vooruitplannen	184	0	0.3
		1	0.1, 0.5
		2	0.5
		3	0.1
4 dagen vooruitplannen	180	0	0.2
<b>Categorie 4</b>			
Niet vooruitplannen	161	2	0.5
1 dag vooruitplannen	159	1	0.4
		3	0.3
2 dagen vooruitplannen	159	0	0.5
		1	0.6
		2	0.2
3 dagen vooruitplannen	155	0	0.8
4 dagen vooruitplannen	154	0	0.7, 0.9, 1
		1	1
		2	0.5, 1
		3	1

Figuur 15: Overzicht van de optimale 'settings' bij categorie 3 & 4 van 'instance 500' volgens aantal dagen vooruitplannen

Het aantal 'te laat' dagen dat dankzij vooruitplannen uitgespaard kan worden, is gelijklopend met de mogelijke reductie bij de eerste twee categorieën. Als de containers een planningsmarge van 2 dagen hebben, kan men tot 11 'te laat' dagen vermijden. Bij categorie 4 kunnen er 7 'te laat' dagen uitgespaard worden. Net als bij de eerste twee categorieën wordt het optimale aantal 'te laat' dagen ook voor categorieën 3 en 4 bekomen als er voor 4 dagen vooruitgekeken wordt. Bijzonder aan categorie 3 is dat het optimale cijfer bij een alfawaarde van 0.2 met prioriteitslevel 0 bekomen wordt, waar de gemeenschappelijke alfawaarde van de andere drie categorieën over alle prioriteitslevels 1 bedraagt.

Aantal dagen (vooruit)plannen	'Te laat' dagen	Prior.level	Alfa
<b>Categorie 5</b>			
Niet vooruitplannen	438	0 1 2 3	0.1, 0.3 tot en met 0.9 0.1, 0.3 tot en met 0.9 0.1 tot en met 0.5, 0.7, 0.8, 0.9 0.2, 0.3, 0.4, 0.7, 0.8, 0.9
1 dag vooruitplannen	429	1 2	0.5 0.1
2 dagen vooruitplannen	423	1 2 3	0.2 0.1, 0.3, 0.5 0.3
3 dagen vooruitplannen	426	0, 1, 2, 3	0 tot en met 1
4 dagen vooruitplannen	422	0 1 2 3	0.3, 0.8, 0.9 0.1, 0.2, 0.4 0.4, 0.5 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.9
<b>Categorie 6</b>			
Niet vooruitplannen	443	1, 2	0.4
1 dag vooruitplannen	441	1 2 3	0.1, 0.2, 0.4, 0.6 0.1, 0.3, 0.5, 0.6 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.7
2 dagen vooruitplannen	439	1 3	0.3, 0.4 0.1
3 dagen vooruitplannen	438	0 1 2	0.2 0.5 0.4
4 dagen vooruitplannen	436	0 1 2 3	0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8 0, 0.1, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 tot & met 1 0.2, 0.4, 0.5, 0.8, 0.9, 1

Figuur 16: Overzicht van de optimale 'settings' bij categorie 5 & 6 van 'instance 500' volgens aantal dagen vooruitplannen

Zoals de eerste vier categorieën wordt het optimale resultaat ook bij categorie 5 en 6 bekomen als er voor vier dagen vooruitgekeken wordt. De reductie in aantal 'te laat' dagen ten opzichte van het traditioneel TLP-model bedraagt respectievelijk 16 en 7 dagen. Het maximale verschil in dagen dat telkens bekomen kan worden bij een vooruitplanningstermijn van vier dagen, is bij categorieën 2, 4 en 6 steeds exact hetzelfde, zijnde 7 dagen. Opmerkelijk bij categorie 5 is dat drie dagen vooruitplannen nadeliger blijkt ten opzichte van twee dagen vooruitkijken, terwijl een vooruitplanningstermijn van vier dagen opnieuw als beste keuze naar voren komt.



Aantal dagen (vooruit)plannen	'Te laat' dagen	Prior.level	Alfa
<b>Categorie 7</b>			
Niet vooruitplannen	484	1 2 3	0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6 0.2, 0.5 0.1, 0.2, 0.5, 0.6
1 dag vooruitplannen	483	1 2 3	0.1, 0.2, 0.4 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 0.1, 0.2, 0.5
2 dagen vooruitplannen	483	0 1 2 3	0.2, 0.6, 0.8, 0.9, 1 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 1 0.1, 0.3, 1 0.1, 0.9, 1
3 dagen vooruitplannen	478	0 1 2 3	0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.9, 1 0.1 tot en met 1 0 tot en met 0.8, 1 0.1 tot en met 0.6, 0.8, 0.9, 1
4 dagen vooruitplannen	478	0, 1, 2, 3	0 tot en met 1

Figuur 17: Overzicht van de optimale 'settings' bij categorie 7 van 'instance 500' volgens aantal dagen vooruitplannen

Wanneer de planningsmarge van de containers varieert tussen 0-1-2-3 dagen, kan bij 'instance 500' het optimaal aantal 'te laat' dagen reeds bekomen worden bij een vooruitplanningstermijn van 3 dagen. De invloed van de alfawaarde wordt ook steeds kleiner. Bij vier dagen vooruitplannen is er zelfs een volledige nivellering in alfawaardes waarneembaar. Het doet er dan niet meer toe of het volledige gewicht aan de capaciteitsdoelstelling of aan de prioriteitsdoelstelling gegeven wordt.

Bovenstaande bevindingen kunnen voor elke categorie in grote mate ook doorgetrokken worden naar 'instance 600'. Aangezien er ook hier met een planningstermijn van 10 dagen gewerkt wordt, is het aantal 'te laat' dagen hier duidelijk hoger dan 'instance 500'. De algemene conclusie wijzigt echter niet: het vooruitplannen is voordeliger ten opzichte van traditionele planningsmethoden. De maximale reductie in aantal 'te laat' dagen ligt - met uitzondering van categorie 0 - telkens hoger bij 'instance 600', wat dus betekent dat de positieve impact van vooruitplannen toeneemt naarmate er meer te plannen containers zijn. Hoever deze bevinding reikt, kan in een verder onderzoek bestudeerd worden. Waar het optimale resultaat voor 'instance 500' bij een vooruitplanningstermijn van vier dagen bekomen wordt, kan dit voor 'instance 600' - met uitzondering van categorie 3 en 7 - reeds bij een vooruitplanningstermijn van 3 dagen verkregen worden. Die optimale vooruitplanningstermijnen voor beide 'instances' komen ook exact terug bij een onderlinge vergelijking van alle alfawaarde-prioriteitslevel combinaties, wat reeds bij aanvang van dit punt 3.5.3 'Instance 500 en 600 containers' beschreven werd.

### 3.5.4 Instance 30- en 45-voetcontainers

Alle voorgaande 'instances' beschikken telkens over vijf verschillende containertypes. Wanneer alle containers even lang zijn, zou er verondersteld kunnen worden dat vooruitplannen geen meerwaarde biedt wegens minder opties en het dus veel minder snel rendeert om containers te gaan wisselen. Vandaar wordt ook de impact van vooruitplannen bij éénzelfde containertype getest. Er wordt gekozen voor het 30' en 45' containertype, die uit de downsampling methode, besproken in punt 5 'Appendix', als de twee populairste types volgens de inputdata van Heggen (2017) naar voren kwamen. Voor 'instance 30'' moeten er 600 containers gepland worden, 'instance 45'' zal uit 400 containers bestaan. Dit resulteert voor beide containersets in 18000 te plannen voet, waardoor het opnieuw onmogelijk wordt om alle containers (op tijd) over de 10 te plannen dagen te verdelen. De zeven categorieën blijven behouden.

Meteen wordt duidelijk voor 'instance 30'' dat bij alle alfawaardes tussen 0.1 en 0.9 het aantal 'te laat' dagen per categorie dezelfde is, onafhankelijk van de planningsmethode en vooruitplanningstermijn. Bij categorie 4 (planningsmarge van 3 dagen) en categorie 7 (planningsmarge variërend tussen 0-1-2-3 dagen) is één dag vooruitplannen bij prioriteitslevel 0 nadeliger dan de conventionele planningsmethode. Dit geldt niet voor de overige prioriteitslevels van deze vooruitplanningstermijn. Het aantal 'te laat' dagen bij de gebruikelijke planningsmethode en een vooruitplanningstermijn van 1-2-3-4 dagen, is voor alle categorieën steeds hetzelfde, met twee uitzonderingen bij prioriteitslevel 0 indien er één dag vooruitgekeken wordt.

Wanneer het volledige gewicht aan één bepaalde hulpdoelstelling gegeven wordt, is er in bepaalde gevallen een duidelijke stijging in het aantal 'te laat' dagen terug te vinden. Bij een maximaal gewicht aan de capaciteitsdoelstelling (alfa = 1), kan bij categorieën 3, 4, 6 en 7 in bepaalde gevallen een stijging waargenomen worden, afhankelijk van de (vooruit)planningstermijn. Indien de secundaire prioriteitsdoelstelling (alfa = 0) het volledige gewicht toegekend krijgt, wordt in bepaalde gevallen een afwijking in categorie 3 en 4 gegenereerd. Onderstaande figuur 18 geeft telkens het verschil weer ten opzichte van het optimale.

Aantal dagen (vooruit)plannen	Alfa	Stijging in aantal 'te laat' dagen ten opzichte van het optimale, weergegeven per categorie			
		Cat. 3	Cat. 4	Cat. 6	Cat. 7
Niet vooruitplannen	1	1	9	2	8
	0	-	412	-	-
1 dag vooruitplannen (*)	1	-	4	-	4
	0	-	412	-	-
2 dagen vooruitplannen	1	-	-	-	-
	0	134	436		
3 dagen vooruitplannen	1	-	-	-	-
	0	-	120	-	-
4 dagen vooruitplannen	1	-	-	-	-
	0	-	120	-	-

Figuur 18: Overzicht van de stijging in aantal 'te laat' dagen bij alfawaarde 0 en 1 voor 'instance 30'' volgens aantal dagen vooruitplannen  
(\*): Dit geldt niet voor prioriteitslevel 0 bij categorie 4 en 7, waar bij alle alfawaardes een stijgend aantal 'te laat' dagen bekomen wordt.

Globaal genomen heeft een grotere vooruitplanningstermijn bij alfawaardes 0 en 1 een positief effect op het aantal 'te laat' dagen. Hierbij valt één uitzondering waar te nemen: indien een planner bij de secundaire doelfunctie het gewicht volledig op de prioriteit legt, leidt dit voor de derde en vierde categorie - bij 2 dagen vooruitplannen - tot een stijging van respectievelijk 134 en 24 'te laat' dagen ten opzichte van het TLP-model. Voor beide alfawaardes is een vooruitplanningstermijn van drie of vier dagen duidelijk wel aan te raden. In dat geval worden bij alle categorieën - met uitzondering van categorie 4 met alfa 0 - evenveel 'te laat' dagen gegenereerd als het optimale. Bij de vierde categorie zullen er bij een alfawaarde 0 nog 120 extra 'te laat' dagen veroorzaakt worden, wat drie keer zo min is in vergelijking met de traditionele planningsmethode.

Voor 'instance 45' is er een gelijkaardig patroon terug te vinden. Bij alfawaardes tussen 0.1 en 0.9, is één dag vooruitplannen bij een prioriteitslevel 0 enkel nadelig bij categorie 7, waar dit bij 'instance 30' zowel bij categorie 4 en 7 het geval was. Alle andere vooruitplanningsmethoden van deze categorie genereren bij diezelfde alfawaardes exact hetzelfde aantal 'te laat' dagen ten opzichte van het TLP-model. Wanneer opnieuw de extremen aanschouwd worden, is in bepaalde gevallen ook voor 'instance 45' een stijging in het aantal 'te laat' dagen waarneembaar. Dit wordt in onderstaande figuur 19 weergegeven.

Aantal dagen (vooruit)plannen	Alfa	Stijging in aantal 'te laat' dagen ten opzichte van het optimale, weergegeven per categorie			
		Cat. 3	Cat. 4	Cat. 6	Cat. 7
Niet vooruitplannen	1	-	-	5	-
	0	-	262	-	-
1 dag vooruitplannen (*)	1	-	-	-	11
	0	-	262	-	-
2 dagen vooruitplannen	1	-	-	-	-
	0	20	262	-	-
3 dagen vooruitplannen	1	-	-	-	-
	0	80	153	-	-
4 dagen vooruitplannen	1	-	-	-	-
	0	-	99	-	-

Figuur 19: Overzicht van de stijging in aantal 'te laat' dagen bij alfawaarde 0 en 1 voor 'instance 45' volgens aantal dagen vooruitplannen

(\*): Dit geldt niet voor prioriteitslevel 0 bij categorie 7, waar bij alle alfawaardes een stijgend aantal 'te laat' dagen bekomen wordt.

Voor categorie 3 valt vooruitplannen in geen enkel geval aan te raden, en is het bij alfa 0 zelfs nefast indien er twee of drie dagen vooruitgekeken wordt. Voor categorie 4 kan bij alfa 0 een beter resultaat bekomen worden als er drie of vier dagen vooruitgepland wordt. Bij alfa 1 is vooruitplannen voor categorie 6 duidelijk een meerwaarde. Voor diezelfde alfawaarde van categorie 7 blijkt één dag vooruitplannen dan weer nadelig. Over alle vier de categorieën heen, biedt het TLVP-model bij de extreme waarden pas een voordeel vanaf een vooruitplanningstermijn van 4 dagen. De algemene conclusie van dit punt is dat het vooruitplannen in geen enkel geval een toegevoegde waarde levert indien de planner geenszins het volledige gewicht aan één van de twee hulpdoelstellingen wil geven.

### 3.5.5 Discussie van de resultaten

Uit de simulatie van containersets bestaande uit 300 en 400 containers werd duidelijk dat vooruitplannen geen meerwaarde biedt als er geen 'te laat' dagen door het traditioneel TLP-model gegenereerd wordt. In tegenstelling tot 'instance 300', bleek uit de 'instance' bestaande uit 400 containers dat vooruitplannen in bepaalde gevallen ook nadelig kan zijn.

Categorieën 6 en 7 van 'instance 400' toonden voor het eerst een positief effect van vooruitplannen aan, waar er respectievelijk tot drie en twee 'te laat' dagen vermeden kon worden bij een vooruitplanningsperiode van vier dagen. De verdeling van de 'release dates' bij categorie 6 werd zo opgesteld dat er 50 containers per dag vrijgegeven werden, terwijl dit bij categorie 5 nog 44 containers bedroeg. De laatste 'release date' van categorie 5 wijkt in dit aantal lichtjes af teneinde steeds 400 containers te bekomen. Onder een gemiddeld aantal te plannen containers van 45 per dag, kan dit TLVP-model geen meerwaarde bieden omdat ook de traditionele planningsmethode tot 0 'te laat' dagen leidt. Bij bepaalde alfawaardes van 0 kan het zelf nefast zijn om vooruit te plannen. Wanneer planners ervoor kiezen om het volledige gewicht op de secundaire prioriteitsdoelstelling te plaatsen, blijkt de impact van vooruitplannen vanaf categorie 2 in de meeste gevallen nadelig ten opzichte van het conventioneel plannen. Enkel wanneer containers geen planningsmarge hebben, maakt het gebruik van alfa 0 bij het (vooruit)plannen niet echt uit. Vanaf 50 vrijgegeven containers per dag worden bij alle alfawaardes een aantal 'te laat' dagen gegenereerd, zowel door het TLP- als het TLVP-model. Dit cijfer komt ook overeen met het aantal vrijgegeven containers bij categorie 1 van 'instance 500'. Dit is het moment vanaf wanneer vooruitplannen een - weliswaar nog kleine - maar gunstige invloed heeft. Waar de grens van het voordeel van vooruitkijken zich exact bevindt (ergens tussen 44 en 50 vrijgegeven containers per dag), moet in een verder stadium onderzocht worden.

Om bij alle planningsmarges (categorieën) er zeker van te zijn dat vooruitplannen tot een beter resultaat leidt, moet het aantal te plannen voet groter zijn dan het aantal beschikbare voet (treinen). Dit was het geval bij 'instance 500' en 'instance 600'. Het aantal vrijgegeven containers per dag bedroeg voor deze containersets 50 en meer. Met uitzondering van bepaalde alfawaardes van 0 en 1, bleek de impact van vooruitplannen steeds positief. Dit positief effect is vooral waarneembaar vanaf een vooruitplanningstermijn van 3 dagen. Wanneer er vier dagen vooruitgekeken wordt, is niet enkel het optimale (lees: minimale) aantal 'te laat' dagen bij deze termijn terug te vinden, maar is ook elke combinatie alfawaarde ten opzichte van prioriteitslevel beter dan bij het conventioneel plannen, met één kleine uitzondering bij 'instance 500', categorie 3 met alfawaarde 10 en prioriteitslevels 1, 2, 3.

Het vermoeden dat het gebruik van éénzelfde containertype geen gunstig effect blijkt te hebben, reeds gesuggereerd in punt 2.1.1 'Planning in het intermodaal spoortransport', wordt tijdens de simulatie bevestigd, althans wat de 30' en 45' container betreft. Natuurlijk heeft dit ook te maken met de lengtebeperkingen van de twee wagontypes die in dit model gebruikt worden. Vandaar lijkt het ook zeer nuttig om dit voor 20 en 25 voetcontainers te testen om een algemeen besluit te kunnen schrijven.

Ter afsluiting van deze praktijkstudie wordt er nog een algemene analyse uitgevoerd op de effecten van de gewichten voor de secundaire capaciteits- en prioriteitsdoelstelling, ongeacht de planningsmethode (vooruitplannen of niet). De optimale combinatie prioriteitslevel-alfa die uit de figuren 9-19 het meeste voorkomt is "1-0.5". Met andere woorden: wanneer een planner beide gewichten van de secundaire doelfunctie maximaliseert in combinatie met prioriteitslevel 1, heeft hij de grootste kans om het minst aantal 'te laat' dagen te bekomen. Bij dit level 1 wordt er een onderscheid gemaakt tussen de eerste drie dagen marge dat een container heeft om gepland te worden. Alle containers met één dag planningsmarge zullen bij dat level een prioriteitsscore van twee punten krijgen, containers met twee dagen planningsmarge krijgen één scorepunt toegekend. Containers die pas binnen drie (of meer) dagen hoeven ingepland te worden, zonder te laat op hun bestemming te komen, krijgen geen score en worden dus als niet-dringende zendingen beschouwd. Containers die geen planningsmarge hebben, worden verondersteld reeds in de primaire doelfunctie opgenomen te zijn. De optimale combinatie die in figuren 9-19 het tweede vaakst terug te vinden is, wordt opnieuw bekomen bij een prioriteitslevel 1, ditmaal in combinatie met een alfawaarde van 0.1 of 0.4. Ook prioriteitslevel 3 met alfawaarde 0.1 behoort tot deze categorie. Bij dat level krijgen containers met een planningsmarge van één dag tien keer zo veel prioriteit ten opzichte van laadeenheden met twee dagen marge. De derde meest frequente optimale combinatie wordt teruggevonden bij prioriteitslevel 2 met een alfawaarde van 0.1 en 0.2. Prioriteitslevel 2 geeft drie keer zo veel prioriteit aan containers met één dag planningsmarge ten opzichte van laadeenheden die twee dagen planningsflexibiliteit hebben.

Het is dus niet zo dat wanneer containers met één dag planningsmarge een prioriteitsscore krijgen die drie of tien keer zo groot is ten opzichte van containers met twee dagen planningsmarge, dit tot een veel grotere kans leidt dat er minder aantal 'te laat' eenheden gegenereerd zullen worden in vergelijking met prioriteitslevel 1. Wanneer enkel containers met één dag planningsmarge een prioriteitsscore toegekend krijgen (prioriteitslevel 0), komt het optimale resultaat in vergelijking met andere prioriteitslevels enkel bij een alfawaarde van 0.7 en 0.9 het vaakst voor. In het algemeen is de kans het grootst dat het minst aantal 'te laat' dagen gegenereerd wordt bij een combinatie prioriteitslevels variërende van 1 tot en met 3 met alfawaardes tussen 0.1 en 0.5. Globaal gezien is het dus beter om de nadruk van de secundaire doelfunctie iets meer op de prioriteitsdoelstelling te leggen in plaats van op de capaciteitsgraad van een trein te gaan focussen. Het volledige gewicht aan de prioriteitsdoelstelling geven - onafhankelijk van de prioriteitslevel - leidt zelden tot het optimale resultaat. Dit werd reeds duidelijk uit de vergelijkingsanalyse van het vooruitplannen en het conventioneel plannen, eerder besproken in deze sectie 3.5.

Tot slot werd ook de invloed van het gewicht 'bèta' onderzocht. Alle bovenstaande bevindingen zijn gebaseerd op een bètawaarde 0, wat dus betekent dat het gewicht aan latere dagen bij het vooruitplannen gemaximaliseerd is. Aangezien een vooruitplanningstermijn van vier dagen uit de verschillende simulaties het vaakst tot het minst aantal 'te laat' eenheden leidt, werd onderzocht of een kleiner gewicht aan latere dagen een grote negatieve impact heeft op het optimale resultaat. Hiervoor werden enkele initiële testen uitgevoerd waaruit bleek dat het effect van het gewicht van de bèta minimaal is. Voor dit TLVP-model - onderhevig aan bepaalde assumpties en beperkingen - is het verder onderzoeken van deze parameter dus weinig zinvol. De beperkingen die aan dit onderzoek onderhevig zijn, worden in volgende sectie aangehaald.

### 3.6 Beperkingen

In punt 3.2.2 'Formulering TLVP-probleem' staat beschreven dat de secundaire doelfunctie van het TLVP-probleem opgesteld wordt via een gewogen-som methode om op die manier de capaciteitsdoelstelling en prioriteitsdoelstelling in het model op te nemen. Een nadeel hierbij is dat er op voorhand beslist moet worden via het gewicht van alfa (capaciteit) en  $1-\alpha$  (prioriteit) welk doel belangrijker is ten opzichte van elkaar. Tijdens het planningsproces kunnen er veel gebeurtenissen plaatsvinden die de opdracht beïnvloeden (Heggen, 2017). Een mogelijk voorbeeld is dat een vrachtwagen richting de vertrekterminal te maken krijgt met file, een ongeval of een panne waardoor een kritische (marge 0 of kleiner) of dringende (marge 1) lading die reeds ingepland werd, niet meer op de geplande trein geraakt. Hierdoor komt er ruimte vrij voor andere, minder dringende zendingen. Aangezien de planners vaak met 'last-minute' veranderende omstandigheden te maken hebben en ze zich moeten baseren op de huidige real-time operationele situatie, is het werken met deze gewogen-som methode in de praktijk dus niet altijd evident. Het is vaak moeilijk om al op voorhand (a priori) vaste gewichten aan elk doel te geven. Via het 'rolling horizon' principe, toegepast bij het vooruitplannen, kan er wel tot op de laatste dag 'gereageerd' worden door het model opnieuw te runnen, rekening houdend met de gevraagde wijzigingen.

Real-time planners moeten echter tot op de laatste uren voor vertrek van een trein flexibel kunnen inspringen op de situatie door a posteriori een alternatieve treinlaadplanning te kiezen wanneer ze merken dat een vooropgesteld treinlaadplan niet meer haalbaar is. In de probleemstelling bij punt 1.1.4 'Belemmeringen spoorvervoer' wordt net die flexibiliteit als hoofdoorzaak aangewezen voor het ontbreken van een modal shift van het weg- naar het spoorvervoer. Daarom wordt bij de MDLS-heuristiek gewerkt met niet-gedomineerde oplossingen die zich op het 'Pareto-front' bevinden (Heggen, 2017). De 'Pareto-regel' indachtig, betekent dit dat alle gevonden oplossingen van gelijke orde zijn: een oplossing  $X$  kan voor een bepaald doel beter zijn dan oplossing  $X'$ , maar voor een ander doel dan weer slechter. Op die manier kan er telkens gekozen worden uit een aantal verschillende mogelijke laadplannen die men zal kunnen uitvoeren, afhankelijk van de real-time situatie. De treinplanners kunnen bijgevolg achteraf (a posteriori) het onderlinge gewicht van elk doel wijzigen volgens de situatie die zich op dat moment voordoet en voor een alternatief laadplan kiezen. "Omdat flexibele planning een basis is voor een dynamische synchromodale omgeving, kunnen heuristieken de oplossing zijn indien er geen commerciële software beschikbaar is of indien de specifieke karakteristieken het real-life probleem te complex maken om het in een korte tijdspanne te berekenen" (Heggen, 2017). Bovendien zullen heuristieken de mogelijkheid bieden om met grotere containersets te werken. Aangezien het onderzoek naar de impact van 'vooruitplannen' zich nog in een beginfase bevindt, werd er in deze thesis gekozen om met maximaal 600 containers te werken. Planningsproblemen van grotere terminals zoals de tri-modale Antwerpse MPET-terminal met een beschikbare capaciteit van 9000 TEU containers, kunnen niet opgelost worden via de exacte oplossingsmethode van dit TLVP-model. Het algoritme zou teveel opties genereren waardoor de code ze niet verwerkt krijgt. Het gebruik van heuristieken waarbij de optimale oplossing geselecteerd kan worden, zoniet een oplossing die het optimum sterk benadert, zou ook dit probleem kunnen verhelpen. In punt 3.4.1 'Instances' werd reeds beschreven dat voor deze grotere simulatie met C++ gewerkt zou kunnen worden. Hierbij kan dan ook meteen de 'vooruitplanningshorizon' en het maximaal aantal dagen marge van een container uitgebreid worden.

Omdat het onderzoek van Heggen (2017) al heeft aangetoond dat de MDLS-heuristiek ten opzichte van andere oplossingsmethoden toch een grote meerwaarde biedt bij treinplanningsproblemen, lijkt het integreren van de MDLS-heuristiek in dit TLVP-model de volgende stap. Het voordeel van de MDLS-heuristiek als oplossingsmethode is dat het gebruikt kan worden voor zowel planningen die slechts één doel voor ogen hebben, als voor planningen die ook meerdere doelen nastreven. Het werken met heuristieken heeft bovendien als pluspunt dat ze vrij eenvoudig te berekenen zijn waardoor de berekeningstijd niet hoog oploopt, wat flexibiliteit ook opnieuw weer in de hand werkt (Heggen, 2017).

Wanneer de inputdata van het model aanschouwd worden, lijkt vooral een 'known date' van dag 0 voor elke container niet overeen te stemmen met de praktijk. Vaak weet een spooroperator pas één week op voorhand wat de effectieve vraag tot transport voor een bepaalde trafiek zal zijn. In dit onderzoek werd er telkens met een planningshorizon van 10 dagen gewerkt in de veronderstelling dat de totale vraag (300-400-500-600) containers, van bij aanvang (dag 0) gekend is. Soms gebeurt het zelfs dat een klant zijn vrachtbrief maar een paar uren op voorhand aan de spooroperator afgeeft. In dat geval wordt vooruitplannen heel moeilijk. Desalniettemin heeft de huidige spoorvrachtsector nood aan een goedwerkend boekingssysteem waarbij de (vooruit) geplande resources alreeds afgestemd kunnen worden met de vraag, waardoor afbestelkosten van rijpaden en andere - reeds geplande - resources niet te hoog oplopen. Dit kan dan weer in een ander onderzoek bestudeerd worden. Feit is dat er al enkele weken op voorhand een inzicht in de klantenvraag moet zijn om het (vooruit) plannen efficiënt te maken.

Ten slotte moet men bij het vooruitplannen binnen het intermodaal spoortransport ook in acht nemen dat er steeds meerdere actoren en besluitvormers in dit proces betrokken zijn, wat resulteert in een complexere planningsomgeving in vergelijking met unimodaal wegtransport (2019). Indien ook verder onderzoek de meerwaarde en praktische toepasbaarheid van vooruitplannen binnen het intermodaal spoorvervoer aantoont, kan de focus vervolgens gelegd worden op een centraal boekingssysteem, waarbij alle partijen van de volledige supply chain betrokken worden om die integratie van het vooruitplannen ook realistisch te maken (Flows, 2015). Een betere integratie tussen de verschillende spelers in de supply chain - zoals het uitwisselen van real-time informatie over de status van de laadeenheden - kan een verdere optimalisatie van de treinplanning betekenen (Heggen, 2014). Het vooruitplannen van een bepaalde partij heeft namelijk grote gevolgen voor de volgende partij, stroomafwaarts in de keten. Via een centraal boekingssysteem zou de voorgaande partij, stroomopwaarts in de keten, op zijn beurt dan ook rekening kunnen houden met het aspect 'vooruitplannen'.

## 4 Conclusie en aanbevelingen

De centrale onderzoeksvraag die bij aanvang van deze masterproef gesteld werd, luidt als volgt: "Wat is de impact van het vooruitplannen bij laadplanning in het intermodaal spoortransport?" Uit de studie van bestaande treinlaadplanmodellen blijkt dat de huidige literatuur, toch zeker binnen het domein van het intermodaal spoortransport, louter op het optimaal inplannen van één bepaalde trein focust. De literatuurstudie omtrent 'vooruitplannen' maakt duidelijk dat het 'rolling horizon' principe in de transportsector steeds meer opgenomen wordt. Door de volledige planningshorizon van een transportprobleem op te splitsen in een bepaald aantal vaste periodes, kunnen planningsproblemen eenvoudiger en efficiënter opgelost worden. Bovendien speelt het 'rolling horizon' principe in op het dynamische karakter van het planningsprobleem. Nieuwe aanvragen kunnen namelijk nog tot op een bepaald moment behandeld worden door het 'rolling horizon' algoritme up te daten waarbij zowel de toewijzing van laadeenheden voor de eerste dag gebeurt, als dat voor de komende dagen. De implementatie van het 'rolling horizon' algoritme in een laadplanmodel voor het intermodaal spoortransport waarbij er bovendien naar alle beschikbare laadeenheden op een terminal gekeken wordt, bestond er voor aanvang van dit onderzoek niet. Deze masterproef heeft het principe 'vooruitplannen' in een bestaand treinlaadplanmodel, zijnde het TLP-model van Heggen (2017), kunnen integreren.

Een vergelijking van het conventioneel plannen ten opzichte van het vooruitplannen houdt enkel steek als de conventionele planningsmethode tot een bepaald aantal 'te laat' dagen leidt. Afhankelijk van de planningsflexibiliteit die de containers krijgen, zal het TLVP-model vanaf 400 te plannen containers een bepaald aantal 'te laat' dagen generen. Uit de resultaten blijkt dat het vooruitplannen vanaf een bepaald gemiddeld aantal te plannen containers voordelig kan zijn. De exacte 'trade-off' hoeveelheid werd in dit eerste onderzoek niet bepaald, wel dat het punt zich ergens tussen de 44 en 50 containers bevindt. Echter, het vooruitplannen zal bij die hoeveelheid niet altijd tot hetzelfde - laat staan kleiner - aantal 'te laat' dagen leiden ten opzichte van het traditioneel plannen. Sterker nog, als het gemiddeld aantal te plannen containers onder de grens van 50 laadeenheden ligt, kan het vooruitplannen in bepaalde gevallen zelfs nadelig zijn in het geval een planner ervoor kiest om het volledige gewicht aan de prioriteitsdoelstelling te geven.

Wanneer het gemiddeld aantal te plannen containers boven 50 ligt, neemt het aantal te laat dagen sterk toe. De meerwaarde van vooruitplannen komt dan het best naar voren. Bij een vergelijking van éénzelfde combinatie gewichten alfa en 1-alfa op basis van de (vooruit)planningstermijn, is het duidelijk dat een vooruitplanningstermijn van vier dagen voor 500 te plannen containers bij praktisch elke gewichtencombinatie telkens tot het beste resultaat leidt, ongeacht welke planningsmarges de containers hebben. Bij 600 te plannen containers is dit feit al vanaf drie dagen vooruitplannen merkbaar. Naarmate de vooruitplanningstermijn kleiner wordt, neemt echter de kans toe dat het niet-vooruitplannen voor éénzelfde combinatie gewichten beter is. Aangezien een planner in de praktijk vaak niet zal vasthangen aan éénzelfde combinatie, wordt in dit onderzoek vooral gekeken welke parametercombinatie tot het optimaal aantal 'te laat' dagen leidt.



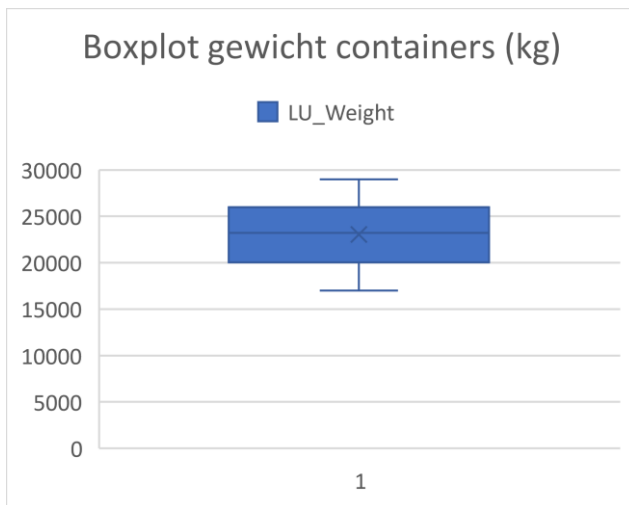
Over de zeven categorieën van de 500 te plannen containers heen, wordt het optimaal aantal 'te laat' dagen voor elke categorie bij een vooruitplanningstermijn van vier dagen bekomen. In het geval er 600 containers gepland moeten worden, kan het optimale resultaat in de meeste gevallen opnieuw bereikt worden als de treinlaadplanners drie dagen vooruitkijken. Naarmate de vooruitplanningstermijn groter wordt, daalt - mits enkele uitzonderingen - het aantal 'te laat' containers. Bovendien wordt bij vier dagen vooruitkijken ook de gegeven gewichtencombinatie voor de secundaire doelfunctie minder relevant. Wanneer de maximale reductie in aantal 'te laat' dagen onderzocht wordt, liggen deze per categorie telkens hoger bij de set van 600 containers. De positieve impact van vooruitplannen neemt dus toe naarmate het gemiddeld te plannen containers per dag stijgt. Tot hoever deze bevinding reikt, kan - net als de trade-off hoeveelheid - in een volgende studie onderzocht worden.

Als een logistieke dienstverlener enkel werkt met een 30 voet containertype of met een 45 voetcontainertype, blijkt het vooruitplannen bij alfawaardes die verschillend zijn van 0 en 1 geen invloed te hebben op het aantal 'te laat' dagen. Beide planningsmethodes leiden - of er nu vooruitgekeken wordt of niet - tot hetzelfde optimale resultaat. Wanneer planners ervoor kiezen om het volledige gewicht ofwel aan de capaciteitsdoelstelling (alfawaarde 1), dan wel aan het secundaire prioriteitsdoel (alfawaarde 0) toe te kennen, leidt een vooruitplanningstermijn van vier dagen steeds tot ofwel hetzelfde aantal 'te laat' dagen, ofwel een kleiner aantal 'te laat' dagen in vergelijking met diezelfde alfawaarde bij de conventionele planningsmethode. Als er louter gefocust wordt op het optimale resultaat, toont dit onderzoek echter aan dat het gebruik van éénzelfde (30 of 45 voet) containertype voor dit TLVP-model geen meerwaarde biedt.

Het TLVP-model maakt het dus mogelijk om tot op een bepaald niveau rekening te houden met het dynamische karakter van het probleem ééruzijds en anderzijds ook de dienstverlening naar de klant toe, op basis van de KPI 'het totaal aantal 'te laat' dagen, te verbeteren. Om echt de concurrentie met het wegvervoer aan te gaan teneinde een modal shift te bewerkstelligen, moeten treinlaadplanners de mogelijkheid hebben om hun originele laadplan tot enkele uren voor het effectief beladen van een trein nog te wijzigen, rekening houdend met 'last-minute' vraagverschuivingen. Al lijkt een centraal boekingssysteem waarbij alle actoren van de volledige supply chain betrokken worden noodzakelijk om de integratie van het vooruitplannen realistisch te maken. In verder onderzoek omtrent dit onderwerp is het niet enkel aangewezen om de impact van een grotere vooruitplanningstermijn te bestuderen, maar ook de planningstermijn verder uit te breiden naar 20, 30 of zelfs 40 dagen, wat dicht bij de realiteit aansluit. Planners kennen de totale transportvraag natuurlijk geen zes weken op voorhand. Vandaar moet ook de invloed van de 'known date' op het vooruitplannen getest worden. De exacte trade-off hoeveelheid vanaf wanneer vooruitplannen een meerwaarde kan bieden volgens het aantal dagen planningsmarges, kan deel uitmaken van verder onderzoek. Tot slot zou ook de impact van het ééruzijdig gebruik van kleinere containertypes (20 en 25 voet) getest moeten worden. De bevindingen van dit onderzoek situeren zich in een beginfase, maar kunnen desalniettemin als startpunt dienen voor het oplossen van planningsproblemen in de intermodale spoorvrachtsector.

# 5 Appendix

Deze appendix gaat wat dieper in op de downsamplingmethode die gebruikt werd om statistisch correcte gegevens te bekomen wat de lengte en het gewicht van elke container betreft. Wat het gewicht betreft wordt er een 'vijfgetallensamenvatting' over de 7057 containers uitgevoerd waardoor er zowel een inzicht bekomen wordt in het kleinste en grootste gewicht van de desbetreffende containers, alsook in het eerste, tweede en derde kwartiel. Deze getallen worden in onderstaande boxplot en in het bijhorend kader weergegeven.



Figuur A: Boxplot van het gewicht volgens 'instances' Heggen (2017)

Minimum (Q0)	17.000 kg
Eerste kwartiel (Q1)	20.041 kg
Tweede kwartiel (Q2)	23.221 kg
Derde kwartiel (Q3)	25.985 kg
Maximum (Q4)	28.999 kg

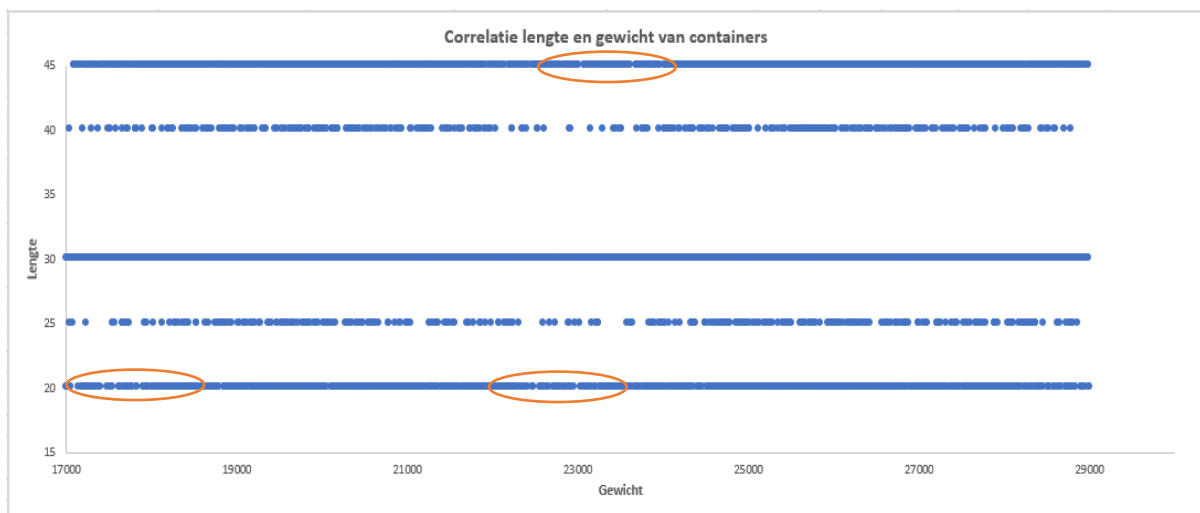
Figuur B: Overzicht van de boxplotgegevens in cijfers

Vervolgens wordt er ook een overzicht gemaakt van het aantal containers per type. Opvallend is dat het intermodaal containertype voor de desbetreffende lijntrafiek tussen België en Noord-Italië in bijna de helft van alle gevallen uit 30 voetcontainers bestaat. Wanneer de berekende gewichten van elk containertype toegepast worden op de 600 containers die voor het TLVP-model gebruikt zullen worden, zullen er 298 30-voetcontainers in de grootste 'instance' gebruikt worden. Een overzicht van het gewicht en aantal containers per type, volgt in onderstaande figuur C.

LENGTE						
Container type (voet)	Totaal aantal containers per type volgens instances TLP-model	Totaal aantal voet per type volgens instances TLP-model	Gewogen aantallen	Cumulatief	Totaal aantal containers per type bij TLVP-model met 600 containers (10d)	Totaal aantal voet per type bij TLVP-model met 600 containers (10d)
				0		
20'	1061	21220	0,149964664	0,149964664	90	1800
25'	337	8425	0,047632509	0,197597173	29	714
30'	3510	105300	0,496113074	0,693710247	298	8930
40'	371	14840	0,052438163	0,74614841	31	1259
45'	1796	80820	0,25385159	1	152	6854
<b>Controle:</b>	<b>7075</b>	<b>230605</b>	<b>1</b>		<b>600</b>	<b>19557</b>

Figuur C: Illustratie van de gewogen methode volgens 'instances' Heggen (2017) toegepast op 'instance 600'

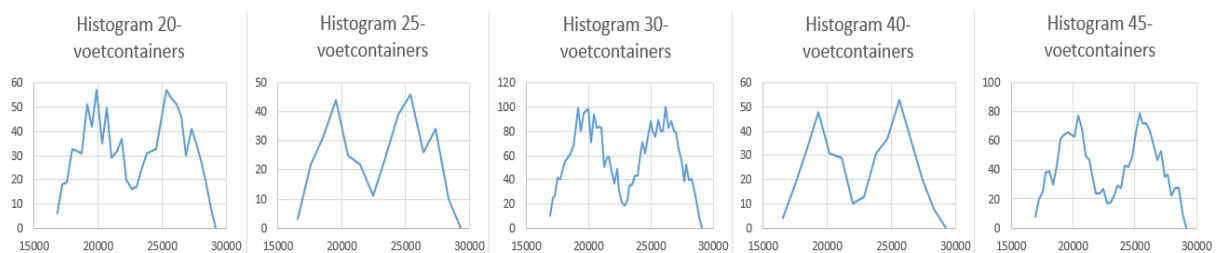
Tot slot werd ook de samenhang tussen beide variabelen - de correlatie - in kaart gebracht. Verrassend genoeg bleek er een negatieve relatie tussen het gewicht van een container en de lengte van diezelfde container te zijn. De correlatiecoëfficiënt bedraagt  $-0.005164773$  ofwel  $-0.5\%$  en is dus weliswaar heel miniem. Concreet betekent dit dat lengte en gewicht op een manier samenhangen waarbij een verhoging van het gewicht van een container, over het algemeen een zeer lichte verlaging in het type voetcontainer met zich meebrengt. Dit kan een verklaring zijn waarom het zwaarste containergewicht (28.999 kg) zich bevindt in het kleinste containertype (20 voet). Onderstaande afbeelding geeft omwille van dimensiebeperkingen geen gedetailleerd inzicht in de spreiding weer, maar maakt wel duidelijk welke containers voor de specifieke trafiek tussen België en Noord-Italië heel vaak gebruikt worden, en welke containers iets minder populair zijn. De 25'- en 40'-containers worden minder gebruikt ten opzichte van de andere drie types. De 20'- en 45'-containers vertonen kleine breuken in de correlatie, op figuur D weergegeven met oranje cirkels. De 30 voetcontainer is de populairste laadeenheid.



Figuur D: Illustratie van de correlatie tussen aantal containertypes en gewicht volgens 'instances' Heggen (2017)

Om aan de drie bovenvermelde criteria te voldoen zonder inbreuk te plegen op de statistische waarschijnlijkheidsdichtheidsfuncties, lijkt een handmatige toewijzing van containergewichten per containertype niet mogelijk. Bovendien blijkt uit bovenstaande correlatiefiguur dat er voor elk containertype heel veel uiteenlopende gewichten zijn. Een opsplitsing in gewichtsklassen lijkt dus noodzakelijk. Vandaar wordt ervoor gekozen om met de multi-paradigmaprogrammeertaal C++ te werken. In een eerste beknopte data-simulatie blijkt hieruit dat de gewichtsparemeters die volgen uit de boxplot, een te eenvoudige samenvatting van de 'instances' van Heggen (2017) vormen. De exacte waarden en de details van de distributie van resultaten worden bij een boxplot namelijk niet behouden. De vijfgetallensamenvatting die over de 7057 containers uitgevoerd werd, blijft echter wel gelden als norm. Om een grondige, meer gedetailleerde analyse van de dataset te verkrijgen, wordt er daarom gebruik gemaakt van een histogram. In een eerste stap werd een histogram van de containergewichten opgezet per type container. Bij elk van de vijf histogrammen zijn er twee duidelijke pieken zichtbaar, de eerste piek rond de 20 ton, de tweede rond de 25 ton. Doordat elke container een ander gewicht heeft, worden vervolgens nieuwe histogrammen opgesteld volgens onderverdeling van de gewichten in gewichtsklassen, zogenaamde 'bins'. Hiervoor werd opnieuw gebruik gemaakt van C++. Een histogram gemaakt met meer 'bins' bevat meer karakteristieken van

de distributie van gewichten, maar meer 'bins' resulteren bijgevolg in minder containers per 'bin'. Aangezien de inputdata van Heggen (2017) ook 'maar' een sample is, resulteren minder containers per 'bin' in een lagere nauwkeurigheid van het procentuele aantal containers dat in de gewichtsklassen van die 'bin' verwacht mag worden in realiteit. Vandaar werd de methode om het aantal 'bins' te bepalen in C++ wat aangepast om iets minder 'bins' te verkrijgen bij een grotere input-dataset, echter nog steeds meer 'bins' dan bij kleinere input-datasets. Hierdoor wordt de ruis die op elk van de vijf histogrammen zit, verkleind. Vervolgens werd het uiteindelijke aantal 'bins' berekend met een combinatie van beide beschreven methodes. De bijhorende histogrammen die volgens het aantal gewichtsklassen uit deze combi-methode voortvloeien, wordt in onderstaande figuur E weergegeven.



Figuur E: Illustratie van de histogrammen per containertype, verkregen door opdeling in gewichtsklassen via C++

Het opdelen van de data in elk van de containertypes, met aparte histogrammen per type, zorgt bij een simulatie automatisch voor de correcte correlatie tussen lengte en gewicht. Op die manier werd een eerste - statistisch correcte - simulatie in C++ uitgevoerd waarbij zo'n 3000 containers met specifiek gewicht (gecorrleerd met lengte) gegenereerd werden. Deze simulatie ontwikkelt dus containergewichten, per containertype (volgens lengte), op een 'random' wijze tussen het minimum en maximum gewicht (terug te vinden in de boxplotgegevens uit figuur B), met een kans gegeven door het histogram. Hierbij werd er bijgevolg steeds gestreefd naar een spreiding die zo goed mogelijk lijkt op de originele spreiding van de histogrammen uit figuur E.

Echter, om volgens dezelfde methode ook sets van respectievelijk 300, 400, 500 en 600 containers te genereren, kan het programma C++ niet gebruikt worden. Er zouden namelijk te veel 'random' gewichten gesimuleerd worden waarbij de optimale spreiding over de histogrammen van de containergewichten (figuur E) niet meer gevolgd kan worden. Bovendien krijgt het TLVP-model 3000 containers niet verwerkt. Het werken met kleinere 'instances' is dus noodzakelijk. De oplossingsmethode werkt namelijk exact en zoekt dus steeds naar de optimale oplossing. Bij grotere terminals, zoals bijvoorbeeld de tri-modale Antwerpse MPET-terminal ('MSC PSA European Terminal') met een beschikbare capaciteit van 9000 TEU containers, lijkt een simulatie in C++ volgens deze methode wel geschikt. Al zal het model dan wellicht op heuristische wijze moeten werken. Daar het onderzoek naar 'de impact van vooruitplannen in het intermodaal spoortransport' nog in zijn beginfase zit, wordt er in deze thesis louter gekeken naar de resultaten die voortvloeien uit de exacte oplossingsmethode, gebruik makend van respectievelijk 300, 400, 500 en 600 containers. Indien de downsampling - rekening houdend met een zo optimaal mogelijke spreiding over de histogrammen van de containergewichten - geslaagd zou zijn, is de input en bijgevolg ook de output die het model zal genereren, mathematisch en statistisch correct.

Om tot de gewenste downsampling te komen, werden de verkregen histogrammen (figuur E) opnieuw als vertrekpunt genomen. De 7075 containers - alreeds opgedeeld per type - worden van klein naar groot gesorteerd volgens gewicht (per containertype). Na deze opdeling, werden nummers toegekend van 0 tot en met  $n-1$ , waarbij 'n' het aantal containers van het specifieke type is. Een overzicht van het aantal containers per containertype kan teruggevonden worden in figuur C. Van alle 7075 containers behoren er bijvoorbeeld 1061 tot de 20 voetcategorie. De reële - niet noodzakelijk gehele - gewichtsgetallen  $x=(n-1)*i/(z-1)$  worden gegenereerd voor elke  $i$  van 0 tot en met  $z-1$ . 'Z' is hier de gevraagde samplegrootte voor het specifieke type container, 'n' is het aantal containers in de gegeven inputdata. Toegepast op de 20 voetcategorie voor de 'instance' bestaande uit 600 containers komt  $z$  overeen met 90 containers, opnieuw af te leiden uit figuur C. Deze reeks van 'z' getallen 'x' is uniform gespreid van 0 tot en met  $n-1$ . Voor elk getal 'x' in deze reeks wordt een sample container gemaakt volgens een bepaalde logica. Voor het getal  $x=0$  wordt de container met nummer 0 geselecteerd. Aangezien de containers per type gesorteerd werden volgens oplopend gewicht, is dit de container met het laagste gewicht van het specifieke type. Voor het getal  $x=n-1$  wordt de container met nummer  $n-1$  geselecteerd, zijnde de container met het hoogste gewicht van het specifieke type. Op die manier wordt er zeker voldaan aan het minimum en maximum van de volledige dataset, terug te vinden in de boxplot (figuur B). Voor de andere waarden  $x$  (tussen 0 en  $n-1$ ) wordt het gewicht lineair geïnterpoleerd tussen container  $a$  en container  $a+1$ , waarbij  $a$  zodanig gekozen is dat  $a \leq x < a+1$ . 'a' is met andere woorden de afronding van  $x$  naar beneden. De lineaire interpolatie gebeurt volgens de formule  $w1+(x-a)*(w2-w1)$  waarbij  $w1$  het gewicht is van containernummer  $a$  in de gesorteerde 'array' van containers, en  $w2$  het gewicht is van containernummer  $a+1$  in diezelfde array. Dit levert een sample op die vrij goed voldoet aan het histogram van de gewichten van de containers.

Kortom, om een 'optimale' spreiding te verkrijgen over de histogrammen uit figuur E zonder gebruik te maken van willekeurige containernummers, wordt elke container per containertype gesorteerd op gewicht om vervolgens één container per  $n$  containers uit de set te nemen, waarbij  $n$  berekend is om de gevraagde sample-grootte te verkrijgen. De getallen die zich tussen elk minimum en maximum per type bevinden, worden geschat via lineaire interpolatie en zijn bijgevolg statistisch correct.

## 6 Bibliografie

- Adolphy, R., Nicaise, M., & Counet, A. (2015). *Onderzoek naar de concurrentiepositie van het goederenvervoer per spoor in België*. Vlaamse overheid, Departement mobiliteit en openbare werken. Brussel: Vlaamse overheid, Departement mobiliteit en openbare werken. Opgeroepen op 10 23, 2019, van <http://docs.vlaamsparlement.be/pfile?id=1159278>
- Ambrosino, D., & Siri, S. (2015, 04 29). Models for Train Load Planning Problems in a container terminal. 13. doi:10.1007/978-3-319-04630-3\_2
- Belgianrail.be. (2015). *CO2-Emissies treinverkeer*. Saint-Gilles: Belgianrail. Opgeroepen op 10 07, 2019, van <http://www.belgianrail.be/nl/corporate/duurzaamheid/planet/~media/C6FAF258787F41FAB7A6CADDB409422D.ashx>
- Bostel, N., Dejax, P., Guez, P., & Tricoire, F. (2008). Multiperiodic planning and routing on a rolling horizon for field force optimization logistics. Opgeroepen op 03 21, 2020, van [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-77778-8\\_23](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-77778-8_23)
- Bruns, F. (2013, 09 07). Robust load planning of trains in intermodal transportation. 37. Opgeroepen op 11 18, 2019, van [https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect\\_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s00291-013-0341-8&casa\\_token=FFy2r9DZCuoAAAAA:oncXU1juaWI0PNFGCKVYsMoXpDTNrEKk5kgo3c07jI-v83dWTLafqQNI9aayTQgdfUVnLxShOOOwjFCAQ](https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s00291-013-0341-8&casa_token=FFy2r9DZCuoAAAAA:oncXU1juaWI0PNFGCKVYsMoXpDTNrEKk5kgo3c07jI-v83dWTLafqQNI9aayTQgdfUVnLxShOOOwjFCAQ)
- Bruns, F., & Knust, S. (2010, 12 23). Optimized load planning of trains in intermodal transportation. 23. Opgeroepen op 11 30, 2019, van <https://link-springer-com.bib-proxy.uhasselt.be/article/10.1007%2Fs00291-010-0232-1>
- Bruzz. (2014, 10 20). Vrachtvervoer goed voor kwart CO2-uitstoot. *Bruzz*. Opgeroepen op 11 12, 2019, van <https://www.bruzz.be/samenleving/vrachtvervoer-goed-voor-kwart-co2-uitstoot-2014-10-20>
- Bruzz. (2019, 10 14). Brussels vrachtverkeer meer impact op gezondheid dan gedacht. *Bruzz*. Opgeroepen op 11 12, 2019, van <https://www.bruzz.be/milieu/brussels-vrachtverkeer-meer-impact-op-gezondheid-dan-gedacht-2019-10-14>
- Byrne, R. (2013, 12 05). Transport prognose: nieuwe manier van plannen. *Logistiek.nl*. Opgeroepen op 10 12, 2019, van Logistiek.nl: [https://www.logistiek.nl/supply-chain/blog/2013/12/transport-prognose-nieuwe-maniem-van-plannen-101131684?vakmedianet-approve-cookies=1&\\_ga=2.266221519.1158087278.1570809827-1413927574.1570809827](https://www.logistiek.nl/supply-chain/blog/2013/12/transport-prognose-nieuwe-maniem-van-plannen-101131684?vakmedianet-approve-cookies=1&_ga=2.266221519.1158087278.1570809827-1413927574.1570809827)
- Caris, A., Janssens, G. K., Ramaekers, K., & Macharis, C. (2014, 05 28). Assessment of the impact of an additional intermodal barge terminal on a waterway network. 8. Opgeroepen op 03 01, 2020, van <https://www.researchgate.net/publication/228967279>

- Caris, A., Macharis, C., & Janssens, G. K. (2008). Planning Problems in Intermodal Freight Transport: Accomplishments and Prospects. 27.  
doi:<https://doi.org/10.1080/03081060802086397>
- Chen, C.-C., & Chang, W.-J. (2017). A simulation-based dispatching decision support system for disruptions management at intermodal freight terminals under multiple uncertainties. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 14.  
doi:<https://doi.org/10.11175/easts.12.991>
- (sd).Container carrier. *Sgns(s) 60' | I41.060D*. VTG wagon hire. Opgeroepen op 03 22, 2020, van <https://www.vtg.com/wagon-hire/our-fleet/i41060d>
- Cordeau, J.-F., Dell'Amico, M., Falavigna, S., & Iori, M. (2015, 03 22). A rolling horizon algorithm for auto-carrier transportation. 13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.02.009>
- Corry, P., & Kozan, E. (2005, 03 23). An assignment model for dynamic load planning. 17.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.05.013>
- Corry, P., & Kozan, E. (2007, 11 24). Optimised loading patterns for intermodal trains. 30.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.05.013>
- De Morgen. (2017, 02 1). Uitstoot transportsector daalt niet voor 2050. *De Morgen*. Opgeroepen op 11 10, 2019, van <https://www.demorgen.be/tech-wetenschap/uitstoot-transportsector-daalt-niet-voor-2050~b686115b/>
- De Morgen. (2018, 12 27). Nieuw record: maar liefst 925.000 uur file in 2018. *De Morgen*. Opgeroepen op 11 9, 2019, van <https://www.demorgen.be/nieuws/nieuw-record-maar-liefst-925-000-uur-file-in-2018~bb286217/>
- De Vlieger, I., Gusbin, D., Hoornaert, B., Mayeres, I., Michiels, H., Vandresse, M., & Vanhulsel, M. (2012). *De milieu-impact van de evolutie van de transportvraag tegen 2030*. Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek, Federaal planbureau. Brussel: Federaal planbureau. Opgeroepen op 10 23, 2019, van [https://www.plan.be/admin/uploaded/201209181441060.WP\\_1211\\_10320\\_N.pdf](https://www.plan.be/admin/uploaded/201209181441060.WP_1211_10320_N.pdf)
- Dimitriadis, A., Shah, N., & Pantelides, C. (1997, 05 20). RTN-based Rolling Horizon Algorithms for Medium Term Scheduling of Multipurpose Plants. 6. doi:[https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(97\)87643-0](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(97)87643-0)
- Europese Commissie. (2011). *Stappenplan voor een interne Europese vervoersruimte – werken aan een concurrerend*. Brussel. Opgeroepen op 11 14, 2019, van <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:NL:PDF>
- Europese Commissie. (2018, 11 28). *The Commission calls for a climate neutral Europe by 2050*. Opgeroepen op 10 08, 2019, van European Commission: [https://ec.europa.eu/clima/news/commission-calls-climate-neutral-europe-2050\\_nl](https://ec.europa.eu/clima/news/commission-calls-climate-neutral-europe-2050_nl)
- Europese Commissie. (2019). *Mobility and transport*. Opgeroepen op 10 08, 2019, van European Commission: [https://ec.europa.eu/transport/modes/rail/interoperability/safety\\_en](https://ec.europa.eu/transport/modes/rail/interoperability/safety_en)

- Evofenedex. (sd). *Evofenedex*. Opgeroepen op 11 14, 2019, van Evofenedex:  
<https://www.evofenedex.nl/kennis/vervoer/spoorvervoer-vervoer-over-het-spoor>
- Eye, A. v. (2008). Fractional Factorial Designs in the Analysis of Categorical Data. 43. Opgeroepen op 03 27, 2020, van  
<https://pdfs.semanticscholar.org/d759/e93d084ada161e412ad461374f2644a72818.pdf>
- Feo, T., & Gonzalez-Velarde, J. L. (1995, 11 04). The intermodal trailer Assignment Problem. 12. Opgeroepen op 03 05, 2020, van  
<https://uha.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link?t=1583432362491>
- Flows. (2015, 09 21). Centraal Boekingsplatform begin januari operationeel (update). *Flows.be*. Opgeroepen op 10 13, 2019, van Flows.be: <https://www.flows.be/nl/shipping/centraal-boekingsplatform-begin-januari-operationeel-update>
- Gérard, G., Struyf, E., Sys, C., Voorde, E. V., & Vanelslander, T. (2015, 04). Congestiekost voor wegvervoer: ontwikkeling generiek. 77. Opgeroepen op 11 12, 2019, van  
<https://repository.uantwerpen.be/docman/irua/687b35/7c1359d6.pdf>
- Heggen, H. (2014, 05 26). Laadplanning van treinen in intermodaal transport. 76. Opgeroepen op 11 28, 2019, van <http://hdl.handle.net/1942/17293>
- Heggen, H. (2017). A multi-objective approach for intermodal train load planning. 26. doi:<https://doi.org/10.1007/s00291-017-0503-1>
- Heggen, H. (2019). Intermodal Container Routing: Integrating Long-Haul Routing and Local Drayage Decisions. 7. Opgeroepen op 10 10, 2019, van  
[https://www.researchgate.net/publication/331856182\\_Intermodal\\_Container\\_Routing\\_Integrating\\_Long-Haul\\_Routing\\_and\\_Local\\_Drayage\\_Decisions](https://www.researchgate.net/publication/331856182_Intermodal_Container_Routing_Integrating_Long-Haul_Routing_and_Local_Drayage_Decisions)
- Heggen, H., Braekers, K., & Caris, A. (2014). Analyzing the practical use of load planning models in intermodal rail transport. (H. U. Logistics, Red.) 7. Opgeroepen op 12 07, 2019, van  
[https://pdfs.semanticscholar.org/aabe/4b15ee6e034a448623870ce0a619969937fd.pdf?\\_ga=2.139607216.2053338359.1575725387-159243500.1575370110](https://pdfs.semanticscholar.org/aabe/4b15ee6e034a448623870ce0a619969937fd.pdf?_ga=2.139607216.2053338359.1575725387-159243500.1575370110)
- Heggen, H., Braekers, K., & Caris, A. (2017). A multi-objective approach for intermodal train load planning. 26. doi:<https://doi.org/10.1007/s00291-017-0503-1>
- Heinen, K. (2019, 07 31). Alfaport-Voka: "Extra spoorinfrastructuur nodig voor modal shift". *Flows.be*. Opgeroepen op 10 12, 2019, van <https://www.flows.be/nl/transport/voka-alfaport-extra-spoorinfrastructuur-nodig-voor-modal-shift>
- (sd).HO & OO spoor. *Goederenwagen Doppeltraggwagen Tankcontainer van den Bosch AAE*. Modelbahnunion. Opgeroepen op 03 22, 2020, van <https://www.modellbahnunion.com/HO-OO-spoor/Goederenwagen-Doppeltraggwagen-Tankcontainer-van-den-Bosch-AAE.htm?shop=dm-toys-nl&SessionId=&a=article&ProdNr=Roco-76928&p=802>
- International Energy Agency. (2019). *World Energy Outlook 2018*. Paris: International Energy Agency. Opgeroepen op 10 08, 2019, van <https://www.iea.org/weo2018/scenarios/>



- Klimaat.be. (2019). *Klimaatverandering: Belgische uitstoot*. Opgeroepen op 10 07, 2019, van Klimaat.be: <https://www.klimaat.be/nl-be/klimaatverandering/belgie/belgische-uitstoot/belangrijkste-sectoren>
- Kostina, A., Guillén-Gosálbeza, G., Meleb, F., Bagajewicz, M., & Jiménez, L. (2011, 04 22). A novel rolling horizon strategy for the strategic planning of supply chains. Application to the sugar cane industry of Argentina. 24.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.04.006>
- Lauwers, D. (2017). Onze stad: inspiratie voor de stad van morgen. 8. Opgeroepen op 11 14, 2019, van <https://biblio.ugent.be/publication/8533589/file/8536999>
- Macharis, C., Pekin, E., & Rietveld, P. (2011). Location Analysis Model for Belgian Intermodal Terminals: towards an integration of the modal choice variables. *ScienceDirect*, 11.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.013>
- Mayeres, I. (2008). Langetermijn vooruitzichten van transport in België: Referentiescenario en twee beleidsscenario's. (F. planbureau, Red.) *Federale Overheidsdienst Mobiliteit en Vervoer*, 33. Opgeroepen op 11 9, 2019, van [https://www.plan.be/admin/uploaded/200807171026550.wp200812\\_nl.pdf](https://www.plan.be/admin/uploaded/200807171026550.wp200812_nl.pdf)
- Mayeres, I., & Proost, S. (2004, 11). Een beter prijsbeleid voor de Belgische transportsector in 15 stellingen. 29. Opgeroepen op 11 12, 2019, van <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/420360>
- Meeuwissen, I. (2005). Multimodaal goederenvervoer: bij optimaal gebruik bespaart u kosten. *Inkoop en uitbesteden*, 70. Opgeroepen op 11 14, 2019, van [http://www.meuwissen-design.nl/publicaties/artikel\\_multimodaal\\_vervoer.pdf](http://www.meuwissen-design.nl/publicaties/artikel_multimodaal_vervoer.pdf)
- Morrisona, D., Jacobson, S., Sauppe, J., & Sewell, E. (2016, 02). Branch-and-bound algorithms: A survey of recent advances in searching, branching, and pruning. 25.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.disopt.2016.01.005>
- Paquete, L., Stützle, T., & Schiavinotto, T. (2007, 09). On local optima in multiobjective combinatorial optimization problems. 19. doi:10.1007/s10479-007-0230-0
- Powell, W., & Carvalho, T. (1998, 02 06). Dynamic Control of Logistics Queueing Networks for large-scale fleet management. 43.  
doi:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.39.422&rep=rep1&type=pdf>
- Rail Freight Forward. (2019). *Rail freight companies fighting for more freight on rails*. Opgeroepen op 14 11, 2019, van Rail Freight Forward: <https://www.railfreightforward.eu/about-rail-freight-forward>
- Rail Freight Forward. (2019, 04 16). Rail Freight Forward - Image video. Opgeroepen op 14 11, 2019, van <https://www.youtube.com/watch?v=6l-RsjSiqo0>
- Santens, T. (2019, 12 11). *Europa stelt Green Deal voor: klimaatwet moet CO2-regels vastleggen, 1 miljoen laadpalen en meer renovatie*. (Vrtnews, Redacteur) Opgeroepen op 12 11, 2019, van Vrtnews.be: <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2019/12/11/europese-green-deal/>

- ScienceDirect. (sd). *ScienceDirect*. Opgeroepen op 03 27, 2020, van Factorial Design:  
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/factorial-design>
- Sociaal Economische Raad van Vlaanderen. (sd). *Klimaat en transport in Vlaanderen*. Opgeroepen op 11 12, 2019, van  
[https://www.serv.be/sites/default/files/documenten/Klimaat\\_Transport\\_Vlaanderen.pdf](https://www.serv.be/sites/default/files/documenten/Klimaat_Transport_Vlaanderen.pdf)
- Spiryagin, M., Wolfs, P., Cole, C., Spiryagin, V., Quan Sun, Y., & McSweeney, T. (2016). Design of Mechanical Systems of Locomotives. In P. W. Maksym Spiryagin, *Design and Simulation of Heavy Haul Locomotives and Trains*. London, United Kingdom: CRC Press.  
doi:10.1201/9781315369792-4
- Steenken, D. (2004). Container terminal operation and operations research – a classification and literature review. 47. doi:10.1007/s00291-003-0157-z
- Steer Davies Gleave. (2015). *Freight on road: Why EU shippers prefer truck to train*. Brussel: European Union. Opgeroepen op 10 08, 2019, van  
[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/540338/IPOL\\_STU\(2015\)540338\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/540338/IPOL_STU(2015)540338_EN.pdf)
- Temmerman, S. L. (2016). *Ongevallen met vrachtwagens – Fase 1 – Omvang van het probleem, literatuurstudie, analyse van ongevalgegevens en enquête*. Belgisch Instituut voor de Verkeersveiligheid, Kenniscentrum Verkeersveiligheid. Brussel: Belgisch Instituut voor de Verkeersveiligheid – Kenniscentrum Verkeersveiligheid. Opgeroepen op 11 12, 2019, van  
[https://www.vias.be/publications/Ongevallen%20met%20vrachtwagens%20%E2%80%93%20Fase%201/Ongevallen\\_met\\_vrachtwagens\\_%E2%80%93\\_Fase\\_1.pdf](https://www.vias.be/publications/Ongevallen%20met%20vrachtwagens%20%E2%80%93%20Fase%201/Ongevallen_met_vrachtwagens_%E2%80%93_Fase_1.pdf)
- Tricoire, F. (2012, 03 27). Multi-Directional local search. 13.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.03.010>
- Vias. (sd). *De mobiliteit in België, 10 blikvangers*. Opgeroepen op 10 11, 2019, van Vias:  
<https://www.vias.be/nl/newsroom/de-mobiliteit-in-belgie-10-blikvangers/>
- Vlaams Parlement. (sd). *Beleidsnota 2014-2019*. De Vlaamse Overheid, Brussel. Opgeroepen op 11 10, 2019, van  
[https://www.vlaamsehavencommissie.be/sites/default/files/documenten/Beleidsnota\\_2014\\_2019\\_Mobiliteit\\_en\\_Openbare\\_Werken\\_Minister\\_Weyts.pdf](https://www.vlaamsehavencommissie.be/sites/default/files/documenten/Beleidsnota_2014_2019_Mobiliteit_en_Openbare_Werken_Minister_Weyts.pdf)
- Vlaamse milieumaatschappij. (2019, 03 19). *Emissies broeikasgassen*. Opgeroepen op 11 28, 2019, van vmm.be: <https://www.vmm.be/data/uitstoot-broeikasgassen>
- Vlaamse milieumaatschappij. (2019). *Jaarrapport Lucht – Effecten van luchtvervuiling op gezondheid en ecosystemen*. Bernard De Potter, Vlaamse Milieumaatschappij. Opgeroepen op 11 12, 2019, van  
[http://www.serv.be/sites/default/files/documenten/Klimaat\\_Transport\\_Vlaanderen.pdf](http://www.serv.be/sites/default/files/documenten/Klimaat_Transport_Vlaanderen.pdf)