

Rittenplanning in multimodaal transport

Martine Jansen

promotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

co-promotor :
dr. An CARIS

WOORD VOORAF

Deze masterproef kadert in mijn opleiding Handelsingenieur in de Toegepaste Economische Wetenschappen aan de Universiteit Hasselt. Ik heb gekozen voor het onderwerp 'Rittenplanning in multimodaal transport', dat nauw aansluit bij mijn afstudeerrichting operationeel management en logistiek. Graag zou ik een woord van dank richten aan een aantal personen die mij hebben bijgestaan in het voltooien van deze masterproef.

Eerst en vooral zou ik mijn promotor Dr. K. Ramaekers willen bedanken voor haar begeleiding en deskundige raad tijdens de totstandkoming van dit werkstuk. Ik wil haar ook graag bedanken voor het aanbrenge van het onderwerp van deze masterproef. Het praktijkgedeelde van dit werk heeft mijn interesse en enthousiasme omtrent rittenplanning en de logistieke wereld zeker kunnen opwekken.

Bijzondere dank gaat uit naar mijn co-promotor, Dr. A. Caris, voor haar doeltreffende begeleiding. Ik wil haar bedanken voor het geduld dat ze opbracht bij het beantwoorden van vele vragen.

Vervolgens wil graag mijn oprechte dank betuigen aan mijn ouders. Zij maakten het mogelijk deze studies te voltooien en vormden gedurende mijn opleiding een bron van steun en toeverlaat.

Om af te sluiten zou ik graag mijn vrienden willen bedanken, omdat zij steeds een luisterend oor konden bieden in moeilijke tijden.

SAMENVATTING

De laatste jaren is het Belgisch transportsysteem in toenemende mate onderhevig aan verschillende beperkingen. Door de snelle opkomst van het goederenvervoer - vooral wegtransport - belemmeren lange files en wachttijden dagelijks een vlot transport op ons wegennetwerk. Ook de toegankelijkheid van economisch belangrijke centra gaat erop achteruit. Als laatste is er de actuele kwestie van de steeds toenemende negatieve impact van transport op het milieu.

Een oplossing voor al deze problemen kan gevonden worden in het verminderen van het gebruik wegtransport. Het spoorwegvervoer en de binnenvaart, maar ook maritiem transport en luchtvaartvervoer kunnen als alternatieven voor wegtransport gerekend worden. Aangezien niet alle bedrijven gelegen zijn aan een kanaal of spoorweg, kan het begrip 'multimodaal transport' hier een oplossing bieden. Multimodaal transport omvat de combinatie van verschillende transportmodi, waarbij het voor- en natransport meestal via de weg gebeurt en tussenin goederen gebundeld worden om met de trein of het binnenvaartschip getransporteerd te worden. Multimodaal transport biedt ons kansen om te profiteren van de voordelen uit de combinatie van verschillende systemen en terzelfde tijd de nadelen te minimaliseren. Als de verschillende modi goed op mekaar zijn afgestemd, multimodale terminals over de juiste uitrusting beschikken en transfers optimaal gebeuren, kan dit niet enkel leiden tot een kostenreductie, maar ook tot de vermindering van de uitlaatgassen, het energieverbruik en de congestie op ons wegennet. Een betere verkeersveiligheid en een manier om zorgvuldiger om te gaan met het gebruik van land, zijn andere mogelijke voordelen van het gebruik van meerdere transportmodi.

Hoofdstuk 1 omvat een situering van het praktijkprobleem en een formulering van de verschillende onderzoeksvragen. Een grondige literatuurstudie zal van start gaan in hoofdstuk 2, waar er ingegaan wordt op de verschillende aspecten van multimodaal transport. De financiële aspecten beoogen het onderscheid tussen variabele en vaste kosten van de verschillende transportmodi. De opkomst van schaalvoordelen door bundeling van goederenstromen komt hier ook aan bod. Daarna zullen organisatorische en technische aspecten kort besproken worden. Hierin komen vervoersmiddelen en vervoersdragers aan bod, zowel als de verschillende actoren bij multimodaal transport.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 het rittenplanningsprobleem beschreven, aan de hand van reeds uitgevoerde studies omtrent deze materie. Verschillende probleemkenmerken, zoals het netwerk, de doelstelling, tijdsvensters, de kostenfunctie en capaciteitsbeperkingen worden er uitvoerig beschreven. De meest voorkomende oplossingen in de rittenplanningsliteratuur worden daarna uitgelegd. Deze worden opgesplitst in exacte oplossingsmethoden, kortste pad algoritmen en heuristieken. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er reeds veel onderzoek verricht is omtrent het onderwerp rittenplanning met multimodaal transport. Echter, de meeste studies belichten slechts een deel van het totale probleem. Zo wordt vaak slechts één doelstelling nagestreefd, schaalvoordelen worden niet altijd in rekening gebracht of tijdsvensters worden buiten beschouwing gehouden. Vervolgens wordt een duidelijk overzicht van de reeds bestaande oplossingsmethoden betreffende rittenplanning met meerdere transportmodi gegeven. Deze worden onderverdeeld in exacte algoritmen, kortste pad algoritmen en heuristieken.

Hoofdstuk 4 omvat het praktijkgedeelte van dit werk. Eerst wordt een multimodaal netwerk beschreven, aan de hand van negen knooppunten, vijftien verbindingen, tijdsvensters, bedieningstijden, capaciteiten, geschematiseerde vertrektijden en een getrapte lineaire concave kostenfunctie. Vervolgens zal voor een goederenpakket van vier goederenstromen een enumeratie gegeven worden van mogelijke oplossingen. Voor achttien combinaties van mogelijke paden zal een doelfunctiewaarde berekend worden, waarin kostenminimalisatie en tijdsminimalisatie gecombineerd worden door middel van relatieve gewichten.

Een volgende stap is het voorstellen van een heuristiek voor kostenminimaliserende problemen en een heuristiek voor tijdsgerichte problemen. Beide heuristieken zullen dan eerst op het eerdere netwerk getest worden, om de aannemelijkheid van de heuristieken te testen. Aangezien de heuristieken gebaseerd zijn op dit eerder netwerk, is een toetsing ervan geen goed bewijs voor de efficiëntie van de methodieken. Daarom zal er een nieuw netwerk geformuleerd worden, met andere knooppunten, verbindingen, reistijden, capaciteiten, tijdsvensters en kosten. Eerst worden de doelfunctiewaarden van acht combinaties van paden berekend. Vervolgens worden beide heuristieken getest op dit netwerk. Uit deze testfase kan uiteindelijk besloten worden dat de voorgestelde heuristieken voor kleine problemen met één doelstelling, ofwel kostenminimalisatie ofwel tijdsminimalisatie, op een snelle en eenvoudige manier tot een goede oplossing leiden.

Deze masterproef zal in een vijfde en laatste hoofdstuk afgesloten worden met conclusies. Hier zal er een bondig antwoord geformuleerd worden op de verschillende onderzoeksvragen uit het eerst hoofdstuk. Algemene conclusies en conclusies rond het praktijkgedeelde komen vervolgens kort aan bod om te kunnen eindigen met enkele aanbevelingen voor verder onderzoek.

INHOUDSOPGAVE

Woord Vooraf.....	II
Samenvatting.....	III
Inhoudsopgave.....	VI
1. Probleemstelling en werkwijze.....	- 1 -
1.1 Praktijkprobleem.....	- 1 -
1.2 Centrale onderzoeksvraag.....	- 2 -
1.3 Deelvragen.....	- 2 -
1.4 Onderzoeksopzet.....	- 3 -
1.5 Verdere opbouw.....	- 3 -
2. Multimodaal transport.....	- 4 -
2.1 Inleiding.....	- 4 -
2.2 Financiële aspecten.....	- 5 -
2.3 Technische aspecten.....	- 7 -
2.4 Organisatorische aspecten.....	- 8 -
2.5 Kadering in onderzoek.....	- 9 -
3. Het rittenplanningsprobleem.....	- 11 -
3.1 Omschrijving.....	- 11 -
3.2 Probleemkenmerken.....	- 13 -
3.2.1 Netwerk.....	- 14 -
3.2.2 Beslissingsvariabelen.....	- 17 -
3.2.3 Doelstelling.....	- 17 -
3.2.4 Tijdsvensters.....	- 20 -
3.2.5 Capaciteitsbeperkingen.....	- 21 -
3.2.6 Kostenfunctie.....	- 23 -
3.2.7 Behoud van de goederenstroom.....	- 25 -
3.3 Oplossingsmethoden.....	- 26 -
3.3.1 Exacte oplossingsmethoden.....	- 26 -
3.3.2 Kortste pad algoritmen.....	- 27 -
3.3.3 Heuristieken.....	- 28 -

4. Praktijkstudie	- 31 -
4.1 Beschrijving netwerk	- 31 -
4.2 Kostenfunctie.....	- 35 -
4.3 Enumeratie van mogelijke oplossingen.....	- 37 -
4.3.1 Optimale oplossing per goederenstroom.....	- 38 -
4.3.2 Een oplossing voor het gehele goederenpakket	- 43 -
4.3.3 Gesplitste goederenstromen.....	- 46 -
4.4 Beschrijving heuristiek	- 47 -
4.4.1 Heuristiek voor kostgerichte problemen	- 47 -
4.4.2 Toepassing heuristiek op voorbeeld.....	- 48 -
4.4.3 Heuristiek voor tijdsgerichte problemen.....	- 53 -
4.4.4 Toepassing heuristiek op voorbeeld.....	- 54 -
4.5 Toepassing heuristiek op ander rittenplanningsprobleem	- 57 -
4.5.1 Netwerk.....	- 58 -
4.5.2 Goederenstromen	- 59 -
4.5.3 Kostenfunctie	- 60 -
4.5.4 Enumeratie van mogelijke oplossingen	- 62 -
4.5.5 Toepassing heuristiek voor kostengerichte problemen	- 63 -
4.5.6 Toepassing heuristiek voor tijdsgerichte problemen.....	- 67 -
4.6 Conclusie praktijkstudie	- 69 -
5. Conclusies.....	- 71 -
5.1 Resultaten.....	- 71 -
5.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	- 72 -
Lijst van geraadpleegde werken	- 74 -
Lijst van tabellen	- 77 -
Lijst van Figuren.....	- 78 -
Bijlagen.....	- 79 -

1. PROBLEEMSTELLING EN WERKWIJZE

1.1 PRAKTIJKPROBLEEM

De essentie van een rittenplanningsprobleem in multimodaal transport bestaat uit het opbouwen van een verzameling van routes waarin verschillende transportmodi gecombineerd worden. De opkomst van containerisatie heeft dit soort transport economisch haalbaar gemaakt.

Deze eindverhandeling voert een onderzoek uit naar de verschillende rittenplanningsmethoden met een multimodaal karakter. Daarnaast zal er getracht worden een heuristiek te vinden voor rittenplanningsproblemen in multimodaal vervoer met verscheidene beperkingen. Deze beperkingen kunnen bijvoorbeeld tijdsvensters zijn. Ook limieten op de maximale ladingen kunnen hier aan bod komen. Er moet hier opgemerkt worden dat dit werk zich specifiek zal toespitsen op het goederenvervoer.

Mobiliteit is essentieel voor onze samenleving. Ons hedendaags transportsysteem heeft de laatste jaren te kampen met verschillende problemen. Ons wegennetwerk kent dagelijks steeds langere files en wachttijden. Dit komt ondermeer door een snelle opkomst van het goederenvervoer. Ook de toegankelijkheid van economisch belangrijke centra verslechtert en er is sprake van een steeds toenemende negatieve impact op het milieu.

De opkomst van multimodaal transport kan deze problemen deels oplossen. De combinatie van verschillende transportmodi biedt ons kansen om te profiteren van de voordelen uit de verschillende systemen en terzelfde tijd de nadelen te minimaliseren. Als de verschillende modi goed op mekaar zijn afgestemd, multimodale terminals over de juiste uitrusting beschikken en transfers optimaal gebeuren, kan dit leiden tot een kostenreductie. Een stijging in de competitiviteit van ons logistiek apparaat zal op zijn beurt leiden tot een meer aantrekkelijk logistiek Limburg en Vlaanderen.

(Brewer, Button, & Hensher, 2001; Van Nes, 2002; Meuwissen; IBBT)

1.2 CENTRALE ONDERZOEKSVRAAG

In dit onderzoek zal met behulp van technieken van het operationeel onderzoek getracht worden een heuristiek te vinden voor rittenplanning met meerdere transportmodi. Er zal dus onderzocht worden hoe je zo goed mogelijk verschillende ritten kan plannen, waarbij meerdere vervoersmiddelen gebruikt worden. Op dit probleem kunnen meerdere beperkingen van toepassing zijn zoals tijdsvensters en ladingscapaciteiten, die apart zullen uitgewerkt worden. De centrale onderzoeksvraag is bijgevolg: *"Welke heuristiek kan gebruikt worden voor een bijna optimale rittenplanning van goederentransport met meerdere transportmodi te bekomen?"*

1.3 DEELVRAGEN

Het onderzoek zal van start gaan met een grondige literatuurstudie. De begrippen rittenplanning en multimodaal transport zullen hier aan bod komen. Ook zal er onderzocht worden in welke mate al studies gedaan zijn over deze materie. De eerste deelvraag van het onderzoek luidt: *"Welke studies zijn reeds gevoerd in verband met rittenplanning in multimodaal transport, met andere woorden, welke modellen en oplossingsmethoden worden in de wetenschappelijke literatuur voorgesteld voor ritten te plannen in een multimodale omgeving?"*

Daarna zal getracht worden een formulering op te stellen voor een kleinschalig optimalisatieprobleem. Deze formulering zal de vorm hebben van een minimalisatie of maximalisatie van een bepaalde doelfunctie, samen met een aantal beperkingen waaraan de optimale oplossing moet voldoen. De betreffende deelvraag is de volgende: *"Hoe kan een formulering voor rittenplanning in multimodaal transport opgesteld worden om tot een efficiënte oplossing te leiden?"*

Ten slotte wordt er getracht om voor het reeds geformuleerde probleem een heuristiek te bedenken die tot een bijna optimale planning van het goederentransport leidt in een korte tijdsperiode. Dit zal gebeuren met behulp van methodieken uit operationeel onderzoek. De laatste deelvraag wordt als volgt geformuleerd: *"Welke heuristiek zou een*

bijna optimale oplossing kunnen bieden voor een rittenplanningsprobleem dat gebruikt maakt van meerdere transportmodi?

1.4 ONDERZOEKSOPZET

Het onderzoek zal van start gaan met een grondige literatuurstudie rond de begrippen rittenplanning en multimodaal transport. Ook reeds bestaande studies aangaande deze materie zullen verkend worden en getoetst aan de slaagkansen op West-Europees grondgebied. Als de gehele terminologie op papier staat zal er overgegaan worden tot het uitvoeren van een praktijkgericht onderzoek. Aan de hand van de bestaande technieken van het operationeel onderzoek zal er getracht worden een heuristiek te bekomen die tot een bijna optimale rittenplanning in een multimodale omgeving zal leiden.

1.5 VERDERE OPBOUW

Deze masterproef wordt als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 en 3 omvatten de volledige literatuurstudie. Eerst wordt er dieper in gegaan op de kenmerken van multimodaal transport. Vervolgens wordt het rittenplanningsprobleem omschreven, de probleemkenmerken worden uitgediept en verschillende oplossingsmethoden uit de literatuur worden omschreven. In hoofdstuk 4 volgt dan het eigenlijke onderzoek van deze masterproef, waarbij een probleem gedefinieerd wordt. Hier wordt een heuristiek voorgesteld voor dit probleem. In hoofdstuk 5 zal afgesloten worden met een conclusie.

2. MULTIMODAAL TRANSPORT

2.1 INLEIDING

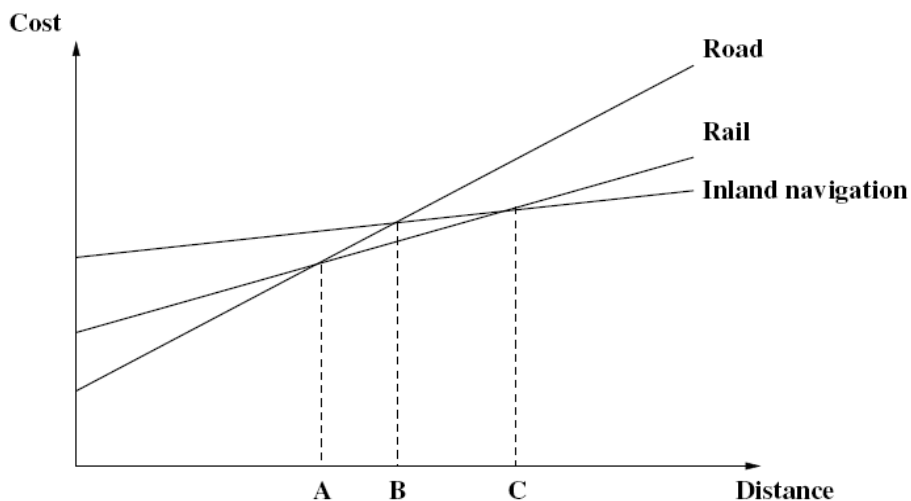
Multimodaal vervoer is geen nieuwe vervoerstechniek. Maar door een hevige opkomst van de aandacht voor de impact op het milieu door onze economie, krijgt multimodaal goederentransport de laatste jaren steeds meer aandacht. Multimodaal transport biedt een vermindering van de uitlaatgassen, het energieverbruik en de congestie op ons wegennet, een betere verkeersveiligheid en een manier om zorgvuldiger om te gaan met het gebruik van land. Het kan dus een manier bieden aan bedrijven om zich in een positief daglicht te plaatsen in onze maatschappij en zo meer klanten maar, ook gemotiveerde werknemers aan te trekken.

De Conferentie van Europese Ministers van Transport (2001) definiëren multimodaal transport als volgt: "het verplaatsen van een ge-unitiseerde vracht goederen, waarbij gebruik gemaakt wordt van twee of meer transportmodi, zonder dat de goederen behandeld worden tijdens het wisselen van modus". De Conferentie van Europese Ministers van Transport maakt ook nog een onderscheid tussen gecombineerd vervoer en multimodaal vervoer. Ze definiëren gecombineerd vervoer als volgt: "een traject, waarvan het grootste deel wordt afgelegd per spoor-, kust- of binnenvaart en waarbij het aanvullend voor- of natransport over de weg zo kort mogelijk is." In de meeste studies en ook in dit werk, wordt hier geen onderscheid tussen gemaakt. (Barnhart & Laporte, 2007)

Er kan ook nog een verschil gemaakt worden tussen multimodaal goederentransport en intermodaal goederentransport. Het onderscheid schuilt in het feit dat bij multimodaal goederentransport enkel de lading overschakelt tussen transportmodi. Bijvoorbeeld een lading goederen die van de vrachtwagen los in een binnenvaartschip worden gestort. Terwijl bij intermodaal transport de ladingdrager mee overschakelt op een andere transportmodus. De lading bevindt zich hier in een eenheidscontainer. In de meeste literatuur worden de twee begrippen echter door elkaar gebruikt. Vandaar dat er in dit werk ook geen onderscheid zal gemaakt worden tussen de twee.

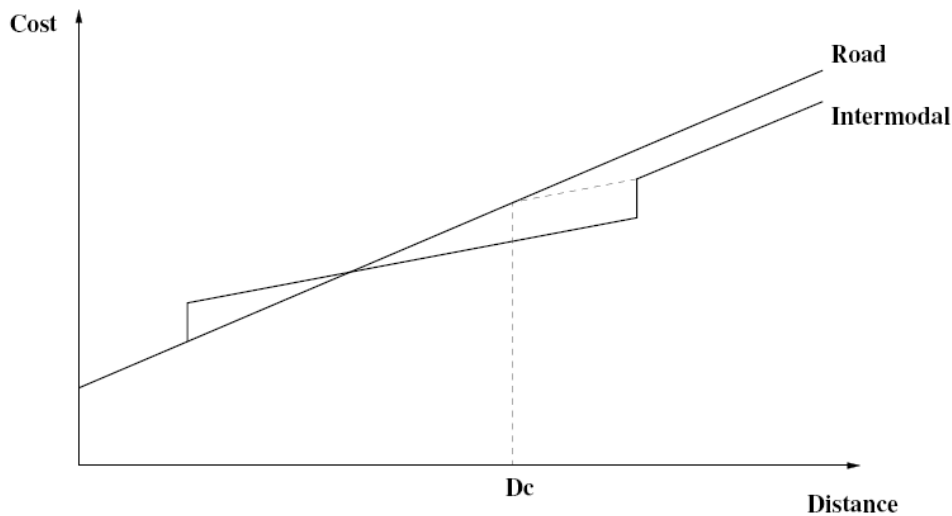
2.2 FINANCIËLE ASPECTEN

Kosten blijven de voornaamste drijfveer voor het invoeren van multimodaal transport. Zoals te zien is op onderstaande grafiek, bestaan de kosten van de verschillende transportmodi uit een deel vaste en een deel variabele kosten. Vaste kosten zijn kosten die gerelateerd kunnen worden aan de te transporteren afstand. De vaste kosten betreffen de onderhouds- en werkingskosten van transportfaciliteiten. Vaste kosten kunnen bijvoorbeeld kosten voor infrastructuur of het bouwen en onderhouden van terminals, havens en spoorwegstations inhouden. Variabele kosten zijn de kosten die afhankelijk zijn van het te transporteren volume. Voorbeelden zijn brandstofkosten en lonen.



FIGUUR 1 : VASTE EN VARIABELE KOSTEN VAN WEGTRANSPORT, SPOORWEGTRANSPORT EN BINNENVAART (BRON: MACHARIS EN VERBEKE, 1999)

Zoals men kan zien op de grafiek zijn de vaste kosten het laagst bij het wegtransport, iets hoger voor spoorwegvervoer en het hoogst in de binnenvaart. Voor verschepping per zeeschip en vliegtuig zouden deze vaste kosten nog veel hoger zijn. De variabele kosten zijn bij wegtransport zeer hoog, aangezien dit zeer arbeidsintensief is, relatief veel brandstof verbruikt en een vrij lage capaciteit heeft. Bij spoor- en binnenvaartvervoer zijn de kosten voor infrastructuur veel hoger. Op de grafiek zien we dat vanaf punt A spoorwegvervoer voordeliger is en vanaf punt C transport via de binnenvaart het meest economisch is.



FIGUUR 2 : KOSTEN VAN TRANSPORT (BRON: MACHARIS EN VERBEKE, 1999)

Op bovenstaande figuur is te zien dat multimodaal transport kan genieten van een lagere variabele kost van het hoofdtransport. Hier zijn dan ook de schaalvoordelen terug te vinden, die de belangrijkste drijfveer zijn om multimodaal transport toe te passen. De kosten van overslag van een vrachtwagen op een treinwagon of binnenvaartschip en op het einde van de rit terug naar vrachtwagen, verhogen de totale kost van het intermodale transport. Dit is ook de reden dat transport slechts competitief is vanaf een bepaalde drempelafstand (D_c). Hoe langer de afstand afgelegd op de hoofdlijn of 'trunk line', hoe meer er kan genieten worden van schaalvoordelen. Schaalvoordelen treden op als de output meer toeneemt dan de input, met andere woorden naarmate de vaste transportkosten kunnen verdeeld worden over meer goederen. Breedtevoordelen treden op als de gemiddelde kosten voor gezamenlijk vervoer lager liggen dan de kosten voor apart vervoer van de verschillende goederen. Dichtheidsvoordelen geven aan dat de variabele kosten minder dan proportioneel stijgen met het aantal eenheden te transporteren goederen. Netwerkvoordelen als laatste, beogen een combinatie van verschillende schaaffecten. (Kreutzberger, 2007)

Er kan hier nog opgemerkt worden, dat de curve van het voor- en natransport via de weg niet in alle literatuur aangegeven wordt als evenwijdig met de grafiek van enkel wegtransport. Omdat de afstanden via de weg bij multimodaal transport korter zijn, kan het begin en het einde van de curve van multimodaal transport een steiler verloop kennen dan als men enkel via de weg transporteert.

Als laatste kunnen frictiekosten ontstaan, als de verschillende transportmodi niet goed op elkaar afgestemd zijn. Voorbeelden van frictiekosten zijn vertragingen, complexe administratie, te hoge prijzen, enzovoorts. De totale kostencurve van multimodaal transport zal hierdoor naar boven verschuiven. (Macharis en Verbeke, 1999)

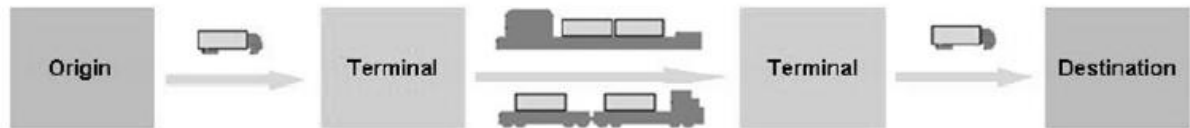
2.3 TECHNISCHE ASPECTEN

Onder technische aspecten van het multimodaal transport verstaan we de verschillende vervoersmiddelen, de laadeenheden, de terminals en de vervoersdragers. Bij multimodaal transport heeft men telkens te maken met minsten twee verschillende vervoersmiddelen en twee vervoersdragers. De gebruikte vervoersmiddelen zijn locomotief, wagon, trekker, binnenvaartschip of containerschip. Bijbehorende vervoersdragers zijn spoor, weg, kanaal en zee of oceaan.

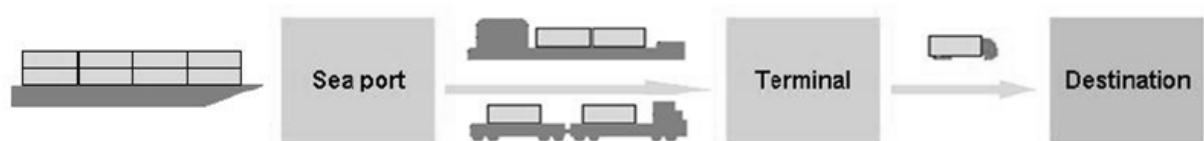
Goederentransport kan gebruik maken van wegtransport, spoorwegtransport, binnenvaart, luchtvaart of verscheping via zee of oceaan. In de meest voorkomende gevallen wordt er slechts gebruik gemaakt van bimodaal transport, waarbij vrachtwagens het voor- en natransport verzorgen en de spoorweg de 'trunk line' vormt. Met deze 'trunk line' wordt de lange gecombineerde goederenrit bedoeld, die ervoor zorgt dat multimodaal transport goedkoper wordt, dankzij de lagere variabele kost. De keuze tussen de verschillende transportmodi is vaak afhankelijk van de kosten. Toch kunnen er nog andere zaken een belangrijke rol spelen, zoals frequentie, service, snelheid, beschikbaarheid van speciale materiaalbehandeling, verpakkingsvereisten of de behoefte om zich in te zetten voor een beter milieu.

2.4 ORGANISATORISCHE ASPECTEN

Het succes van multimodaal transport hangt af van de samenwerking tussen de verschillende operatoren, de coördinatie van de verschillende modi en van de knooppuntfaciliteiten waar de goederen van de ene op de andere modus kunnen worden overgeladen. Als de verschillende modi niet optimaal op elkaar afgestemd worden, gaat het voordeel teniet. Hier komen verschillende partijen aan bod. Een nieuwe transportmodus ontstaat pas indien men een volledig geïntegreerde keten kan bekomen. Op onderstaande figuren worden multimodale ketens weergegeven.

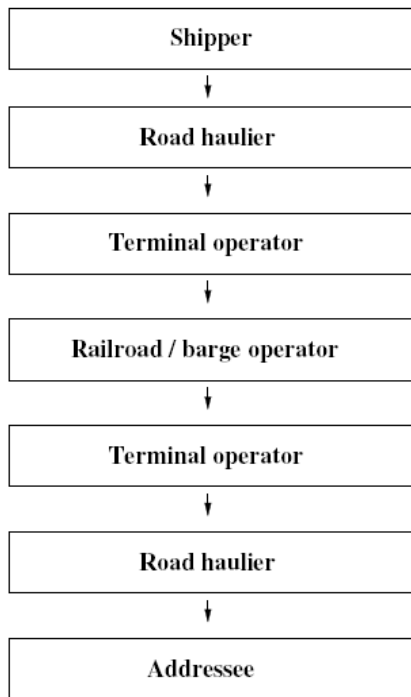


FIGUUR 3: DE CONTINENTALE MULTIMODALE KETEN (BRON: MACHARIS EN VERBEKE, 1999)



FIGUUR 4: DE MARITIEME MULTIMODALE KETEN (BRON: MACHARIS EN VERBEKE, 1999)

Op onderstaande figuur worden de verschillende partijen weergegeven, die actief zijn binnen de multimodale keten.



FIGUUR 5: ACTOREN IN DE MULTIMODALE TRANSPORTMARKT (BRON: MACHARIS EN VERBEKE, 1999)

De klant of verzender is de organisatie of het bedrijf dat een volledige laadeenheid aanbiedt aan de intermodale operator. De wegtransporteur vervoert de laadeenheid naar de multimodale terminal. De terminaloperator beheert de terminal en zorgt voor de overlading tussen de twee transportmodi. Spoorwegmaatschappijen werken volledig onafhankelijk. Zij beschikken over een eigen spoorwegnetwerk, locomotieven en personeel. In de binnenvaart wordt het transport geregeld door de binnenvaartschipper, die meestal ook zelfstandig werkt.

(Macharis en Verbeke, 1999)

2.5 KADERING IN ONDERZOEK

In deze masterproef wordt onderzocht welke heuristiek gebruikt kan worden om verschillende transportmodi optimaal op elkaar af te stemmen, zodat een optimale heuristiek bekomen wordt, die ritten zodanig inplant dat ze voldoen aan de vooropgestelde doelfunctie. Hierbij wordt een netwerk omschreven, dat het multimodale

karakter van het probleem zal weerspiegelen. De knooppunten in het netwerk zullen terminals voorstellen, waar al dan niet overgeschakeld kan worden tussen twee transportmodi. De verbindingen of linken in het netwerk stellen een mogelijke verplaatsing voor van het ene knooppunt naar een ander knooppunt, waarbij gebruikt wordt gemaakt van een bepaalde transportmodus. Zo wordt er in de meeste oplossingsmethoden niet expliciet gedefinieerd welke verbindingen door welke modi bediend worden, maar weet men dat multimodale overschakelingen mogelijk zijn op bepaalde punten. Iedere link wordt gedefinieerd door een bepaalde afstand of kost.

(Lowe, 2005 ; Macharis & Verbeke, 2004)

3. HET RITTENPLANNINGSPROBLEEM

In dit hoofdstuk wordt het klassieke rittenplanningsprobleem omschreven aan de hand van veel voorkomende probleemkenmerken zoals het netwerk, de doelstelling, bepalingen van de beslissingsvariabelen, tijdsvensters, capaciteitsbeperkingen, de kostenfunctie en beperkingen voor het behoud van de goederenstroom. Vervolgens worden enkele oplossingsmethoden besproken. Eerst komen enkele exacte oplossingsmethoden aan bod, zoals het 'branch en bound' algoritme, dynamisch programmeren en het 'matching' of 'b-matching' algoritme. Vervolgens bespreken we enkele kortste pad algoritme. Dit hoofdstuk zal afgesloten worden met een goed uitgewerkte heuristiek.

3.1 OMSCHRIJVING

Dagelijks worden duizenden bedrijven geconfronteerd met verzameling en levering van goederen. Aangezien de omstandigheden sterk afhankelijk zijn van de situatie, zijn veel gebruikte doelstellingen en beperkingen erg variabel. In de praktijk wordt een beperkt aantal prototype problemen voorgesteld, die voldoende flexibel zijn om in vele praktische contexten bruikbaar te zijn.

Het klassieke rittenplanningsprobleem (of classical vehicle routing problem, VRP) is een veralgemening van het welgekende handelsreizigersprobleem (of traveling salesman problem, TSP). Het probleem moet vanuit een depot de ritten bepalen voor een vloot van voertuigen met gegeven capaciteit, die een aantal klanten (n) moeten bedienen met een gekende vraag. Het aantal voertuigen wordt verondersteld beperkt te zijn. De route moet worden vastgelegd, rekening houdend met een bepaald netwerk. In dit netwerk worden klanten voorgesteld door knooppunten en de bogen representeren de verbindingswegen. Er wordt in dit probleem gebruik gemaakt van slechts één depot. (Lambert & Stock, 1993 ; Bowersox & Closs, 1996)

Lambert en Stock (1993) of Bowersox en Closs (1996) stellen de minimalisatie van de totale kost van alle ritten voor als een binair probleem, waarbij de kost c_{ij} wordt vermenigvuldigd met een binaire factor x_{ijk} .

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^K c_{ij} x_{ijk}$$

Met $x_{ijk} \in \{0,1\}$

$x_{ijk} = 1$ Als de weg tussen klant i en klant j gereden wordt door vrachtwagen k.

$x_{ijk} = 0$ Als bovenstaande niet het geval is.

c_{ij} is gelijk aan de totale kost van het transport van goederen tussen klant i en klant j.

Barnhart en Laporte (2007) formuleren een gelijkaardig routeplanningsprobleem. Gebruik makend van een binaire variabele x_e en een kost per verbinding, wordt naar een oplossing gezocht waarbij de totale kosten minimaal zijn. Ook hier start en stopt de route in het depot, wordt elke klant exact één keer bezocht en wordt er rekening gehouden met capaciteit- en lengtebeperkingen. Het probleem wordt als volgt geformuleerd:

$$\min \sum_{e \in E} c_e x_e$$

$$\sum_{e \in \delta(i)} x_e = 2 \quad i \in V \setminus \{0\}$$

$$\sum_{e \in \delta(0)} x_e = 2m$$

$$\sum_{e \in \delta(S)} x_e \geq 2r(S) \quad S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \phi$$

$$x_e \in \{0,1\} \quad e \notin \delta(0)$$

$$x_e \in \{0,1,2\} \quad e \in \delta(0)$$

Waarbij

- e verbinding tussen knooppunt i en j
- E verzameling van verbindingen $(i,j) \in V, i < j$
- x_e binaire variabele die aanduidt hoeveel keer verbinding e gepasseerd wordt
- S aantal klanten of te bedienen punten

- $R(S)$ minimum aantal voertuigen nodig om S klanten te bedienen
 $\delta(i)$ $\{(i,j) : i \in S, j \in S \text{ of } i \in S, j \notin S\}$
 V verzameling van transportmodi
 m aantal routes

Op beslissingsniveau kan het rittenplanningsprobleem geplaatst worden binnen de operationele planningsproblemen. Aangezien de voorwaarden voor iedere route verschillen, gebeurt de toewijzing van ladingen aan transportmodi en het vastleggen van routes meermaals per dag. Het is een kwestie van om gegeven infrastructuur (strategische planning) en gegeven diensten (tactische planning) een optimale planning van de goederenritten te bekomen (operationele planning). (Caris, Macharis, & Janssens, 2008)

3.2 PROBLEEMKENMERKEN

In de realiteit is bijna elk routeplanningsprobleem uniek, aangezien er met zeer veel variabelen rekening gehouden kan worden. Volgens Chang (2007) moet een multimodaal routeplanningsprobleem drie belangrijke kenmerken bevatten:

1. Het is belangrijk dat er meerdere doelstellingen gebruikt worden, zoals bijvoorbeeld minimalisering van kosten en tijd, aangezien er verschillende partijen betrokken zijn die verschillende belangen kunnen hebben.
2. Tijdsvensters moeten gebruikt worden om de schema's van verschillende transportmodi en verschillende leveringstijden in te calculeren.
3. Bij de kostenberekening moet er rekening gehouden worden met schaalvoordelen. Dit is namelijk de belangrijkste reden om gebruik te maken van multimodaal transport .

Verscheidene auteurs formuleren een oplossing voor multimodale routeplanningsproblemen zonder bovenstaande kenmerken alle drie op te nemen in hun model. Zo bespreken Androutsopoulos en Zografos (2009) een multicriteria tijdsafhankelijk routeplanningsprobleem, waarin geen schaalvoordelen in beeld komen. Ook Caramia en Guerriero (2009) laten schaalvoordelen buiten beschouwing. Grasman (2006) daarentegen minimaliseert ofwel kosten ofwel tijd, waarmee nooit de belangen

van alle partijen bevredigd kunnen worden. Barnhart en Ratliff (1993) minimaliseren enkel de kosten en brengen ook geen tijdsvensters in rekening. Ook Jansen et al. (2004) minimaliseren enkel de kosten, maar houden wel rekeningen met tijdsvensters. Net zoals het artikel van Lozano en Storchi (1999), dat multimodaal personenvervoer behandelt. Ziliaskopoulos en Wardell (2000) minimaliseren dan weer enkel de reistijd. Bookbinder en Fox (1998) minimaliseren zowel tijd als kost, maar beperken zich niet met tijdsvensters. Schaalvoordelen komen hier dan wel weer aan bod.

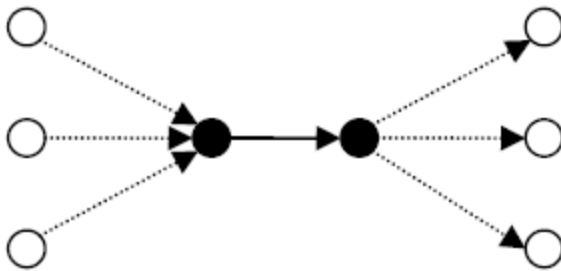
3.2.1 NETWERK

Multimodaal transport werd mogelijk dankzij de opkomst van containerisatie, een systeem dat gebruik maakt van gestandaardiseerde ISO containers die geladen kunnen worden op zowel vrachtschepen, vrachtwagens als goederentreinen. Doordat deze ISO-containers perfect stapelbaar zijn, is het mogelijk ladingen te combineren, ookwel 'bundling' genoemd. De overlading of transfer van deze containers kan enkel in multimodale terminals of hubs gebeuren. Deze hubs worden in een netwerk aangegeven door knooppunten. Niet in alle knooppunten is een transfer tussen transportmodi mogelijk, enkel in bimodale of trimodale terminals.

Er bestaan veel verschillende soorten netwerken waarin routes gepland kunnen worden. Het netwerk dat vooral gebruikt wordt bij multimodaal transport is het zogenaamde 'trunk collection distribution netwerk'. Het veel voorkomende 'hub-and-spoke' netwerk is hier een andere vorm van. Deze netwerken worden hieronder verder besproken.

Een 'trunk collection distribution' netwerk bestaat uit twee hubs, die met elkaar verbonden zijn. Ladingen worden verzameld in een eerste hub, gebundeld, gekoppeld aan een transportmodus en vervoerd naar de andere hub. Het transport, dat via de 'main trunk' gebeurt, is aanzienlijk groter in volume. Eens aangekomen in de tweede hub, wordt de lading gesplitst en gebeurt het natransport naar de bestemmingen. (Woxenius, 2007)

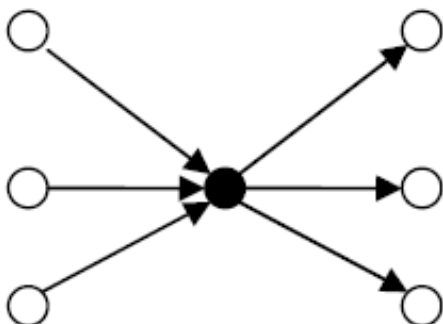
TCD network



FIGUUR 6: TRUNK COLLECTION DISTRIBUTION NETWORK (BRON: KREUTZBERGER, 2005)

Multimodaal transport kan ook georganiseerd worden in 'hub-and-spoke' netwerken. Deze netwerken bestaan uit minstens twee hubs, dit zijn de multimodale terminals, en een heel aantal vertrekpunten en bestemmingen. Goederen worden, meestal met vrachtwagens, naar een terminal vervoerd (voortransport). In de hub gebeurt een transfer naar spoorwagens of een vrachtschip. Deze tweede modus vervoert de gehele vracht naar een andere terminal. In de tweede terminal wordt de vracht weer gesplitst in kleinere ladingen en zo via de weg naar de bestemming verplaatst (natransport). Een typisch voorbeeld van dit netwerk is de luchtvaartsector, waarbij niet alle bestemmingen met elkaar verbonden zijn, maar men gebruik moet maken van een aaneenschakeling van vluchten. (Barnhart & Laporte, 2007)

HS network



FIGUUR 7: HUB-AND-SPOKE NETWORK (BRON: KREUTZBERGER, 2005)

De verschillende modi waarvan men gebruik maakt in deze netwerken zijn voornamelijk vrachtwagens, treinen en schepen. Er kan ook omgeschakeld worden op een vliegtuig, maar dit alternatief komt veel minder vaak voor omwille van de hoge kostprijs. Vrachtwagens worden voornamelijk gebruikt voor het voor- en natransport, ook wel 'drayage' genoemd. Treinen en schepen vervoeren de gebundelde containers over langere afstanden om te kunnen genieten van schaalvoordelen. De omschakeling gebeurt telkens in daarvoor ontworpen hubs.

In operationele problemen zijn de netwerken meestal een verzameling van willekeurige knooppunten. Iedere verbinding tussen twee knooppunten maakt gebruik van één transportmodus. Omschakeling gebeurt in het knooppunt, als deze het vertrek van een nieuwe modus toelaat. Deze netwerken zijn dus meestal een combinatie van beide netwerken.

Chang (2007) behandelt een internationaal netwerk, waarbij verschillende knooppunten met elkaar verbonden zijn door bepaalde transportmodi. Het oorspronkelijke optimalisatieprobleem wordt daarvoor opgedeeld in twee subproblemen, waarbij het ene de kost minimaliseert en het andere de tijd. Verder moet ieder subprobleem voor elke link (i,j) apart worden opgelost. Enkel zo bekomt men de optimale keuze tussen de verschillende verbindingen.

Androutsopoulos & Zografos (2009) beschrijven een multimodaal netwerk door een verzameling van knooppunten, verbindingen, transportdiensten en tijdsvensters. Een verzameling van knooppunten, die de stopplaatsen van de transportdiensten voorstellen. Een verzameling van verbindingen, die ieder paar van knooppunten voor dat door een bepaalde transportdienst kan bediend worden voorstellen.

In de routeplanningsproblematiek start men van een gegeven O-D matrix (origin-destination), die alle te bedienen koppels van oorsprong en bestemming bevat. Deze gegeven matrix moet vervolgens vertaald worden naar stromen op de verbindingen van het netwerk voor de verschillende beschikbare transportmodi. De toedeling van routes op een netwerk gebeurt aan de hand van een doelstelling, die meestal tijd of kosten minimaliseert, en een aantal beperkingen waaraan de oplossing moet voldoen. Aangezien algoritmes hier een belangrijke rol spelen, zullen deze verder besproken worden in paragraaf 3.3 oplossingsmethoden.

3.2.2 BESLISSINGSVARIABLEN

Als men een optimalisatieprobleem opstelt, moeten eerst de variabelen gedefinieerd worden. Hierbij worden beperkingen ingevoegd die aangeven tot welke getallenverzameling de variabelen behoren. Het is zeer belangrijk dat de variabelen juist en volledig gedefinieerd worden, zodat er geen misverstanden kunnen gebeuren bij de oplossing van het model.

Chang (2007) definieert zijn variabelen als volgt:

$$X_{ij}^{mr} \text{ non-negative integer } \quad \forall (i,j) \in E, m \in V, r \in R$$

$$W_{ij}^m \text{ non-negative integer } \quad \forall (i,j) \in E, m \in V$$

$$Y_{ij}^r \in [0,1] \quad \forall (i,j) \in E, r \in R$$

De X en W variabelen zijn deel van de verzameling van de positieve gehele getallen. De Y variabelen daarentegen behoren tot de verzameling van de binaire getallen.

3.2.3 DOELSTELLING

Een rittenplanningsprobleem wordt geformuleerd als een optimalisatieprobleem. De doelstelling kan geminimaliseerd of gemaximaliseerd worden. Er kunnen ook meerdere doelstellingen in hetzelfde probleem geoptimaliseerd worden. De meest voorkomende problemen zijn minimalisatieproblemen. Hierbij worden ofwel de kosten ofwel de tijd zo klein mogelijk gehouden. De transportation mean sharing index kan gemaximaliseerd worden. Dit wordt hieronder verder besproken. Meestal wordt een combinatie van factoren geoptimaliseerd.

Formulering voor kostenminimalisatie (Chang, 2007):

$$Z_p = \min \sum_{ij} \sum_r F_{ij}^r Y_{ij}^r + \sum_{ij} \sum_r \sum_m C_{ij}^r X_{ij}^{mr}$$

Met F_{ij}^r vaste kosten voor verbinding (i,j) met interval r

- Y_{ij}^r binaire variabele die aangeeft of verbinding (i,j) gebruikt wordt
 C_{ij}^r variabele kost voor verbinding (i,j) met interval r
 X_{ij}^{mr} goederenstroom m op verbinding (i,j) als de totale stroom op deze link binnen interval r blijft

Chang (2007) maakt gebruik van een trapsgewijze kostenfunctie. Hierbij is de kost van iedere link (i,j) afhankelijk van het volume van de goederenstroom die door deze link vloeit. In zijn werk definieert hij bijgevolg een aantal intervallen of ranges (r), die verschillende niveaus van kosten weergeven per volumenniveau. Er wordt gebruik gemaakt van een binaire variabele Y_{ij}^r , die aangeeft in welke range de link (i,j) zich bevindt en bijgevolg welke kost ingebracht mag worden.

Formulering van tijdsminimalisatie (Chang, 2007):

$$Z_p = \min \sum_{ij} \sum_m (\max\{D_j, A_j^m + S_j^m\} - \max\{D_i, A_i^m + S_i^m\}) W_{ij}^m$$

- Met D_i ingeplande vertrektijd in knooppunt i
 A_i^m aankomsttijd van goederenstroom m in knooppunt i
 S_i^m servicetijd in knooppunt i voor goederenstroom m
 W_{ij}^m goederenstroom m op link (i,j)

Voor de definiëring van tijdsminimalisatie wordt in Chang (2007) gebruik gemaakt van ingeplande vertrek- en aankomsttijden alsook bedieningstijden. Er wordt gestreefd naar een minimum van de som van alle verschillen tussen de vertrektijd in een knooppunt j en de vertrektijd in het voorliggende knooppunt i. Als de vertrektijd in een knooppunt kleiner is dan de aankomsttijd, vermeerderd met de benodigde tijd om de goederen te bedienen in het betreffende knooppunt, wordt vanzelfsprekend de laatstgenoemde tijd genomen.

Gecombineerde doelstelling (Chang, 2007):

$$Z_p = \min \sum_{ij} \sum_r F_{ij}^r Y_{ij}^r + \sum_{ij} \sum_r \sum_m C_{ij}^r X_{ij}^{mr} + \omega \sum_{ij} \sum_m (\max\{D_j, A_j^m + S_j^m\} - \max\{D_i, A_i^m + S_i^m\}) W_{ij}^m$$

Chang (2007) minimaliseert zowel kosten als tijd, waarbij beide doelstellingen worden gecombineerd. Hierbij moet er een relatief gewicht (ω) toegekend worden aan beide doelstellingen. Door het toegekende gewicht kunnen de twee minimaliseringsproblemen nu gezien worden als één probleem, waarbij met beide doelstellingen rekening gehouden wordt in de mate van hun relatief belang.

In Androutsopoulos & Zografos (2009) wordt een combinatie van kosten en tijd geminimaliseerd, maar komt er ook nog een derde variabele in het spel, namelijk het aantal omschakelingen tussen transportservices, oftewel transportmodi, die ook geminimaliseerd worden. Men werkt hier met een achterwaarts algoritme, dat start vanuit de bestemming en terugwerkt naar de oorsprong. In iedere stap worden de reistijd, het aantal omschakelingen en de kost berekend en kiest men op basis van deze berekeningen de beste oplossing.

Caramia & Guerriero (2009) minimaliseren de combinatie van tijd en kosten, en maximaliseren een 'transportation mean sharing index'. Deze index wordt als volgt geformuleerd:

$$\text{transportation mean sharing index} = 1 - \frac{\text{kost van de gezamenlijke oplossing}}{\text{som van de kosten van alle individuele routes}}$$

Hoe hoger deze index, hoe groter het verschil tussen de kost van de gezamenlijke route en de som van de kosten van alle individuele routes. Men tracht dus een zo groot mogelijk verschil na te streven tussen de teller en de noemer van bovenstaande breuk, waardoor er zoveel mogelijk gebruikt gemaakt wordt van gecombineerd transport. Als meerdere goederenstromen een verbinding, die door een transportmodus bediend wordt, kunnen delen, brengt dit schaalvoordelen met zich mee.

Grasman (2006) minimaliseert de totale kosten, waarbij tijdsvensters als beperking worden vooropgesteld. Hij ontwierp echter ook een model waarbij de 'lead time' geminimaliseerd wordt en kosten als beperking worden vooropgesteld. Bij de kosten worden transportkosten, transferkosten en vertrek- en aankomstkosten meegerekend. Voor de 'lead time' gebeurt het analoog, waarbij rekening wordt gehouden met reis- en omschakeltijden.

3.2.4 TIJDSVENSTERS

In het klassieke routeplanningsprobleem met tijdsvensters, moet elke knooppunt i binnen een bepaald tijdsvenster $[a_i, b_i]$ bediend worden. Een transportmodus is toegelaten vóór tijdstip a_i aan te komen en wachten tot knooppunt i beschikbaar is. Aankomen na tijdstip b_i is verboden. Het probleem is een veralgemening van het klassieke routeplanningsprobleem, waarbij a_i gelijk is aan nul en b_i gelijk is aan oneindig. (Barnhart en Laporte, 2007)

Een tijdsvenster geeft de grenzen aan waarbinnen een bepaalde levering moet volbracht worden. Het is dus van uiterst belang dat binnen de problematiek van rittenplanning rekening wordt gehouden met bepaalde tijdsvensters, zodat leveringen optimaal op elkaar kunnen worden afgestemd. Tijdsvensters kunnen voorkomen bij het vertrekpunt of de oorsprong, bij de bestemming en bij de tussenliggende knooppunten. Men spreekt in de literatuur over zachte en harde tijdsvensters. Bij harde tijdsvensters mogen de grenzen absoluut niet overschreden worden. Opening- en sluitingstijden zijn hier een voorbeeld van en worden geformuleerd in de vorm van grenzen l_i en u_i . Aankomst en vertrek in een knooppunt zal steeds binnen de openingsuren moeten plaatsvinden. Zachte tijdsvensters mogen wel overschreden worden, maar dan wordt er een soort boete aangerekend onder de vorm van een extra kost of straf tijd.

Formulering (Chang, 2007):

$$W_{ij}^m (\max\{D_i, A_i^m + S_i^m\} + t_{ij} - A_j^m) = 0 \quad \forall (i, j) \in E, m \in V$$

$$l_i \leq A_i^m \leq u_i \quad \forall i \in N, m \in V$$

Met	W_{ij}^m	goederenstroom op verbinding (i, j)
	A_i^m	de aankomsttijd van goederenstroom m in knooppunt i
	D_i	ingeplande vertrektijd in knooppunt i
	S_i^m	servicetijd in knooppunt i voor goederenstroom m
	t_{ij}	reistijd op verbinding (i, j)
	l_i	vroegst accepteerbare aankomsttijd
	u_i	laatste accepteerbare aankomsttijd
	N	verzameling van knooppunten

E verzameling van verbindingen tussen knooppunten

Een beperking in verband met tijdsvensters impliceert dat ten eerste de vertrektijd in knooppunt i vermeerderd met de reistijd op verbinding (i,j) , gelijk is aan de aankomsttijd in knooppunt j . Ten tweede mag de aankomsttijd in knooppunt j plus de bedieningstijd in knooppunt j niet groter zijn dan de geplande vertrektijd in knooppunt j . Ten slotte moet de aankomsttijd in een knooppunt tussen vooraf bepaalde grenzen vallen.

Androutsopoulos & Zografos (2009) gebruiken tijdsvensters op dezelfde manier als Chang (2007), waarbij ze ook gebruik maken van vroegste en laatste vertrek- en aankomsttijden. Hun formulering gebeurt als volgt:

$$dt_{i_k}^{s_k} \geq dt_{i_{k-1}}^{s_{k-1}} + \tau_{s_{k-1}}(i_{k-1}, i_k, dt_{i_{k-1}}^{s_{k-1}})$$

$$eat_{v_k} \leq dt_{i_r}^s + \tau_s(r, v_k, dt_r^s) \leq lat_{v_k} \quad k = 1, \dots, m, m+1$$

$$edt_{v_0} \leq dt_{v_0}^{s_0} \leq ldt_{v_0}$$

$$dt_{v_k}^{s_{v_k}} \geq eat(v_k) + t_{v_k} \quad k = 1, \dots, m$$

Waarbij	dt	vertrektijd in knooppunt
	eat	vroegste aankomsttijd
	lat	laatste aankomsttijd
	edt	vroegste vertrektijd
	ldt	laatste vertrektijd
	τ	reistijd
	i_k	knooppunt
	s_k	transportmodus
	v_k	knooppunten die bezocht worden

3.2.5 CAPACITEITSBEPERKINGEN

Voor het bepalen van de capaciteiten in een netwerk maakt Chang (2007) een opsplitsing tussen X_{ij}^{mr} , wat de goederenstroom m op verbinding (i,j) voorstelt als die

zich binnen het interval r bevindt, en W_{ij}^m wat de goederenstroom op verbinding (i,j) voorstelt. Stel bijvoorbeeld dat W_{ij}^m gelijk is aan 200 eenheden en de intervallen voor verbinding (i,j) zijnde volgende: 0 tot 50, 50 tot 150 en 150 tot 250. Vervolgens zal X_{ij}^{mr} gelijk zijn aan nul voor het eerste en tweede interval en gelijk zijn aan 200 eenheden voor het derde interval.

TABEL 1: VERSCHIL TUSSEN X_{ij}^{mr} EN W_{ij}^m

Range	Capaciteit binnen range	Cumulatieve capaciteit	X_{ij}^{mr}
1	50	0-50	0
2	100	50-150	0
3	100	150-250	200

Chang (2007) stelt dat voor iedere link (i,j) de goederenstroom maar binnen één range mag bestaan, voor alle andere ranges moet X_{ij}^{mr} gelijk zijn aan nul. Hiervoor wordt volgende vergelijking gebruikt:

$$W_{ij}^m \leq \sum_j X_{ij}^{mr} \quad \forall (i,j) \in E, m \in V$$

Vervolgens kunnen er ook capaciteiten per link aanwezig zijn. De beschikbare capaciteiten per link (i,j) worden door Chang (2007) bepaald door een onder- en bovengrens.

De ondergrens van een range wordt door Chang (2007) als volgt gedefinieerd:

$$\sum_m X_{ij}^{mr} \geq \max\{0, M_{ij}^{r-1} Y_{ij}^r - Q_{ij}\} \quad \forall (i,j) \in E, r \in R$$

De bovengrens van een range wordt door Chang (2007) als volgt gedefinieerd:

$$\sum_m X_{ij}^{mr} \leq \max\{0, M_{ij}^r Y_{ij}^r - Q_{ij}\} \quad \forall (i,j) \in E, r \in R$$

Met	X_{ij}^{mr}	goederenstroom m op verbinding (i,j) als de totale stroom op deze link binnen interval r blijft
	M_{ij}^r	capaciteit van verbinding (i,j) in interval r
	Y_{ij}^r	binaire variabele die aangeeft of verbinding (i,j) gebruikt wordt
	Q_{ij}	capaciteit die opgeëist wordt door andere goederenstromen op link (i,j)

De som van alle goederenstromen m op een bepaalde verbinding (i,j) binnen interval r moet groter zijn dan een bepaalde ondergrens. Deze ondergrens wordt gedefinieerd door een bepaalde capaciteit M_{ij}^{r-1} minus de gevraagde capaciteit door andere goederenstromen. Als daarentegen er geen goederenstroom m binnen de interval r op deze verbinding aanwezig is, is de benedengrens gelijk aan 0.

De som van alle goederenstromen m op een bepaalde verbinding (i,j) binnen interval r moet kleiner zijn dan een bepaalde bovengrens. Deze bovengrens wordt gedefinieerd door een bepaalde capaciteit M_{ij}^r minus de gevraagde capaciteit door andere goederenstromen. Als daarentegen er geen goederenstroom m binnen de interval r op deze verbinding aanwezig is, is de bovengrens gelijk aan 0.

3.2.6 KOSTENFUNCTIE

Beperkingen in verband met kosten worden in het optimalisatiemodel ingebracht, omdat er meestal een beperkt budget is om goederenstromen van oorsprong naar bestemming te transporteren. Volgens Chang (2007) is het essentieel dat een multimodaal routeplanningsprobleem schaalvoordelen modelleert. Het grote voordeel van verschillende routes te combineren op eenzelfde transportmodus is het verkleinen van variabele kosten.

Chang (2007) probeert deze schaalvoordelen te modelleren door gebruik te maken van een concave kostenfunctie, waarbij verschillende lineaire segmenten worden aangegeven door ranges of intervallen. Voor ieder interval $r \in R = \{1,2, \dots, |R|\}$ bestaat er een vaste kost F_{ij}^r , wat het intercept aangeeft, een variabele kost C_{ij}^r , die de richtingscoëfficiënt voorstelt en een onder- en bovengrens M_{ij}^{r-1} en M_{ij}^r .

Als er een goederenstroom m op verbinding (i,j) aanwezig is, die zich binnen interval r bevindt, dan moet de binaire variabele Y_{ij}^r gelijk zijn aan één. Als er geen goederenstroom binnen die range aanwezig is op link (i,j) , dan moet de binaire variabele Y_{ij}^r gelijk zijn aan nul.

Chang (2007) formuleert dit als volgt:

$$X_{ij}^{mr} \leq d_m Y_{ij}^r \quad \forall (i,j) \in E, m \in V, r \in R$$

Met	d_m	de totale goederenstroom die vertrekt vanuit de oorsprong
	X_{ij}^{mr}	goederenstroom m op verbinding (i,j) als de totale stroom op deze verbinding binnen interval r blijft
	Y_{ij}^r	binaire variabele die aangeeft of verbinding (i,j) gebruikt wordt

Ten slotte mag er in het model van Chang (2007) slechts één interval per verbinding (i,j) aanwezig zijn. Hierdoor mag er dus slechts één binaire variabele Y_{ij}^r gelijk zijn aan één. De som van alle binaire variabelen op verbinding (i,j) mag bijgevolg niet groter zijn dan één.

Chang (2007) formuleert dit als volgt:

$$\sum_r Y_{ij}^r \leq 1 \quad \forall (i,j) \in E$$

Androusoopoulos & Zografos (2009) maken in hun werk gebruik van zogenaamde 'service leggs'. Hiermee worden verbindingen gecombineerd, die door eenzelfde transportmodus bediend kunnen worden. Deze leggs hebben een bepaalde vaste kost. Iedere 'legg' wordt bepaald door de begin- en eindknoop en de vertrektijd in de beginknoop. Op deze manier kan de totale kost van de route berekend en geminimaliseerd worden.

3.2.7 BEHOUD VAN DE GOEDERENSTROOM

Bij het plannen van de optimale route, moet ervoor gezorgd worden dat de goederenstroom die vertrekt in de oorsprong gelijk is aan de goederenstroom die aankomt in de bestemming. In alle tussenliggende knooppunten moet de inkomende goederenstroom gelijk zijn aan de uitgaande goederenstroom, zodat er geen voorraden in de knooppunten opgestapeld worden. (Chinneck, 2001)

Chang (2007) gebruikt hiervoor volgende vergelijking:

$$\sum_j W_{ij}^m - \sum_j W_{ji}^m = \begin{cases} d_m & \text{als } i = O(m) \\ -d_m & \text{als } i = D(m) \\ 0 & \forall m \in V \text{ en } i \in N \end{cases}$$

Met	W_{ij}^m	hoeveelheid van product m via verbinding (i,j)
	W_{ji}^m	hoeveelheid van product m via verbinding (j,i)
	d_m	de totale hoeveelheid van product m die vertrekt vanuit de oorsprong
	$O(m)$	de oorsprong van de goederenstroom
	$D(m)$	de bestemming van de goederenstroom
	N	verzameling van knooppunten
	V	verzameling van verbonden knooppuntparen
	m	een O-D paar voor een bepaalde hoeveelheid van een bepaald product (unieke goederenstroom)

3.3 OPLOSSINGSMETHODEN

Een goede oplossingsmethode voldoet volgens Cordeau et al. (2002) aan vier belangrijke criteria. Het is een accurate methode die snel kan toegepast worden, het oplossen ervan is simpel en de methode is flexibel. Met accuraatheid wordt bedoeld hoeveel de gevonden oplossing verschilt van de optimale oplossing. De snelheid waarmee de oplossing gevonden moet worden, is afhankelijk van het planningsniveau waarop de het probleem opgelost moet worden en de graad van accuraatheid. Een oplossingsmethoden mag ook niet teveel parameters bevatten, aangezien het oplossen en begrijpen ervan dan te ingewikkeld wordt en de methode niet gebruikt zal worden. Als laatste is het nog belangrijk te vermelden dat een goede oplossingsmethode voldoende flexibel moet zijn. De beperkingen moeten kunnen aangepast worden aan een meerderheid van praktische toepassingen.

Deze paragraaf bespreekt eerst enkele exacte algoritmen, waaronder het bekende branch en bound algoritme en dynamisch programmeren. Vervolgens worden de kortste pad algoritmen besproken om af te sluiten met heuristieken.

3.3.1 EXACTE OPLOSSINGSMETHODEN

Barnhart en Ratliff (1993) combineren ritten met verschillende bestemmingen en herkomsten met behulp van multimodaal transport. Hierbij maken ze gebruik van een 'matching' netwerk. Ze stellen een netwerk voor, waarin ieder knooppunt een O-D paar voorstelt. Met andere woorden benoemen ze een verbinding van een oorsprong met een bestemming en een bijbehorende transportmodus. Vervolgens berekenen ze alle kosten voor iedere combinatie van knooppunten, wat dan het 'matching' netwerk voorstelt. Hiermee zoekt men uit welke combinatie de laagste kost oplevert. Een alternatieve oplossingsmethode in dit artikel wordt het 'b-matching' algoritme genoemd. Hierbij worden de knooppunten die eenzelfde O-D paar voorstellen gecombineerd tot één enkel knooppunt.

Androusoopoulos & Zografos (2009) lossen hun kortste pad probleem op met behulp van dynamisch programmeren. Bij dit algoritme gaat men uit van de laatst mogelijke aankomsttijd in de bestemming of het eindpunt en van daaruit werkt men naar de

oorsprong toe. Het probleem wordt hier dus opgesplitst in een aantal stadia, waarbij in elk stadium uit een aantal toestanden bestaat. De optimale beslissing voor een toestand is onafhankelijk van de voorgaande stadia. Het maakt dus niet uit hoe je in dat stadium gekomen bent, maar hoe je vandaar uit de kortste route naar de eindbestemming neemt. (Hillier & Lieberman, 2005)

3.3.2 KORTSTE PAD ALGORITMEN

In het artikel van Grasman (2006) wordt het probleem opgelost met het algoritme van Dijkstra, wat behoort tot de kortste pad algoritmen. Dit algoritme begint in de oorsprong of herkomst en bouwt van hieruit een boom op, die een verzameling van de kortste routes inhoudt. Ieder bezocht knooppunt krijgt een label, dat de lengte weergeeft van het tot dan toe gevonden kortste pad tot in dat knooppunt. Een label is tijdelijk, aangezien het wordt aangepast als men een kortere route dan de tot noch toe gevonden route vindt. Als er geen verbeteringen voor een label meer mogelijk zijn, wordt het label permanent.

De eerste stap geeft label 'nul' aan de oorsprong en label 'oneindig' aan alle andere knooppunten. In de volgende stap worden alle knooppunten die aan de oorsprong grenzen gelabeld met de lengte van hun verbinding met de oorsprong. De oorsprong krijgt in deze stap een definitief label 'nul'. In de derde fase kiest men het kleinste label en werkt men vanuit dat knooppunt verder naar de verbindingen van dat knooppunt. Als er andere knooppunten verbonden zijn hiermee, die reeds een voorlopig label bezitten dat groter is dan het in deze stap bekomen label, dan wordt het label van dat knooppunt aangepast. Het gekozen knooppunt wat op de oorsprong volgde krijgt hier ook een permanent label. Zo gaat men voort tot de bestemming bereikt wordt met de kortste-pad-boom. (Ortùzar, 1995)

Een uitbreiding op het algoritme van Dijkstra is het algoritme van Martin. Dit wordt gebruikt in het artikel van Caramia en Guerriero (2009). Het verschil tussen de twee algoritmes is dat bij Dijkstra's algoritme iedere knoop permanent of tijdelijk is, terwijl bij Martin's algoritme aan iedere knoop een set van tijdelijke en een set van permanente knooppunten vasthangen. Deze stellen elk een pad vanaf de oorsprong voor en worden ook labels genoemd. De werkwijze voorloopt analoog met het algoritme van Dijkstra.

Ziliaskopoulos en Wardell (2000) gebruiken een tijdsafhankelijk kortste pad algoritme of TDILTP (time dependent intermodal least time path algorithm) voor het oplossen van hun rittenplanningsmodel. Hier start men tevens vanuit de bestemming, om zo terug te werken naar de oorsprong. In ieder knooppunt wordt er gekeken of dat knooppunt potentieel heeft om de oplossing te verbeteren. Knooppunten die de oplossing mogelijk zouden kunnen verbeteren, worden bijgehouden in een lijst, de zogenaamde SE lijst (scan eligible). Deze lijst zal uiteindelijk de optimale oplossing weerspiegelen.

Lozano en Storchi (1999) gebruiken in hun werk op analoge manier een kortste pad algoritme voor het oplossen van hun rittenplanningsprobleem voor personenvervoer. Ze beschrijven een netwerk waarin knooppunten plaatsen voorstellen waar dat men beslist of men de route vervolgt met huidige transportmodus of dat men overschakelt tussen modi. Ze beschrijven twee soorten verbindingen tussen knooppunten, namelijk de transferverbindingen en de reisverbinding. Het gebruikte kortste pad algoritme werkt van bestemming naar oorsprong toe en houdt voor ieder knooppunt de kost, het aantal transfers en de kortste route van dat knooppunt tot de bestemming bij. De oplossing kan gekozen worden, naargelang men laagste kosten of minst aantal transfers preferereert.

3.3.3 HEURISTIEKEN

Chang (2007) maakt bij het oplossen van zijn probleem gebruik van een heuristiek die zich baseert op het 'branch en bound' algoritme. Lagrange relaxatie wordt gebruikt om de beperkingen te versoepelen en de doelstellingsfunctie op te splitsen in twee vergelijkingen, waarbij X_{ij}^{mr} en Y_{ij}^r in de eerste vergelijking worden opgelost en W_{ij}^m in de tweede vergelijking. Daarvoor worden er eerst multiplier α_{ij}^m toegevoegd aan alle goederenstromen m en linken (i,j) .

Vervolgens wordt probleem Z_{L_1} opgelost voor iedere verbinding (i,j) waarbij het nogmaals wordt opgesplitst, dit keer in $|E| \times |R|$ subproblemen. Dus voor ieder interval op iedere verbinding wordt een oplossing gevonden voor het eerste subprobleem. Probleem Z_{L_2} wordt ook verder opgesplitst in $|V|$ problemen, één voor ieder paar van oorsprong en bestemming met bijbehorende goederenstroom. De beperkingen worden door deze opsplitsingen ook verdeeld. Probleem Z_{L_1} moet enkel nog rekening houden met

de beperkingen waarin X_{ij}^{mr} en Y_{ij}^r voorkomen, waartegen probleem Z_{L_2} enkel de beperkingen in verband met W_{ij}^m in rekening moet brengen. Het probleem is nu opgesplitst in kleinere, oplosbare problemen. Er kan vervolgens gezocht worden naar een optimale oplossing. De gevonden oplossing kan, door de opsplitsing van beperkingen, nog beperkingen overtreden. Hierdoor kan het zijn dat een reoptimalisatiemethode gebruikt moet worden. Hierbij worden de gevonden oplossingen die nog enkele beperkingen overtreden zodanig aangepast dat ze een toelaatbare oplossing vormen.

Jansen et al. (2004) beschrijven in hun werk een operationele planningstechniek voor een kostenminimaliserende rittenplanning van het Danzas Euronet. Door de grote omvang wordt het probleem opgesplitst in vijf subproblemen, die één voor één worden uitgewerkt om tot een optimale oplossing te komen. Allereerst wordt de modus gekozen waarmee het transport zal gebeuren. Hierbij moet afgewogen worden voor welke ritten het nemen van de trein het meest rendabel is. De orders zullen dus van groot naar klein gesorteerd worden, waarbij de langste orders op treinen worden gepland. Als de capaciteit bereikt is zullen de andere ritten per vrachtwagen gebeuren. In een tweede stap worden lege containers hergepositioneerd, zodat er steeds voldoende containers aanwezig zijn op ieder punt. In deze stap wordt rekening gehouden met tijdsvensters en capaciteiten.

In de volgende stap worden orders gecombineerd om schaalvoordelen te bekomen. In deze stap wordt de winst gemaximaliseerd. Men gebruikt hiervoor $\max \sum_{ij} F_{ij} \cdot x_{ij}$ waarbij $x_{ij} = 1$ als order i en order j gecombineerd worden. Er zijn twee beperkingen waarmee rekening wordt gehouden. Ten eerste kan iedere i slechts met één j gecombineerd worden. Daarnaast wordt een beperking ingelast waardoor niet iedere paar orders combineerbaar is. In dit maximalisatieprobleem is de winst, F_{ij} , die de combinatie van twee orders oplevert gelijk aan $F_{ij} = D_i + D_j - D_{ij} + B_{ij}^R + B_{ij}^T$. In deze vergelijking staat D_i voor de minimale afstand die nodig is om order i op te halen en af te leveren. D_{ij} is de minimale afstand om de gecombineerde orders beide op te halen en af te leveren. B_{ij}^R is de bonus voor de 'feeder priority', dit is de bonus die verwijst naar de prioriteit van een bepaalde order. B_{ij}^T is de bonus voor de gelijkheid van de afhaaltijden van orders i en j. We kunnen nog opmerken dat dit een gewogen 'matching' probleem is.

In de vierde stap worden de ritten via de weg ingepland. Orders met de vroegste ophaaltijden binnen een tijdsvensters worden gecombineerd en ingepland. Eens orders gepland zijn, probeert men een order voor de terugreis te vinden. Aangezien het over een zeer groot aantal orders kan gaan, wordt in deze stap gebruik gemaakt van de techniek van binaire zoekbomen.

De vijfde stap probeert de gevonden rittenplanning nog te verbeteren door middel van lokale zoekmechanismen. Er wordt hier gezocht naar nog onbenutte plaats of tijd, die mogelijk kan opgevuld worden met orders van andere ritten. Er kan ook nog van transportmodus gewisseld worden, hierdoor kan de rit misschien nog met andere ritten gecombineerd worden, bij de nieuwe aannemer. De nieuwe aannemer kan mogelijk ook goedkoper zijn. Als laatste wordt de gevonden rittenplanning getest. Hiermee kan men kosten en laad- en levertijden opmeten en kosten berekenen. Ook kan zo gekeken worden of de ritten aan de beperkingen voldoen.

Bookbinder en Fox (1998) beschrijven een netwerk met vijf grote oorsprongen in Canada en drie bestemmingen in Mexico, namelijk de 'gouden driehoek'. De extra moeilijkheid in dit routeplanningsprobleem zijn de handelsbeperkingen tussen sommige landen, die extra kosten kunnen opleveren. Ze beschouwen een heel aantal spoor- en waterwegen. Voor iedere verbinding tussen twee punten in het netwerk worden kosten en tijd berekend. Met deze gegevens kunnen kosten en tijd van totale routes berekend worden en wordt de beste oplossing gekozen.

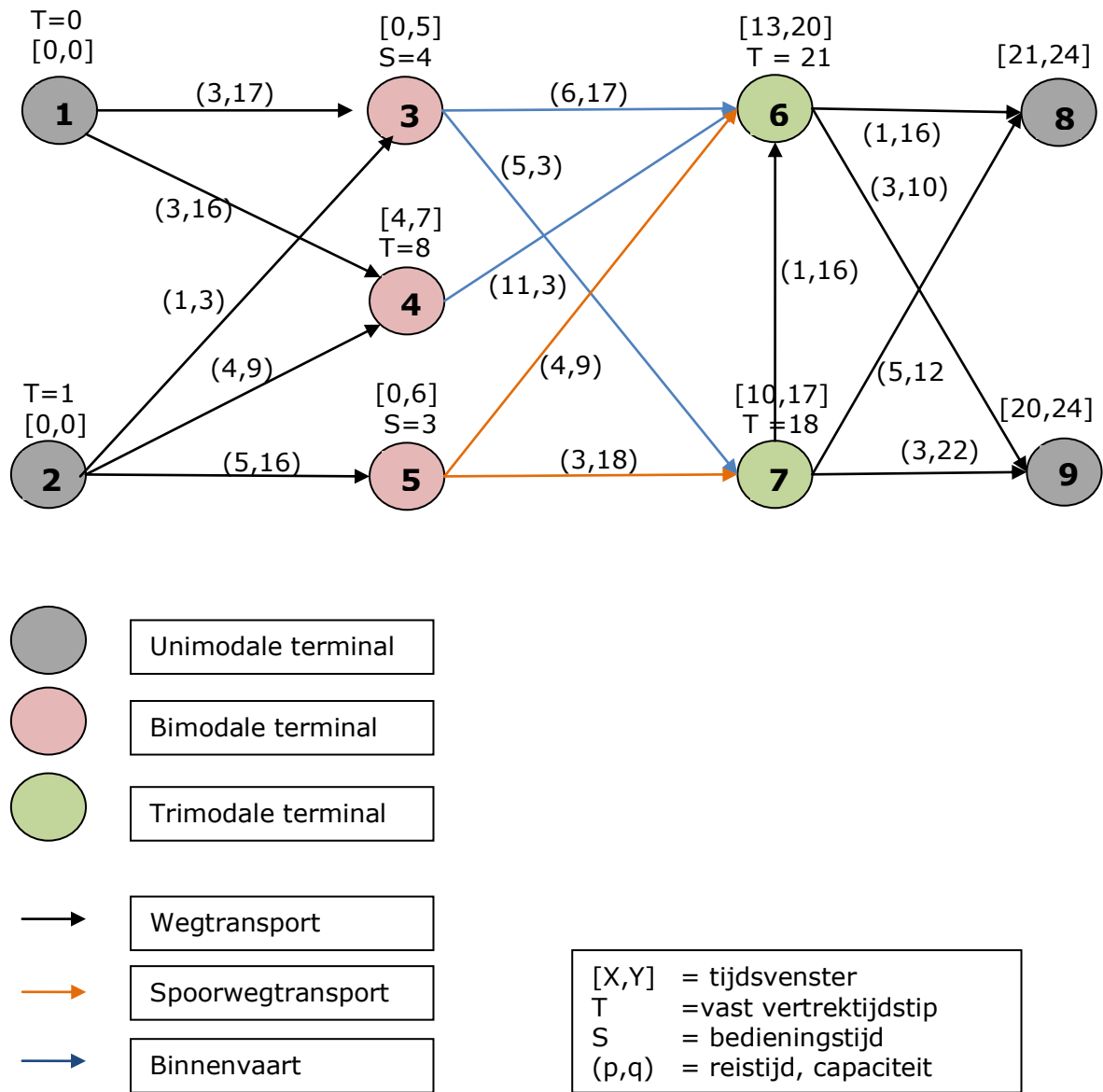
4. PRAKTIJKSTUDIE

In dit hoofdstuk zal aan de hand van een kleinschalig voorbeeld gedemonstreerd worden hoe de oplossingsmethode van Chang (2007) in de praktijk gebruikt kan worden. In de eerste paragraaf wordt het netwerk en de goederenstromen die getransporteerd moeten worden beschreven. Daarna wordt de getrapte kostenfunctie verder uitgediept, zodat ook hiervan een duidelijk beeld verkregen wordt. Vervolgens wordt het voorbeeld uitgewerkt, rekening houdend met de twee doelfuncties, bestaande tijdsvensters en capaciteitsbeperkingen. Hier wordt getracht een optimale oplossing te bekomen. Op basis van bovenstaande berekeningen zullen twee heuristisch geformuleerd worden. Eén heuristisch zal gericht zijn op kostenminimaliserende problemen en een tweede heuristisch beoogt de tijdsminimaliserende rittenplanningsproblemen. Tenslotte zal een nieuw rittenplanningsprobleem gedefinieerd worden, waarop beide heuristieken op hun operationaliteit getest zullen worden.

4.1 BESCHRIJVING NETWERK

Het netwerk wat in deze praktijkstudie gebruikt zal worden als cijfervoorbeeld bestaat uit negen knooppunten en vijftien verbindingen tussen de knooppunten. Knooppunten één en twee zijn telkens de oorsprongen van de routes en knooppunten acht en negen zijn bestemmingen. De overige knooppunten zijn multimodale terminals, waarin kan overgeschakeld worden tussen verschillende transportmodi. Vanuit knooppunten één en twee vertrekken alle goederenstromen via het wegtransport. Knooppunten drie en vier zijn bimodale terminals, waar een overschakeling tussen wegtransport en binnenvaart gemaakt kan worden. Dit heeft als gevolg dat verbindingen die vanuit deze knooppunten vertrekken enkel per binnenvaartschip bediend kunnen worden. Knooppunt vijf is een bimodale terminal, waar het wegtransport kan overschakelen op de spoorweg. De verbindingen die vanuit dit knooppunt vertrekken richting bestemmingen, worden via het spoor bediend. Knooppunten zes en zeven zijn trimodale terminals, waar een overschakeling tussen zowel weg-, spoor- en binnenvaartvervoer kan gebeuren. Het transport dat vertrekt vanuit deze terminals gebeurt steeds via de weg. Goederen die

toekomen in deze terminals kunnen zowel via het spoor als via de binnenvaart aankomen.



FIGUUR 8: VOORSTELLING MULTIMODAAL NETWERK (BRON: CHANG, 2007)

Vervolgens beschrijven we vier goederenstromen, die we aanduiden met de letters m_1 , m_2 , m_3 en m_4 . Deze goederenstromen worden beschreven door een oorsprong, een bestemming en een hoeveelheid te transporteren goederen (zie tabel 2).

TABEL 2: BESCHRIJVING VAN DE GOEDERENSTROMEN

Goederenstroom	Oorsprong (knooppunt)	Bestemming (knooppunt)	Hoeveelheid goederen (eenheden) = W_{ij}^m
m_1	1	8	1
m_2	1	9	5
m_3	2	8	6
m_4	2	9	2

Elk knooppunt beschikt over een tijdsvenster ($[X,Y]$) en een servicetijd (S). Voor sommige knooppunten is er een vertrek volgens een bepaald schema gedefinieerd (T). De tijdsvensters geven de tijden aan, waarbinnen men in het knooppunt mag arriveren, met andere woorden wanneer er in het knooppunt ladingen gelost mogen worden. Deze tijdsvensters zijn harde tijdsvensters en mogen bijgevolg nooit overschreden worden. De servicetijd geeft aan hoeveel tijd men nodig zal hebben in het desbetreffende knooppunt om transacties uit te voeren. Deze transacties kunnen zijn: het laden van de transportmodus, het overladen op een andere transportmodus, het combineren van twee verschillende goederenstromen, het afladen van ladingen, enzovoorts. De geschematiseerde vertrektijd is de tijd waarop een transportmodus in het desbetreffende knooppunt moet vertrekken. Als een goederenstroom niet tijdig gereed is om te vertrekken in desbetreffend knooppunt, kan het knooppunt niet gebruikt worden in het pad. Al deze gegevens worden voorgesteld in tabel 3.

TABEL 3: BESCHRIJVING VAN DE KNOOPPUNTEN

Knooppunt	Tijdsvenster $[X,Y]$	Service tijd (S_i)	Geschematiseerde vertrektijd (T of D_i)
1	[0,0]	/	0
2	[0,0]	/	1
3	[0,5]	4	/
4	[4,7]	/	8
5	[0,6]	3	/
6	[13,20]	/	21
7	[10,17]	/	18
8	[21,24]	/	/
9	[20,24]	/	/

Bij iedere verbinding tussen twee knooppunten worden de reistijd en capaciteit gegeven. De reistijd op een verbinding is de tijd die nodig is voor de goederen om met desbetreffende transportmodus van het ene knooppunt tot in het andere knooppunt te geraken. De capaciteit van een verbinding geeft de maximale hoeveel eenheden goederen aan, die via die verbinding getransporteerd kunnen worden. Deze gegevens worden voorgesteld in tabel 4.

TABEL 4: BESCHRIJVING VAN DE VERBINDINGEN

Verbinding (i,j)	Reistijd op de link (t_{ij})	Capaciteit op de link (M_{ij}^r)
(1,3)	3	17
(1,4)	3	16
(2,3)	1	3
(2,4)	4	9
(2,5)	5	16
(3,6)	6	17
(3,7)	5	3
(4,6)	11	3
(5,6)	4	9
(5,7)	3	18
(6,8)	1	16
(6,9)	3	10
(7,6)	1	16
(7,8)	5	12
(7,9)	3	22

Met behulp van bovenstaande tabellen kan doelfunctie Z_{p_2} ingevuld worden. De vertrektijd D_i is de geschematiseerde vertrektijd, indien deze in een knooppunt aanwezig is. De aankomsttijd A_i in een knooppunt berekent men door de vertrektijd in vorig knooppunt op te tellen bij de reistijd die nodig is om de verbinding tussen de twee knooppunten te overbruggen. De servicetijd S_i vindt men terug in tabel 3.

$$Z_{p_2} = \min \sum_{ij} \sum_m (\max\{D_j, A_j^m + S_j^m\} - \max\{D_i, A_i^m + S_i^m\}) W_{ij}^m$$

4.2 KOSTENFUNCTIE

De getrapte lineaire concave kostenfunctie wordt weergegeven in tabel 5. Er wordt gebruik gemaakt van intervallen, die per verbinding de verschillende hoeveelheden aangeven waarvoor verschillende kostenniveaus bestaan. Per interval is er een vaste kost en een variabele of eenheidskost gegeven. Door de intervallenbenadering van de kosten worden de schaalvoordelen in kaart gebracht.

TABEL 5: GETRAPTE LINEAIRE CONCAVE KOSTENFUNCTIE

Verbinding (i,j)	Interval (r)	Vaste kost (F_{ij}^r)	Variabele kost (C_{ij}^r)
(1,3)	0-7	12	6
	7-12	26	4
	12-17	62	1
(1,4)	0-2	8	9
	2-9	14	6
	9-16	50	2
(2,3)	0-1	11	20
	1-2	20	11
	2-3	32	5
(2,4)	0-4	7	6
	4-5	11	5
	5-9	21	3
(2,5)	0-8	9	4
	8-11	17	3
	11-16	39	1
(3,6)	0-6	10	3
	6-12	16	2
	12-17	28	1
(3,7)	0-1	10	6
	1-2	11	5
	2-3	17	2
(4,6)	0-1	12	3
	1-2	13	2
	2-3	15	1

(5,6)	0-3	9	6
	3-6	15	4
	6-9	33	1
(5,7)	0-7	11	8
	7-12	25	6
	12-18	61	3
(6,8)	0-7	10	20
	7-10	45	15
	10-16	145	5
(6,9)	0-2	10	11
	2-5	18	7
	5-10	43	2
(7,6)	0-4	9	15
	4-9	29	10
	9-16	92	3
(7,8)	0-3	12	5
	3-9	15	4
	9-12	33	2
(7,9)	0-7	8	9
	7-18	29	6
	18-22	101	2

Bovenstaande tabel kan aan de eerste doelfunctie (Z_{p1}) gekoppeld worden.

$$Z_{p1} = \min \sum_{ij} \sum_r F_{ij}^r Y_{ij}^r + \sum_{ij} \sum_r \sum_m C_{ij}^r X_{ij}^{mr}$$

De doelfunctie betreffende de kosten wordt berekend door van iedere verbinding (i,j), waarvan gebruikt gemaakt wordt, de vaste kost F_{ij}^r voor het juiste interval op te tellen. De binaire variabele Y_{ij}^r is bij gebruik van de verbinding gelijk aan één, wat betekent dat de vaste kost meegerekend wordt. De vaste kosten van de verbindingen (i,j) die niet gebruikt worden, worden buiten beschouwing gelaten. Zij worden namelijk vermenigvuldigd met de binaire variabele Y_{ij}^r die gelijk is aan nul, indien de link niet

gebruikt wordt . Bij deze vaste kost wordt vervolgens voor iedere verbinding (i,j) de variabele kost C_{ij}^r opgeteld. De variabele kosten voor het juiste interval worden eerst nog vermenigvuldigd met het aantal eenheden die via die verbinding (i,j) getransporteerd worden.

4.3 ENUMERATIE VAN MOGELIJKE OPLOSSINGEN

De keuze van de beste oplossing is afhankelijk van de gekozen doelfuncties. Aangezien er in dit voorbeeld gestreefd wordt naar de minimalisatie van zowel tijd als kosten, wordt een wegingsfactor gebruikt. Het gewicht (ω) geeft het relatieve belang weer van de doelfunctie voor tijdsminimalisatie (Z_{p_2}) ten opzichte van deze voor kostenminimalisatie (Z_{p_1}). De verschillende mogelijke gewichten (ω) zijn 0, 1 10 of 100. Dit wilt zeggen dat de doelfunctie voor tijdsminimalisatie niet belangrijk is, even belangrijk is, of tien of honderd keer belangrijker kan zijn dan de doelfunctie voor kostenminimalisatie.

Het optimale pad zoeken we aan de hand van de doelfunctie Z_p . Alle gegevens die hiervoor nodig zijn, kunnen gevonden worden in tabellen 2 tot en met 5 en figuur 8.

$$Z_p = \min \sum_{ij} \sum_r F_{ij}^r Y_{ij}^r + \sum_{ij} \sum_r \sum_m C_{ij}^r X_{ij}^{mr} + \omega \sum_{ij} \sum_m (\max\{D_j, A_j^m + S_j^m\} - \max\{D_i, A_i^m + S_i^m\}) W_{ij}^m$$

De eerste stap bij het zoeken naar de optimale oplossing is het zoeken van de optimale oplossingen voor iedere aparte goederenstroom. Per goederenstroom worden alle mogelijke paden gezocht en wordt per pad de doelfunctiewaarde berekend. Het pad met de laagste doelfunctiewaarde wordt beschouwd als deel van een beginoplossing, waarmee vervolgens verbeteringen gezocht worden. Vervolgens wordt gezocht naar de combinatie van paden voor alle goederenstromen die omwille van schaalvoordelen de beste oplossing biedt. Aangezien vaste kosten slechts één keer per verbinding (i,j) moeten aangerekend worden, kan de totale optimale oplossing verschillen van de gevonden oplossingen per goederenstroom. Tenslotte kunnen goederenstromen ook opgesplitst worden over verschillende paden, om op die manier nog meer te kunnen profiteren van schaalvoordelen. In onderstaande paragrafen wordt stap voor stap richting de optimale oplossing voor het probleem gezocht.

4.3.1 OPTIMALE OPLOSSING PER GOEDERENSTROOM

Voor goederenstroom m_1 volgt een gedetailleerde beschrijving van alle berekeningen, zodat duidelijk gemaakt wordt hoe men het optimale pad voor deze stroom bekomt. De berekeningen voor goederenstromen m_2 , m_3 en m_4 gebeuren volledig analoog en zullen niet uitgebreid besproken worden. Hiervan vindt men de berekeningen in bijlagen 2 tot en met 4.

Een eerste stap in het zoeken naar het optimale pad voor een goederenstroom, is het opsommen van alle mogelijke paden waarlangs de goederenstroom getransporteerd kan worden. Goederenstroom m_1 transporteert één eenheid goederen van oorsprong 1 naar bestemming 8. Hiervoor komen vier paden in aanmerking. Ten eerste kan het goed van oorsprong 1, via knooppunt 3 naar knooppunt 6 getransporteerd worden, om zo in bestemming 8 te geraken. Een andere optie is om van oorsprong 1 naar knooppunt 3 te reizen, vervolgens naar knooppunt 7, dan naar 6, om aan te komen in bestemming 8. Een derde optie transporteert het goed van bestemming 1 naar knooppunt 3, dan naar 7 en tenslotte naar 8. Het laatste mogelijke pad maakt gebruik van de knooppunten 1, 4, 6 en 8.

TABEL 6: MOGELIJKE PADEN VOOR GOEDERENSTROOM m_1

Optie 1	(1,3,6,8)
Optie 2	(1,3,7,6,8)
Optie 3	(1,3,7,8)
Optie 4	(1,4,6,8)

Een volgende stap in de oplossing is het berekenen van de doelfunctiewaarde van Z_{p_1} , die voor ieder pad de totale kosten voorstelt.

$$Z_{p_1} = \min \sum_{ij} \sum_r F_{ij}^r Y_{ij}^r + \sum_{ij} \sum_r \sum_m C_{ij}^r X_{ij}^{mr}$$

Hiervoor worden per verbinding de variabele en de vaste kosten opgeteld. Men moet echter opletten dat de kosten van het interval voor de juiste hoeveelheden gebruikt worden. De vaste kost wordt één keer per interval aangerekend. De variabele kost van

dat interval wordt vermenigvuldigd met het aantal eenheden dat zich in die goederenstroom bevindt. Deze twee samen maken de totale kost. Hieronder worden deze kosten uitgebreid berekend voor pad (1,3,6,8). Voor de andere mogelijke paden voor goederenstroom m_1 kunnen de berekeningen in bijlage 1 teruggevonden worden.

TABEL 7: BEREKENING VAN DE KOSTEN VOOR PAD (1,3,6,8)

Link (i,j)	range (r)	vaste kost (F_{ij}^r)	variabele kost per eenheid (C_{ij}^r)	variabele kost ($C_{ij}^r * X_{ij}^{mr}$)	totale kost
(1,3)	0-7	12	6	6	18
(3,6)	0-6	10	3	3	13
(6,8)	0-7	10	20	20	30
TOTAAL					61

Aangezien slechts één eenheid goederen getransporteerd wordt, zal telkens het kleinste interval voor de kosten genomen worden. Voor verbinding (1,3) is de vaste kost gelijk aan € 12. De variabele kosten zijn gelijk aan € 6 vermenigvuldigd met één eenheid. De totale kosten zijn bijgevolg gelijk aan € 18. Voor de verbinding tussen knooppunt drie en zes zijn de vaste kosten gelijk aan € 10. De variabele kosten zijn gelijk aan € 3 per eenheid. De totale kosten voor deze verbinding zijn gelijk aan € 13. Als laatste zijn de vaste kosten voor verbinding (6,8) gelijk aan € 10 en de variabele kosten zijn gelijk aan € 20 per eenheid. De totale kosten voor deze verbinding lopen dus op tot € 30. De totale kosten voor het gehele pad zijn bijgevolg gelijk aan € 61 (€18 + €13 + €30). ($Z_{p1} = 61$)

Een derde stap is het berekenen van de doelfunctiewaarde voor Z_{p2} , die een waarde geeft voor de reistijd die nodig is om een bepaald pad te doorkruisen.

$$Z_{p2} = \min \sum_{ij} \sum_m (\max\{D_j, A_j^m + S_j^m\} - \max\{D_i, A_i^m + S_i^m\}) W_{ij}^m$$

Deze waarde is een vermenigvuldiging van de totale reistijd op het pad met het aantal eenheden in de goederenstroom. Hiervoor zijn de reistijden van de verbindingen, de bedieningstijden in de knooppunten en de vaste vertrektijdstippen nodig. Als er een geschematiseerd vertrektijdstip in een knooppunt is, moet de goederenstroom op dit

tijdstip vertrekken. Indien er geen geschematiseerd vertrektijdstip is, wordt de som van de aankomsttijd in dat knooppunt met de bedieningstijd in dat knooppunt gebruikt als vertrektijdstip. Per verbinding (i,j) wordt dan de vertrektijd voor knooppunt j vermindert met de vertrektijd voor knooppunt i . Zo bekomen we uiteindelijk de totale reistijd van het pad. Als laatste wordt deze reistijd vermenigvuldigd met het aantal goederen in de goederenstroom om zo een waarde voor Z_{p2} te bekomen. Er moet nog opgemerkt worden dat een knooppunt met een geschematiseerd vertrektijdstip enkel gebruikt kan worden in een pad als de goederen er tijdig aanwezig kunnen zijn. Voor het pad $(1,3,6,8)$ volgt een berekening in tabel 8. Voor de andere paden zijn de berekeningen terug te vinden in bijlage 1.

TABEL 8: BEREKENING VAN DE REISTIJD VOOR PAD (1,3,6,8)

Link (i,j)	Vertrektijd knooppunt i (D_i)	reistijd link (i,j)	aankomsttijd knooppunt j (A_j^m)	servicetijd knooppunt j (S_j^m)
1-3	0	3	3	4
3-6	7	6	13	
6-8	21	1	22	

De vertrektijd in knooppunt 1 is tijdstip nul. De reistijd op verbinding $(1,3)$ is drie uur. Bijgevolg komt goederenstroom m_1 in knooppunt 3 aan op tijdstip drie. De servicetijd in knooppunt 3 bedraagt vier uur. De goederenstroom kan dus pas vertrekken in knooppunt 3 op tijdstip zeven. Aangezien er in knooppunt 3 geen vast vertrektijdstip wordt aangegeven, zal dit dus ook het tijdstip zijn dat de goederenstroom vertrekt. De reistijd op verbinding $(3,6)$ is zes uur. De aankomsttijd in knooppunt 6 is bijgevolg op tijdstip 13. Er is geen servicetijd nodig in knooppunt 6. Wel bestaat er hier een vast vertrektijdstip $T = 21$ uur. De goederenstroom vertrekt vanuit knooppunt 6 op tijdstip 21 en komt aan in knooppunt 8 op tijdstip 22, aangezien de reistijd één uur bedraagt op deze verbinding. Tenslotte moet de waarde voor dit tijdstip nog vermenigvuldigd worden met het aantal eenheden in de goederenstroom om een waarde te krijgen voor de tweede doelfunctie. ($Z_{p2} = 22 * 1 = 22$)

De laatste stap in het vinden van het optimale pad voor goederenstroom m_1 is het combineren van de twee doelfuncties. Hiervoor wordt een gewicht ω gebruikt, dat gelijk

wordt gesteld aan 0, 1, 10 of 100, afhankelijk van de belangrijkheid van Z_{p2} . Voor $\omega = 0$ wordt enkel gekeken naar de gevonden waarden voor Z_{p1} . Voor $\omega = 1$ worden de waarden van Z_{p1} opgeteld bij de waarden van Z_{p2} . Voor $\omega = 10$ worden de waarden van Z_{p1} opgeteld bij tien keer de waarden van Z_{p2} . En tenslotte voor $\omega = 100$ worden de waarden van Z_{p1} bij honderd keer de waarden van Z_{p2} opgeteld. Nu kan er per waarde ω gezien worden welke pad de laagste doelfunctiewaarde aangeeft voor Z_p .

In tabel 9 zijn de doelfunctiewaarden voor goederenstroom m_1 samengevat. Afhankelijk van het gekozen gewicht (ω) wordt een verschillende doelfunctiewaarde bekomen voor ieder mogelijk pad. Per kolom wordt in licht grijze kleur aangeduid welk pad het beste is voor het gekozen gewicht ω .

TABEL 9: DOELFUNCTIEWAARDEN VOOR GOEDERENSTROOM m_1

pad	Z_p met $\omega = 0$	Z_p met $\omega = 1$	Z_p met $\omega = 10$	Z_p met $\omega = 100$
(1,3,6,8)	61	83	281	2261
(1,3,7,6,8)	88	110	308	2288
(1,3,7,8)	51	74	281	2351
(1,4,6,8)	62	84	282	2262

Voor het pad (1,3,6,8) is de waarde voor Z_p gelijk aan 61, als de doelfunctie die betrekking heeft op de reistijd geen belang heeft. Als beide doelstellingen even belangrijk zijn, is de waarde voor Z_p voor pad (1,3,6,8) gelijk aan 61 vermeerderd met 22, wat 83 geeft. Als tijd tien keer zo belangrijk is als kosten, is de waarde voor Z_p voor dit pad gelijk aan 61 vermeerderd met 10 maal 22, wat 281 geeft. Als tijd tenslotte heel erg belangrijk is, met name honderd keer belangrijker dan kosten, dan wordt 22

vermenigvuldigd met 100 en daarbij wordt 61 opgeteld. De waarde voor Z_p is bijgevolg gelijk aan 2261. Als de doelfunctiewaarden van pad (1,3,6,8) worden vergeleken met die van de andere mogelijke paden, kan besloten worden dat dit pad een optimale oplossing biedt als tijd belangrijker wordt dan kosten, met name vanaf dat ω gelijk is of groter wordt dan 10.

Wanneer ook rekening gehouden wordt met tijdsvensters, moet echter gelet worden of aan de voorwaarde van de tijdsvensters in ieder knooppunt voldaan wordt. Als hier niet aan voldaan wordt, kan geen gebruik worden gemaakt van het voorgestelde pad en zal men het pad met de tweede kleinste doelfunctiewaarde voor Z_p moeten kiezen. Voor het pad (1,3,6,8) wordt aan alle tijdsvensters voldaan.

Tenslotte heeft iedere verbinding (i,j) een capaciteitsbeperking. Men moet dus kijken of de goederenstroom wel over een bepaalde verbinding kan getransporteerd worden. Maar ook of de totale oplossing, met andere woorden de combinatie van de vier goederenstromen via hun individuele optimale pad, de capaciteitsbeperkingen niet overschrijden. Indien dit wel het geval is, kunnen goederenstromen mogelijk opgesplitst worden, zodat ze via meerdere paden getransporteerd worden. Voor het pad (1,3,6,8) wordt geen enkele capaciteitsbeperking overschreden.

In bijlage 1 vindt men een overzicht van de berekeningen van tijd en kosten voor alle mogelijke paden voor goederenstroom m_1 . Ook tijdsvensters en capaciteiten worden hierin aangegeven en gecontroleerd. Uit deze tabel kan besloten worden dat als de doelfunctie met betrekking tot de reistijd onbelangrijk of even belangrijk is als de kosten, het pad (1,3,7,8) een goede oplossing biedt voor goederenstroom m_1 . Echter als de tijdsdoelfunctie belangrijker is dan de kostendoelfunctie, is het pad (1,3,6,8) een betere oplossing voor het transport van deze goederenstroom.

Voor de overige goederenstromen gebeurt het zoeken naar de optimale oplossing volledig analoog als bij goederenstroom m_1 . De uitwerking hiervan kan teruggevonden worden in bijlagen 2 tot en met 4. In tabel 10 vinden we alle oplossingen terug voor iedere goederenstroom. We zien dat er bij goederenstroom m_2 problemen optreden in verband met de capaciteit van verbinding (3,7). Deze verbinding heeft een capaciteit van slechts drie eenheden, terwijl goederenstroom m_2 vijf eenheden transporteert. Om deze

reden kan enkel pad (1,3,6,9) gebruikt worden om goederenstroom m_2 individueel te transporteren.

TABEL 10: OPLOSSINGEN VOOR ALLE GOEDERENSTROMEN EN ALLE GEWICHTEN

Gewicht (ω)	Goederenstroom			
	m_1	m_2	m_3	m_4
$\omega = 0$	(1,3,7,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,5,7,9)
$\omega = 1$	(1,3,7,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,5,7,9)
$\omega = 10$	(1,3,6,8) of (1,3,7,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,5,7,9)
$\omega = 100$	(1,3,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,6,8)	(2,5,7,9)

4.3.2 EEN OPLOSSING VOOR HET GEHELE GOEDERENPAKKET

Tabel 10 geeft het optimale pad weer voor iedere aparte goederenstroom. De vier goederenstromen worden echter in combinatie getransporteerd, waardoor men slechts één keer per verbinding een vaste kost moet aanrekenen. De gevonden optimale paden voor iedere goederenstroom garanderen dus niet de optimale oplossing voor het gehele goederenpakket (m_1 tot en met m_4). Om de optimale oplossing te bekomen berekenen we de doelfunctiewaarde voor alle mogelijke combinaties van paden voor de vier goederenstromen. Al deze berekeningen zijn terug te vinden in bijlagen 5 tot en met 16.

In tabel 11 zijn achttien mogelijke combinaties van paden gegeven. Deze combinaties werden bekomen door alle toegelaten paden van goederenstroom m_1 , m_2 , m_3 en m_4 te combineren. Met toegelaten paden worden de paden bedoeld, waarbij geen capaciteiten of tijdsvensters overschreden werden. Voor goederenstroom m_4 zijn slechts drie paden gekozen, namelijk de drie paden met de laagste kosten. Deze keuze is bewust gemaakt, aangezien er anders teveel combinaties voorkwamen, die toch niet tot de optimale oplossing zouden leiden. Voor goederenstroom m_1 valt pad (1,4,6,8) af door het overschrijden van tijdsvensters, waardoor drie paden overblijven. Voor m_2 komt slechts één pad in aanmerking, namelijk pad (1,3,6,9). Voor m_3 komen twee paden in aanmerking, namelijk pad (2,5,7,6,8) en pad (2,5,7,8). Voor m_4 is gekozen voor de paden (2,5,7,9), (2,4,6,9) en (2,5,6,9) aangezien deze drie paden de laagste kosten hebben. Er is bewust gekozen om de overige mogelijke paden niet in de berekeningen op

te nemen, aangezien zij ofwel verbinding (2,3) bevatten ofwel verbinding (7,6). De kosten van deze twee laatstgenoemde verbindingen zijn veel te hoog en moeten absoluut gemeden worden.

TABEL 11: VERSCHILLENDE COMBINATIES VAN DE VIER GOEDERENSTROMEN

	m1	m2	m3	m4
Combinatie 1	(1,3,7,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,5,7,9)
Combinatie 2	(1,3,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,5,7,9)
Combinatie 3	(1,3,7,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,5,7,9)
Combinatie 4	(1,3,7,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,6,8)	(2,5,7,9)
Combinatie 5	(1,3,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,6,8)	(2,5,7,9)
Combinatie 6	(1,3,7,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,6,8)	(2,5,7,9)
Combinatie 7	(1,3,7,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,4,6,9)
combinatie 8	(1,3,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,4,6,9)
Combinatie 9	(1,3,7,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,4,6,9)
Combinatie 10	(1,3,7,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,6,8)	(2,4,6,9)
Combinatie 11	(1,3,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,6,8)	(2,4,6,9)
Combinatie 12	(1,3,7,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,6,8)	(2,4,6,9)
Combinatie 13	(1,3,7,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,5,6,9)
Combinatie 14	(1,3,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,5,6,9)
Combinatie 15	(1,3,7,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,8)	(2,5,6,9)
Combinatie 16	(1,3,7,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,6,8)	(2,5,6,9)
Combinatie 17	(1,3,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,6,8)	(2,5,6,9)
Combinatie 18	(1,3,7,6,8)	(1,3,6,9)	(2,5,7,6,8)	(2,5,6,9)

In tabel 12 zijn de berekening van Z_p waardes voor de verschillende gewichten weergegeven. Voor ω gelijk aan één ziet men dat de 13e combinatie, namelijk pad (1,3,7,8) voor m_1 , pad (1,3,6,9) voor m_2 , pad (2,5,7,8) voor m_3 en pad (2,5,6,9) voor m_4 , de laagst mogelijke doelfunctiewaarde oplevert als tijd en kosten even belangrijk zijn. Er kan hier opgemerkt worden dat deze oplossing niet gelijk is aan de gevonden oplossingen voor de vier aparte goederenstromen. Schaalvoordelen door bundeling van goederenstromen zorgen ervoor dat een ander pad voor goederenstroom m_4 beter is.

TABEL 12: DOELFUNCTIEWAARDEN VOOR DE VERSCHILLENDE COMBINATIES VAN PADEN

	Zp w = 0	Zp w = 1	Zp w = 10	Zp w = 100
Combinatie 1	325	640	3475	31825
Combinatie 2	338	652	3478	31738
Combinatie 3	375	689	3515	31775
Combinatie 4	517	826	3607	31417
Combinatie 5	508	828	3708	32508
Combinatie 6	546	854	3626	31346
Combinatie 7	325	641	3485	31925
combinatie 8	342	662	3542	32342
Combinatie 9	379	699	3579	32379
Combinatie 10	524	839	3674	32024
Combinatie 11	512	838	3772	33112
Combinatie 12	536	844	3616	31336
Combinatie 13	310	631	3520	32410
Combinatie 14	323	655	3643	33523
Combinatie 15	360	680	3560	32360
Combinatie 16	502	817	3652	32002
Combinatie 17	493	819	3753	33093
Combinatie 18	531	845	3671	31931

Vervolgens wordt de beste oplossing gezocht waarbij de minimalisatie van de tijd volledig buiten beschouwing wordt gelaten. ω wordt gelijk gesteld aan nul, zodat Z_{p_2} geen invloed heeft op het resultaat. De gevonden doelfunctiewaarden voor Z_{p_1} worden met elkaar vergeleken voor de achttien verschillende combinaties. De oplossingen voor de achttien verschillende combinaties van goederenstromen zijn samengevat in tabel 12. De berekeningen van Z_{p_1} zijn terug te vinden in bijlagen 5 tot en met 22. De beste oplossing wordt gegeven door de dertiende combinatie van paden. Er kan geconcludeerd worden dat het pad (2,5,6,9) voor goederenstroom m_4 het verschil maakt.

Als de tijd wel erg belangrijk is, worden de gevonden doelfunctiewaarden Z_{p_1} opgeteld met tien keer de gevonden doelfunctiewaarden voor Z_{p_2} . Het resultaat hiervan voor de

achttien verschillende combinaties van paden is terug te vinden in tabel 12. Hier wordt de beste oplossing aangeboden door de eerste combinatie.

Tenslotte worden de gevonden doelfunctiewaarden Z_{p_1} opgeteld met honderd keer de gevonden doelfunctiewaarden voor Z_{p_2} . Tijd wordt hier dan zeer voornaam, en kosten zijn praktisch te verwaarlozen bij de bepaling van het resultaat. De twaalfde combinatie geeft de beste oplossing. Het is opmerkelijk dat voor drie van de vier goederenstromen een ander pad wordt gekozen als tijd bijzonder belangrijk wordt.

4.3.3 GESPLITSTE GOEDERENSTROMEN

Als laatste stap kan bij het zoeken naar een goede rittenplanning overwogen worden om de goederenstromen op te splitsen. De goederen per goederenstromen moeten namelijk niet bij elkaar gehouden worden. Door het opsplitsen van goederenstromen kunnen sommige verbindingen, meestal die met lagere kosten, beter benut worden. Schaalvoordelen zorgen er in dat geval voor dat de doelfunctiewaarde nog verminderd kan worden. Vanuit de reeds gevonden oplossing wordt gezocht of er nog ergens verbeteringen in de doelfunctiewaarde kunnen gevonden worden.

Een voorbeeld van een gesplitste goederenstroom wordt gegeven in tabel 13.

TABEL 13: VOORBEELD VAN EEN GESPLITSTE GOEDERENSTROOM

Goederenstroom	Pad	Aantal eenheden via pad
M1	(1,3,7,8)	1
M2	(1,3,7,9)	2
	(1,3,6,9)	3
M3	(2,5,7,8)	6
M4	(2,5,7,9)	2

Verbinding (3,7), die slechts over een capaciteit van drie eenheden beschikt, wordt in dit voorbeeld volledig benut door goederenstroom m_1 en twee eenheden van goederenstroom m_2 . Hierdoor wordt de doelfunctiewaarde, die in tabel 12 voorgesteld

wordt bij combinatie 1 en gewicht ω gelijk aan 1, nog verminderd met één eenheid. De nieuwe doelfunctiewaarde is bijgevolg gelijk aan 639.

In deze masterproef zal geen volledige enumeratie gegeven worden van alle mogelijke oplossingen door opsplitsing van goederenstromen. Naar de toekomst toe kan dit een nuttige tip zijn voor verder onderzoek op te baseren.

4.4 BESCHRIJVING HEURISTIEK

Na het vinden van de optimale oplossing voor het hierboven beschreven probleem, worden de gevolgde stappen samengevat in een heuristiek. De heuristiek is een snelle en eenvoudige manier om in enkele stappen een goede oplossing voor een rittenplanningsprobleem te bekomen. Het is echter geen garantie dat de meest optimale oplossing effectief gevonden kan worden met de heuristiek. De in paragraaf 4.4.1 geformuleerde heuristiek is geldig voor problemen waarbij voornamelijk kosten belangrijk zijn. Als het uitermate belangrijk is dat de goederen zo snel mogelijk op de bestemming geraken, en kosten geen probleem vormen, is een andere heuristiek van toepassing. Deze wordt in een paragraaf 4.4.2 geformuleerd.

4.4.1 HEURISTIEK VOOR KOSTGERICHTE PROBLEMEN

STAP 1 : Bereken voor iedere verbinding (i,j) de gemiddelde kost per eenheid

gemiddelde kost per eenheid =

$$\frac{\text{vaste kost van het grootste interval}}{\text{bovengrens van het interval}} + \text{gemiddelde variabele kost per eenheid}$$

STAP 2 : Rangschik alle gemiddelde waardes van klein naar groot.

STAP 3: Start in de oorsprong(en).

STAP 4: Noteer hoeveel eenheden zich overal bevinden. Noteer alle verbindingen die vanuit die knooppunten vertrekken. Noteer de gemiddelde kosten van de verbindingen

en rangschik deze van klein naar groot. Noteer de capaciteiten van de verbindingen. Plaats de eenheden op de verbinding met de laagste kosten.

Indien er in knooppunt i enkel één verbinding (i,j) overblijft, die zich onderaan in de tabel van de gemiddelde kosten (STAP 2) bevindt, ga dan terug naar knooppunt $i-1$ en zoek naar een mogelijke beter pad. Controleer in stap 6 of deze oplossing beter is.

Indien de capaciteit van verbinding (i,j) vol is, plaats dan de overige eenheden op de verbinding met de tweede laagste gemiddelde kosten. Als er vanuit knooppunt i geen andere verbindingen ter beschikking zijn, noteer dit knooppunt i dan op een 'zwarte' lijst, zodat men ervoor zorgt dat men niet meer in knooppunt i terecht komt.

Indien goederenstromen opgesplitst worden die naar dezelfde bestemming moeten, moet gecontroleerd worden of de som van de vaste kosten van de twee verbindingen plus de variabele kosten van de twee verbindingen, lager is dan de vaste en variabele kost als men alle eenheden samen op de duurdere verbinding zet. Als deze som niet kleiner is, zet dan alle eenheden samen op de duurdere verbinding.

STAP 5: Herhaal stap 4 tot de bestemming(en) bereikt is/zijn.

STAP 6: Bereken de som van de gemiddelde kosten van de oude oplossing en de som van de gemiddelde kosten van de nieuwe oplossing (zie stap 4). Indien de nieuwe oplossing goedkoper blijkt dan de oude oplossing, dan mag ze behouden worden. Indien de oude oplossing toch goedkoper blijkt te zijn, ga dan terug naar de oude oplossing.

4.4.2 TOEPASSING HEURISTIEK OP VOORBEELD

De heuristiek voor kostenminimaliserende problemen zal in deze paragraaf getest worden op het voorbeeld van Chang (2007). De gevonden oplossing zal vervolgens vergeleken worden met de eerder gevonden oplossingen voor het voorbeeld.

STAP 1 : Berekening van de gemiddelde kosten per verbinding (i,j).

TABEL 14: GEMIDDELDE KOSTEN PER VERBINDING (I,J)

Verbinding (i,j)	Gemiddelde kost
(1,3)	7,347059
(1,4)	8,825
(2,3)	22,66667
(2,4)	7,033333
(2,5)	5,1375
(3,6)	3,647059
(3,7)	9,966667
(4,6)	7
(5,6)	7,366667
(5,7)	9,088889
(6,8)	22,3625
(6,9)	11
(7,6)	15,05
(7,8)	6,45
(7,9)	10,29091

STAP 2 : Rangschikken van gemiddelde kosten van klein naar groot.

TABEL 15: RANGSCHIKKING VERBINDINGEN VOLGENS OPLOPENDE GEMIDDELDE KOSTEN

Verbinding (i,j)	Gemiddelde kost
(3,6)	3,647059
(2,5)	5,1375
(7,8)	6,45
(4,6)	7
(2,4)	7,033333
(1,3)	7,347059
(5,6)	7,366667
(1,4)	8,825
(5,7)	9,088889
(3,7)	9,966667
(7,9)	10,29091
(6,9)	11
(7,6)	15,05
(6,8)	22,3625
(2,3)	22,66667

Er kan hier best opgemerkt worden, dat bij het voorkomen van verbindingen (7,6), (6,8) en (2,3) er best teruggegaan wordt naar een eerder knooppunt, om van hieruit te zoeken naar mogelijke betere paden. Deze paden zijn namelijk erg duur en het gebruik ervan kan dus best gemeden worden als men lage kosten nastreeft in de doelfunctie.

STAP 3, 4 & 5:

TABEL 16: ZOEKTOCHT NAAR HET OPTIMALE PAD VOLGENS DE HEURISTIEK

FASE	Knooppunt waarin men zich bevindt	Aantal eenheden in knooppunt	Mogelijke toegelaten verbinding vanuit knooppunt	Gemiddelde kost van verbinding	Capaciteit	Eenheden die geplaatst worden op verbinding
1	1	6	(1,3)	7,35	17	6
			(1,4)	8,83	16	0
	2	8	(2,5)	5,13	16	8
			(2,4)	7,03	9	0
			(2,3)	22,67	3	0
2	3	6	(3,6)	3,65	17	6
			(3,7)	9,97	3	0
	5	8	(5,6)	7,36	9	8
			(5,7)	9,08	18	0
3	6	14	(6,9)	11	10	7 (Bestemming bereikt!)
			(6,8)	22,36	16	0 (HOGE KOST: te controleren in STAP 6) →Terug naar knooppunt 3 en 5
4	3	1	(3,7)	9,97	3	1
	5	6	(5,7)	9,08	18	6
5	7	7	(7,8)	6,45	12	7 (Bestemming bereikt!)

STAP 6:

SOM = 25,5 < SOM = 33,37

Conclusie stap 6: het gebruik van verbinding (6,8) is inderdaad te duur. De nieuwe oplossing wordt bijgevolg goedgekeurd en behouden.

In de eerste fase van stap 4, zijn er zes eenheden aanwezig in knooppunt 1 en acht eenheden in knooppunt 2, zoals stap 3 het aangeeft. De verbindingen die mogelijk zijn vanuit knooppunt 1, zijn verbinding (1,3) en verbinding (1,4). Aangezien de gemiddelde kost van verbinding (1,3) de laagste is en de capaciteit gelijk is aan 17 eenheden, wordt besloten alle zes eenheden op verbinding (1,3) te plaatsen. De mogelijke verbindingen vanuit knooppunt 2 zijn verbinding (2,3), (2,4) en (2,5). Verbinding (2,5) met een capaciteit van 16 eenheden, zal het minste kosten. Bijgevolg worden alle acht eenheden via deze verbinding getransporteerd.

In een volgende fase van stap 4, bevinden zich zes eenheden in knooppunt 3 en acht eenheden in knooppunt 5. De eenheden die zich in knooppunt 3 bevinden, worden via verbinding (3,6) verder getransporteerd. De eenheden in knooppunt 5 worden vervoerd via verbinding (5,6).

In een derde fase bevinden alle 14 eenheden zich in knooppunt 6. De verbinding met de laagste kosten, die vanuit dit knooppunt vertrekt, is verbinding (6,9). Aangezien er zeven van de veertien eenheden bestemd zijn voor knooppunt 9 en de capaciteit van de verbinding het toelaat, worden alle zeven eenheden via verbinding (6,9) vervoerd. De zeven eenheden die bestemd zijn voor knooppunt 8 daarentegen, kunnen vanuit knooppunt 6 enkel via verbinding (6,8) vervoerd worden. Deze verbinding heeft echter een zeer hoge gemiddelde kost. De heuristiek geeft aan terug te gaan naar de knooppunten die voor knooppunt 6 aan bod kwamen. Deze knooppunten zijn 3 en 5.

In fase vier zitten er bijgevolg terug één eenheid in knooppunt 3 en zes eenheden in knooppunt 5. Vanuit knooppunt 3 is de tweede beste verbinding (3,7). Deze verbinding heeft een beperkte capaciteit van drie eenheden, maar dit vormt geen probleem voor een goederenstroom van slechts één eenheid. Vanuit knooppunt 5 is de volgende beste optie verbinding (5,7), waarvan de capaciteit zes eenheden toelaat op de verbinding.

In een laatste fase bevinden zich zeven eenheden in knooppunt 7. Aangezien er niet richting knooppunt 6 getransporteerd mag worden, zullen alle zeven eenheden via verbinding (7,8) vervoerd worden.

Stap 6 voert ten slotte een controle uit, om te zien of het nuttig was de dure verbinding (6,8) te mijden. Hiervoor worden de kosten van de eerste oplossing, die de dure verbinding (6,8) omvat, berekend. Deze kost is gelijk aan 33,37. De nieuwe oplossing kost 25,5, wat lager en bijgevolg beter is. De nieuwe oplossing mag bijgevolg behouden worden.

Er kan hier besloten worden dat de oplossing, die door de heuristiek gevonden werd, dezelfde is als combinatie 13 in paragraaf 4.3.2. De heuristiek leidt dus snel tot een goede oplossing.

4.4.3 HEURISTIEK VOOR TIJDSGERICHTE PROBLEMEN

Hieronder wordt een heuristiek voorgesteld, die een aangepaste versie is van de heuristiek in paragraaf 4.4.1. Deze heuristiek kan gebruikt worden voor problemen waar tijd bijzonder belangrijk is. In deze heuristiek wordt geen rekening gehouden met de kosten. Er wordt aangeraden deze heuristiek enkel te gebruiken indien kosten geen belang hebben.

STAP 1 : Rangschik alle waardes van de reistijden ($=\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$) per verbinding (i,j) van klein naar groot.

STAP 2: Start in de oorsprong(en).

STAP 3: Noteer hoeveel eenheden zich overal bevinden. Noteer alle verbindingen die vanuit die knooppunten vertrekken. Noteer de reistijden ($=\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$) van de verbindingen en rangschik van klein naar groot. Noteer de capaciteiten van de verbindingen. Plaats de eenheden op de verbinding met de kortste reistijd.

Indien er in knooppunt i enkel één verbinding (i,j) overblijft, die zich onderaan in de tabel van de reistijden (STAP 2) bevindt, ga dan terug naar knooppunt i-1 en zoek naar een mogelijke beter pad. Controleer in stap 5 of deze oplossing beter is.

Indien de capaciteit van verbinding (i,j) vol is, plaats dan de overige eenheden op de verbinding met de tweede kortste reistijd. Als er vanuit knooppunt i geen andere verbindingen ter beschikking zijn, ga dan met de overige eenheden terug naar knooppunt i-1. Noteer knooppunt i op een 'zwarte' lijst, zodat men ervoor zorgt dat men niet meer in knooppunt i terecht komt.

Indien er beslist moet worden tussen twee verbindingen met gelijke reistijd, kies dan de verbinding die zo min mogelijk verbindingen van de eindbestemming af ligt.

STAP 4: Herhaal stap 4 tot de bestemming(en) bereikt is/zijn.

STAP 5: Bereken de som van de oude oplossing en de som van de nieuwe oplossing (zie stap 3). Indien de nieuwe oplossing een kortere reistijd heeft dan de oude oplossing, dan mag ze behouden worden. Indien de oude oplossing toch korter blijkt te duren, ga dan terug naar de oude oplossing.

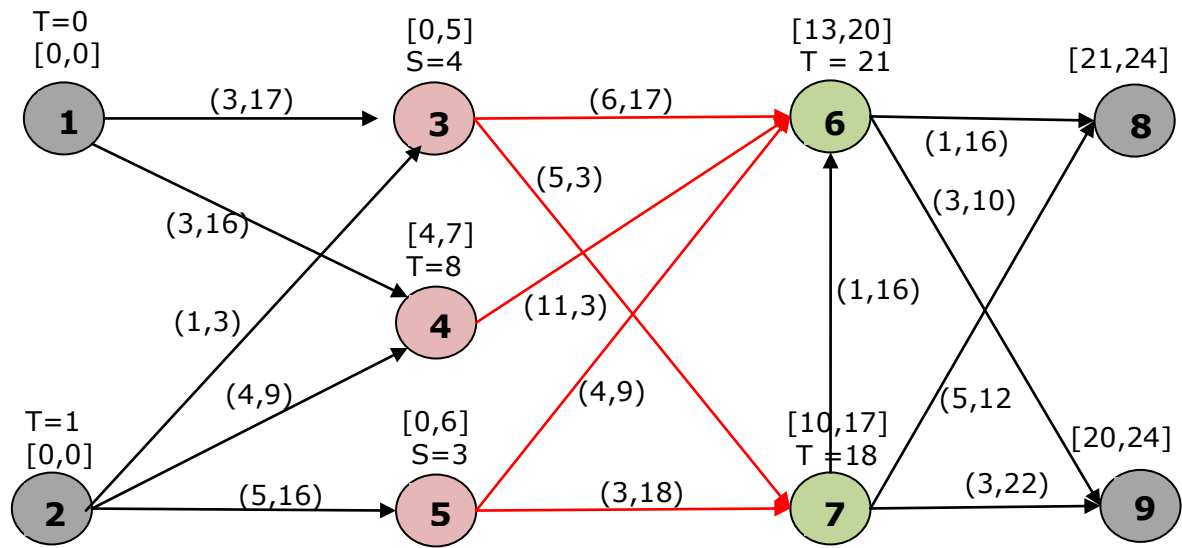
4.4.4 TOEPASSING HEURISTIEK OP VOORBEELD

STAP 1: Rangschik alle waardes van de reistijden ($=\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$) per link (i,j) van klein naar groot.

TABEL 17: RANGSCHIKKING REISTIJDEN

Verbinding (i,j)	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$
6-8	22	21	1
6-9	24	21	3
7-6	21	18	3
7-9	21	18	3
2-3	6	1	5
7-8	23	18	5
1-3	7	0	7
2-4	8	1	7
1-4	8	0	8
2-5	9	1	8
5-7	18	9	9
3-7	18	7	11
5-6	21	9	12
4-6	21	8	13
3-6	21	7	14

Er zou hier opgemerkt kunnen worden, dat bij het voorkomen van verbindingen (5,7), (3,7), (5,6), (4,6) en (3,6) er best teruggegaan wordt naar een eerder knooppunt, om van hieruit te zoeken naar mogelijke betere paden. Maar als men het netwerk bestudeert, kan men zien dat deze verbindingen zich allemaal op eenzelfde hoogte in het netwerk bevinden. Met andere woorden moet men ten minste één van deze verbindingen gebruiken, aangezien anders een stuk van het netwerk afgesloten wordt. (zie figuur 9)



FIGUUR 9: PADEN DIE GEMEDEN Zouden MOETEN WORDEN IN HET NETWERK (BRON: CHANG, 2007)

STAP 2, 3 &4

TABEL 18: ZOEKTOCHT NAAR EEN GOEDE OPLOSSING VOLGENS DE HEURISTIEK

FASE	Knooppunt waarin men zich bevindt	Aantal eenheden in knooppunt	Mogelijke toegelaten verbinding vanuit knooppunt	$\max(D_j, A_j + S_j) - \max(D_i, A_i + S_i)$ van verbinding	Capaciteit	Eenheden die geplaatst worden op verbinding
1	1	6	(1,3)	7	17	6
			(1,4)	8	16	0
	2	8	(2,3)	5	3	3
			(2,4)	7	9	5
			(2,5)	8	16	0
2	3	9	(3,7)	11	3	3
			(3,6)	14	17	6
	4	5	(4,6)	13	3	3 (2 eenheden over →terug naar knooppunt 2)
3	2	2	(2,5)	8	16	2
	6	9	(6,8)	1	16	7 (bestemming bereikt)
			(6,9)	3	10	2 (bestemming bereikt)
	7	3	(7,6)	3	16	0
			(7,9)	3	22	3 (bestemming bereikt)
			(7,8)	5	12	0
4	5	2	(5,7)	9	18	2
			(5,6)	12	9	0
5	7	2	(7,9)	3	22	2 (bestemming bereikt)

STAP 6:

In dit voorbeeld kunnen verbindingen met lange reistijden niet vermeden worden, wegens hun ligging in het netwerk (zie stap 1).

Er kan hier opgemerkt worden dat de totale waarde voor doelfunctie Z_{p_2} van deze oplossing gelijk is aan 296. Dit is lager dan de doelfunctiewaarde voor Z_{p_2} bij combinatie 12, die gelijk is aan 308 (zie bijlage 16). Er wordt hier enkel gekeken naar de tweede doelfunctie, Z_{p_2} , aangezien de heuristiek enkel voor tijdsgerichte problemen werkt. Deze betere oplossing komt voort uit het splitsen van goederenstromen. In tabel 19 zien we de oplossing die door de heuristiek gevonden werd, waarbij zowel goederenstroom m_2 als m_3 in twee wordt gesplitst.

TABEL 19: OPLOSSING VAN DE HEURISTIEK

Goederenstroom	Optimale pad	Aantal eenheden via pad
M1	(1,3,6,8)	1
M2	(1,3,7,9)	3
	(1,3,6,9)	2
M3	(2,3,6,8)	3
	(2,4,6,8)	3
M4	(2,5,7,9)	2

Er kan geconcludeerd worden dat de heuristiek tot een zeer goede oplossing voor belangrijke tijdsgerichte problemen leidt.

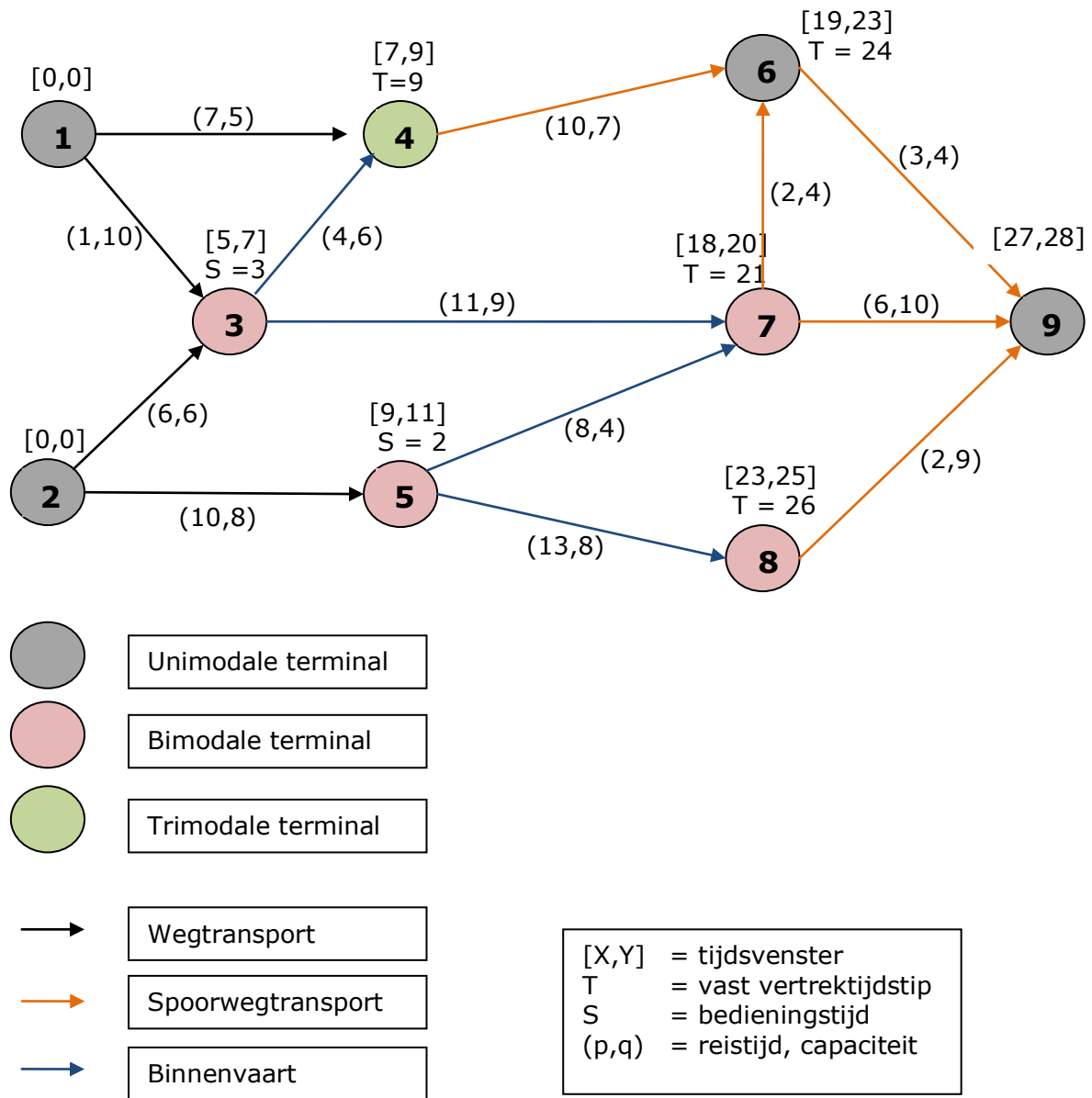
4.5 TOEPASSING HEURISTIEK OP ANDER RITTENPLANNINGSPROBLEEM

De hierboven geformuleerde heuristieken zijn gebaseerd op het rittenplanningsprobleem van Chang (2007), wat eerder in deze masterproef reeds volledig uitgerekend is. In een volgende stap zal getest worden of deze heuristiek ook voor een ander rittenplanningsprobleem snel en eenvoudig tot een goede oplossing kan leiden. Hiervoor wordt een volledig nieuw netwerk geformuleerd, met andere knooppunten, kosten, reistijden, tijdsvensters, servicetijden, vaste vertrektijden en capaciteiten. In de

hieronder volgende paragrafen wordt eerst de goede oplossing gezocht door een berekening van alle combinaties van mogelijke paden. Vervolgens wordt de oplossing gezocht met behulp van de geformuleerde heuristiek. Ten slotte zullen beide oplossingen vergeleken worden, om te zien of de heuristiek werkt.

4.5.1 NETWERK

Het nieuwe netwerk bestaat uit negen knooppunten, waarin er vier unimodale terminals zijn, vier bimodale terminals en één trimodale terminal. De verbindingen die vertrekken vanuit de twee oorsprongen, namelijk knooppunten 1 en 2, worden door wegtransport bediend. De verbindingen die vertrekken vanuit knooppunten 3 en 5, zijn binnenvaartverbindingen. Een servicetijd (S) is nodig om de ladingen over te laden op de binnenvaartschepen. Ten slotte zijn de verbindingen die vanuit knooppunten 4, 6, 7 en 8 vertrekken, spoorwegverbindingen. Ze vertrekken steeds op een vast of geschematiseerde tijdstip (T). Het netwerk wordt verder gedefinieerd door tijdsvensters per knooppunt en capaciteiten en reistijden per verbinding (i,j).



FIGUUR 10: VOORSTELLING NIEUW MULTIMODAAL NETWERK

4.5.2 GOEDERENSTROMEN

Het te transporteren goederenpakket bestaat uit twee goederenstromen (m_1 en m_2), die gedefinieerd worden door een oorsprong, een bestemming en een aantal te transporteren eenheden.

TABEL 20: BESCHRIJVING GOEDERENSTROMEN

goederenstroom	eenheden	oorsprong	bestemming
M1	4	1	9
M2	5	2	9

4.5.3 KOSTENFUNCTIE

De getrapte lineaire kostenfunctie, die bij het nieuwe netwerk hoort, bestaat uit een vaste en een variabele kost voor iedere verbinding (i,j) en voor ieder interval (r) . Per verbinding (i,j) wordt de capaciteit opgesplitst in twee intervallen. Door deze intervallen worden de schaalvoordelen, die cruciaal zijn voor een multimodaal netwerk, in beeld gebracht.

TABEL 21: GETRAPTE KOSTENFUNCTIE

Verbinding (i,j)	Capaciteit	Vaste kost (F_{ij}^r)	Variabele kost (C_{ij}^r)
1-3	1-5	10	3
	5-10	15	2
1-4	1-3	7	5
	3-5	13	3
2-3	1-4	8	4
	4-6	16	2
2-5	1-4	11	6
	4-8	19	4
3-4	1-2	14	3
	2-6	18	1
3-7	1-5	15	2
	5-9	20	1
4-6	1-4	17	3
	4-7	25	1
5-7	1-2	12	2
	2-4	14	1
5-8	1-6	8	5
	6-8	20	3
6-9	1-3	12	3
	3-4	15	2
7-6	1-2	7	2
	2-4	9	1
7-9	1-3	13	4
	3-10	19	2
8-9	1-5	15	3
	5-9	25	1

4.5.4 ENUMERATIE VAN MOGELIJKE OPLOSSINGEN

Voor de eerste goederenstroom, die van knooppunt 1 naar knooppunt 9 loopt, zijn er vier paden mogelijk. Aangezien er slechts vier eenheden getransporteerd worden, kan gebruik gemaakt worden van iedere verbinding. Capaciteiten zullen nergens overschreden worden. Ook aan alle tijdsvensters wordt voldaan. Voor de tweede goederenstroom zijn slechts twee paden mogelijk, aangezien verbindingen (7,6), (6,9) en (5,7) over een capaciteit van slechts vier eenheden beschikken en er vijf eenheden getransporteerd moeten worden. In tabel 22 worden de acht verschillende combinaties voorgesteld, samen met de oplossingen voor alle gewichten (ω).

TABEL 22: COMBINATIES VAN DE TWEE GOEDERENSTROMEN MET BIJBEHORENDE Z_p WAARDES

	m_1	m_2	$Z_p \omega=0$	$Z_p \omega = 1$	$Z_p \omega = 10$	$Z_p \omega = 100$
Combinatie 1	(1,4,6,9)	(2,5,8,9)	179	427	2659	24979
Combinatie 2	(1,3,4,6,9)	(2,5,8,9)	198	446	2678	24998
Combinatie 3	(1,3,7,9)	(2,5,8,9)	174	402	2454	22974
Combinatie 4	(1,3,7,6,9)	(2,5,8,9)	183	411	2463	22983
Combinatie 5	(1,4,6,9)	(2,3,7,9)	157	400	2587	24457
Combinatie 6	(1,3,4,6,9)	(2,3,7,9)	176	419	2606	24476
Combinatie 7	(1,3,7,9)	(2,3,7,9)	114	337	2344	22414
Combinatie 8	(1,3,7,6,9)	(2,3,7,9)	142	365	2372	22442

Voor problemen waar kosten belangrijker zijn ($\omega = 0$, $\omega = 1$ of $\omega = 10$) wordt de beste oplossing gegeven door pad (1,3,7,9) voor de eerste goederenstroom en pad (2,3,7,9) voor de tweede goederenstroom. Hier valt duidelijk op dat een combinatie van goederenstromen tot kostenreductie kan leiden, doordat vaste kosten over meer eenheden gespreid kunnen worden en variabele kosten lager zijn. Wanneer tijd erg belangrijk wordt ($\omega = 100$) zal er voor de eerste goederenstroom geen verandering optreden. Voor de tweede goederenstroom daarentegen, wordt het beste pad (2,5,8,9).

4.5.5 TOEPASSING HEURISTIEK VOOR KOSTENGERICHTE PROBLEMEN

De in paragraaf 4.4 geformuleerde heuristiek zal nu toegepast worden op het voorbeeld dat in deze paragraaf geformuleerd werd. De verschillende stappen zullen gevolgd worden, om zo een oplossing voor het totale goederenpakket te bekomen.

STAP 1 : Berekening van de gemiddelde kosten per verbinding (i,j).

TABEL 23: GEMIDDELDE KOSTEN PER VERBINDING (I,J)

Verbinding (i,j)	Gemiddelde totale kost
(1,3)	4,00
(1,4)	6,60
(2,3)	5,67
(2,5)	7,38
(3,4)	5,00
(3,7)	4,00
(4,6)	5,57
(5,7)	5,00
(5,8)	6,50
(6,9)	6,25
(7,6)	3,75
(7,9)	6,80
(8,9)	4,78

STAP 2 : Rangschikken van gemiddelde kosten van klein naar groot.

TABEL 24: RANGSCHIKKING VERBINDINGEN VOLGENS OPLOPENDE GEMIDDELDE KOSTEN

Verbinding (i,j)	Gemiddelde totale kost
7-6	3,75
1-3	4,00
3-7	4,00
8-9	4,78
3-4	5,00
5-7	5,00
4-6	5,57
2-3	5,67
6-9	6,25
5-8	6,50
1-4	6,60
7-9	6,80
2-5	7,38

STAP 3, 4 & 5

TABEL 25: ZOEKTOCHT NAAR HET OPTIMALE PAD VOLGENS HEURISTIEK

FASE	Knooppunt waarin men zich bevindt	Aantal eenheden in knooppunt	Mogelijke toegelaten verbinding vanuit	Gemiddelde kost van verbinding	Capaciteit	Eenheden die geplaatst worden op verbinding
1	1	4	(1,3)	4,00	10	4
			(1,4)	6,60	5	0
	2	5	(2,3)	5,67	6	5
			(2,5)	7,38	8	0
2	3	9	(3,7)	4,00	9	9
			(3,4)	5,00	6	0
3	7	9	(7,6)	3,75	4	4 BIJ SPLITSSEN: controle OPTIE 1: (7,9) :5 eenheden →19 + (2*5) = 29 EN (7,6): 4 eenheden →9 + (1*4) = 13 SOM = 42 OPTIE 2: (7,9): 9 eenheden →19 + (2*9) = 37 Conclusie: alle 9 eenheden op (7,9)
			(7,9)	6,80	10	9 (bestemming bereikt)

In de eerste fase van stap 4, zijn er vier eenheden aanwezig in knooppunt 1 en vijf eenheden in knooppunt 2, zoals stap 3 het aangeeft. De verbindingen die mogelijk zijn vanuit knooppunt 1, zijn verbinding (1,3) en verbinding (1,4). Aangezien de reistijd van verbinding (1,3) de laagste is en de capaciteit gelijk is aan tien eenheden, wordt besloten alle vier eenheden op verbinding (1,3) te plaatsen. De mogelijke verbindingen vanuit knooppunt 2 zijn verbinding (2,3) en (2,5). Verbinding (2,3) met een capaciteit van zes eenheden, heeft de kleinste reistijd. Bijgevolg worden alle zes eenheden via deze verbinding getransporteerd.

In een volgende fase van stap 4, bevinden alle negen eenheden zich in knooppunt 3. De verbinding met de kortste reistijd, die vanuit dit knooppunt vertrekt, is verbinding (3,7). Aangezien de capaciteit van de verbinding het toelaat, worden alle negen eenheden via verbinding (3,7) vervoerd.

In een laatste fase bevinden zich negen eenheden in knooppunt 7. Verbinding (7,6) heeft de kortste reistijd, maar slechts een beperkte capaciteit van vier eenheden. Bijgevolg wordt gecontroleerd of het splitsen van de goederen tot een betere oplossing leidt. Hier wordt geen gebruik meer gemaakt van gemiddelde kosten, maar van de vaste en de variabele kost. Uit de berekeningen blijkt een opsplitsing van de goederenstroom niet rendabel te zijn. Daarom wordt besloten alle negen eenheden op verbinding (7,9) te plaatsen, ook al heeft deze verbinding een hoge kost.

Er kan hier besloten worden dat met de heuristiek voor kostenminimaliserende problemen dezelfde oplossing wordt bekomen als die in paragraaf 4.5.4 gevonden werd door berekening van de doelfunctiewaardes van alle mogelijke combinaties van paden. Er mag bijgevolg besloten worden dat de heuristiek ook voor dit rittenplanningsprobleem snel een goede oplossing bekomt.

4.5.6 TOEPASSING HEURISTIEK VOOR TIJDSGERICHTE PROBLEMEN

STAP 1 : Sorteert de reistijden ($=\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$) per link (i,j) van klein naar groot.

TABEL 26: RANGSCHIKKING REISTIJDEN

Verbinding (i,j)	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$
8-9	28	26	2
6-9	27	24	3
7-6	24	21	3
1-3	4	0	4
3-4	9	4	5
7-9	27	21	6
1-4	9	0	9
2-3	9	0	9
5-7	21	12	9
2-5	12	0	12
3-7	21	9	12
5-8	26	12	14
4-6	24	9	15

STAP 2, 3, 4 & 5:

TABEL 27: ZOEKTOCHT NAAR BEST MOGELIJKE OPLOSSING VOLGENS HEURISTIEK

FASE	Knooppunt waarin men zich bevindt	Aantal eenheden in knooppunt	Mogelijke toegelaten verbinding vanuit knooppunt	$\max(D_j, A_j + S_j) - \max(D_i, A_i + S_i)$ van verbinding	Capaciteit	Eenheden die geplaatst worden op verbinding
1	1	4	(1,3)	4	10	4
			(1,4)	9	5	0
	2	5	(2,3)	9	6	5
			(2,5)	12	8	0
2	3	9	(3,4)	5	6	6
			(3,7)	12	9	3
3	4	6	(4,6)	15	7	0 (Te lange reistijd → terug naar knooppunt 3)
			(7,6)	3	4	3
	7	3	(7,9)	6	10	0
4	3	6	(3,7)	12	10	6
	6	3	(6,9)	3	4	3 (bestemming bereikt)
5	7	6	(7,6)	3	4 - 3 = 1	1
			(7,9)	6	10	5 (bestemming bereikt)
6	6	1	(6,9)	3	4 - 3 = 1	1 (bestemming bereikt)

STAP 6

$SOM = 15 < SOM = 20$

Conclusie: de nieuwe oplossing is beter en mag dus behouden worden.

Wat hier opvalt is dat met de heuristiek voor tijdsgerichte problemen dezelfde oplossing wordt bekomen als die in paragraaf 4.5.4 gevonden werd door berekening van de doelfunctiewaardes van alle mogelijke combinaties van paden bij ω gelijk aan 100. Er

mag bijgevolg besloten worden dat de gevonden heuristiek ook voor dit rittenplanningsprobleem snel een goede oplossing bekomt.

4.6 CONCLUSIE PRAKTIJKSTUDIE

De praktijkstudie in dit masterproefwerk begon met een voorstelling van een netwerk, dat ook in Chang (2007) gebruikt werd. Dit netwerk, bestaande uit negen knooppunten en vijftien verbindingen, werd gekarakteriseerd door tijdsvensters, bedieningstijden, geschematiseerde vertrektijden en capaciteiten. Er werd een getrapte lineaire concave kostenfunctie voorgesteld, waarmee schaalvoordelen geïntroduceerd werden. Doorheen dit netwerk, moesten vier goederenstromen getransporteerd worden aan een zo laag mogelijke kost en tijd.

Vervolgens werd een enumeratie van oplossingen voorgesteld, waarvoor in drie stappen de doelfunctiewaarde berekend werd. In deze doelfunctiewaarde werd een tijds- en een kostendoelstelling gecombineerd door middel van het gebruik van gewichten. Deze gewichten representeerden het relatieve belang van de tijdsdoelfunctie in de totale doelfunctie. In een volgende stap bij het zoeken naar de optimale oplossing, werd gezocht naar alle mogelijke paden voor iedere goederenstroom. Hierbij werden paden die niet aan de capaciteiten van de verbindingen of niet aan de harde tijdsvensters van de knooppunten voldeden uit de mogelijke oplossingen gelaten. Daarna werden de doelfunctiewaarden (Z_p) voor de verschillende paden berekend door de waarde van de kostendoelfunctie (Z_{p1}) en de tijdsdoelfunctie (Z_{p2}) op te tellen voor vier gewichten (ω gelijk aan 0, 1, 10 of 100). Na al deze berekeningen werd een oplossing gezocht voor het gehele goederenpakket, namelijk de vier goederenfuncties samen. Door de goederenstromen samen te transporteren doorheen het multimodaal netwerk, kan er beter gebruik gemaakt worden van schaalvoordelen. In dit werk werd voor 18 combinaties van de vier goederenstromen een doelfunctiewaarde (Z_p) berekend. Hieruit bleek voor ieder gewicht (ω) een goede oplossing naar voren te komen. Echter deze oplossingen zijn geen optimale oplossingen voor dit rittenplanningsprobleem. Het is namelijk niet verplicht de goederenstromen bij elkaar te houden. Door opsplitsing van goederenstromen kunnen mogelijk nog meer schaalvoordelen benut worden. Een opsomming van alle mogelijke combinaties door splitsing van goederenstromen wordt in dit werk niet gegeven, maar kan een aanrader zijn voor verder onderzoek.

Op basis van het uitgewerkte voorbeeld werden twee heuristieken geschreven, één voor kostengerichte problemen en één voor tijdsgerichte problemen. Deze heuristieken werden bekomen door logisch te redeneren vanuit het voorbeeld. Na een beproeving op het voorbeeld van Chang (2007) bleken beide heuristieken op een snelle en eenvoudige manier tot goede oplossingen te leiden. Naar verder onderzoek toe kan getracht worden een heuristiek te bedenken die meerdere doelstellingen omvat, zoals de combinatie van kosten en tijd.

Aangezien de heuristieken gebaseerd zijn op het voorbeeld van Chang (2007), is een toetsing ervan op hetzelfde voorbeeld geen bewijs voor de efficiëntie van de methodieken. Daarom werd een nieuw netwerk, bestaande uit negen knooppunten en dertien verbindingen, gedefinieerd. Het te transporteren goederenpakket bestaat uit twee goederenstromen. Eerst werden voor deze goederenstromen de doelfunctiewaarden van acht combinaties berekend. Vervolgens werd de heuristieken voor kostengerichte - en tijdsgerichte problemen toegepast en de kost, respectievelijk tijd van de oplossing berekend. Hieruit bleek dat beide heuristieken naar goede oplossingen leiden en dus goedgekeurd werden. Toch zouden beide heuristieken getest moeten worden op meer en verschillende rittenplanningsproblemen, vooraleer men mag concluderen dat de heuristieken goede algemene oplossingsmethoden zijn.

Ten slotte moet er opgemerkt worden dat de geformuleerde heuristieken slechts aan één van de drie voorwaarden voor multimodale rittenplanningsproblemen van Chang (2007) voldoen. Er wordt namelijk telkens slechts één doelstelling nagestreefd, die ofwel kosten ofwel tijd minimaliseert. De heuristieken werken niet voor een combinatie van beide doelstellingen. Volgens Chang (2007) zullen bijgevolg nooit de belangen van alle partijen vertegenwoordigd kunnen worden door slechts één doelstelling te gebruiken. Een andere voorwaarde waaraan niet voldaan wordt in de heuristieken, is het in rekening brengen van schaalvoordelen, die de belangrijkste reden voor het gebruik van multimodaal transport weergeven. Aangezien de heuristiek voor kostenminimaliserende problemen werkt met gemiddelde kosten, wordt de getrapte kostenfunctie lichtjes gemedan. De voorwaarde, die stelt dat men steeds rekening moet houden tijdsvensters, wordt wel vervuld. De heuristieken laten alle paden die niet kunnen voldoen aan de tijdsvensters buiten beschouwing.

5. CONCLUSIES

5.1 RESULTATEN

Het doel van deze masterproef was om na te gaan welke heuristiek gebruikt kan worden voor een goede rittenplanning van goederentransport met meerdere transportmodi te bekomen. Dit vormt meteen de centrale onderzoeksvraag waarop we een antwoord zochten. Hierbij werd er eerst een grondige literatuurstudie uitgevoerd. Vervolgens werd een kleinschalig rittenplanningsprobleem uitgediept. Met de opgedane kennis van dit probleem werd getracht twee heuristieken op te stellen. Eén voor kostenminimaliserende problemen en één voor tijdsminimaliserende problemen.

De eerste deelvraag richtte zich op de verschillende studies die reeds gevoerd werden in verband met rittenplanning in multimodaal transport. Deze deelvraag omvat de volledige literatuurstudie. Na een beschrijving van een algemeen rittenplanningsprobleem, werden verschillende probleemkenmerken besproken, die in de literatuur voorkwamen. Zo werden twee netwerken besproken die voorkomen bij multimodaal transport en werden de beslissingsvariabelen gedefinieerd. Daarna werden verschillende doelstellingen besproken, waaronder kostenminimalisatie en tijdsminimalisatie, maar ook de maximalisatie van de 'transportation mean sharing index'. Tijdsvensters en capaciteitsbeperkingen kwamen ook aanbod in verschillende bestudeerde werken en werden bijgevolg verwerkt in de literatuurstudie. De kostenfunctie van Chang (2007) werd grondig besproken, aangezien deze een zeer goede voorstelling geeft van schaalvoordelen, wat één van de belangrijkste voordelen is van multimodaal transport.

De verschillende oplossingsmethoden die geformuleerd werden in de bestudeerde artikels werden onderverdeeld in exacte oplossingsmethoden, kortste pad algoritmen en heuristieken. Onder de exacte oplossingsmethoden zaten voorbeelden van een matching en b-matching netwerk en dynamisch programmeren. Onder de kortste pad algoritmen werd onder andere Dijkstra's algoritme en Martins algoritme besproken, maar ook het 'time dependent intermodal least time path algorithm' van Ziliaskopoulos en Wardell (2000). Bij de heuristieken werd de oplossingsmethode van Chang (2007) besproken, die gebruik maakt van 'branch and bound'. Als laatste werd de heuristiek van

Jansen et. al. (2004) besproken, die een oplossing tracht te vinden voor een rittenplanning op het Danzas Euronet.

In de volgende deelvragen werd nagegaan welke heuristieken gebruikt kunnen worden voor op een snelle en eenvoudige manier een goede oplossing te bekomen voor een multimodaal. Hierin werd allereerst het rittenplanningsprobleem van Chang (2007) grondig uitgediept. De berekeningen voor rittenplanning van de vier individuele goederenstromen en voor het gezamenlijke goederenpakket worden gegeven in de bijlagen. Aan de hand van deze bevindingen werd besloten om twee heuristieken uit te schrijven, waarvan één zich toespitst op kostenminimaliserende rittenplanning en de andere op tijdsminimaliserende rittenplanning. De heuristieken werden vervolgens getest op het probleem van Chang (2007), en op een volledig nieuw geformuleerd probleem. Hieruit bleek dat beide heuristieken naar goede oplossingen leiden en dus goedgekeurd werden. Toch zouden beide heuristieken getest moeten worden op meer en verschillende rittenplanningsproblemen, vooraleer men mag concluderen dat de heuristieken goede algemene oplossingsmethoden zijn.

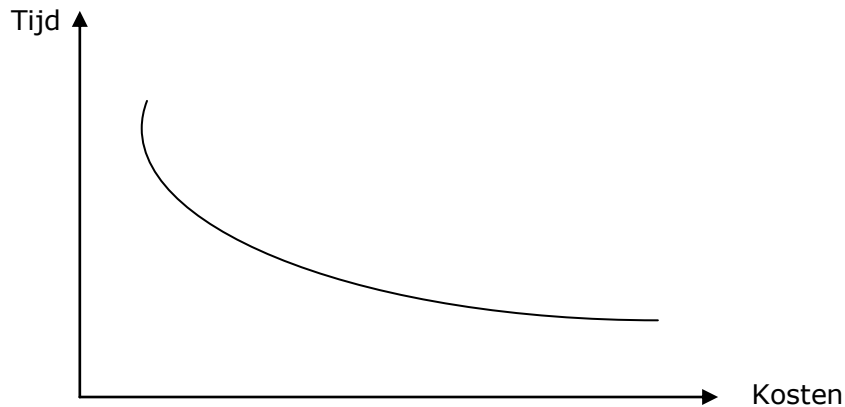
5.2 AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Een volledige enumeratie van alle combinaties van gesplitste goederenstromen wordt in deze masterthesis niet gegeven. Daardoor is de optimale oplossing voor het probleem van Chang (2007) niet gekend. Als men weet welke de optimale oplossing van het probleem is, kunnen de heuristieken beter getoetst worden aan de hand van deze optimale oplossing.

Het berekenen van de doelfunctiewaarden van alle mogelijke oplossingen bij splitsing van de goederenstromen is echter een zeer aanzienlijk werk. Daarom wordt aanbevolen hier verder onderzoek aan te wijden.

De heuristieken die voorgesteld worden in dit werk, streven telkens slechts één doelstelling na. Verder onderzoek zou kunnen trachten een heuristiek te vinden waarin meerdere doelstellingen, zoals kosten- en tijdsminimalisatie, gecombineerd worden. Een voorstel hiervoor is om te werken met een Pareto-optimum. Bij een Pareto-optimum

wordt er gezocht naar een afweging tussen twee doelstellingen, bijvoorbeeld tijdsminimalisatie en kostenminimalisatie. Als men één doelstelling wil verminderen, zal men echter een kleine toegeving moeten doen in de andere doelstelling. De beste afweging van de ene doelstelling ten opzichte van de andere, zal moeten blijken uit verder onderzoek.



FIGUUR 11: PARETO-OPTIMUM

Daarnaast kan het nuttig zijn om in toekomstig onderzoek de voorgestelde heuristieken uit deze masterproef aan te passen, zodat er beter rekening gehouden wordt met schaalvoordelen. Het gebruik van de getrapte kostenfunctie kan bijgevolg nog beter onderzocht worden, zodat de heuristieken geen gebruik meer moeten maken van gemiddelde kosten, maar met ieder interval rekening kunnen houden.

Als voorlaatste aanbeveling kan men de voorgestelde heuristieken best toepassen op grotere problemen. De netwerken zouden dan bestaan uit meer dan negen knooppunten en vijftien verbindingen. Er kunnen dan meer dan vier goederenstromen doorheen het netwerk getransporteerd worden. Dit maakt de gehele problematiek realistischer en dus meer bruikbaar in de praktijk.

Een laatste voorstel voor verder onderzoek is het testen van de heuristieken op veel problemen, aangezien ze hier slechts getest werden op twee relatief kleine problemen. Als de heuristieken beter getest zouden worden, kunnen ze in de praktijk nuttiger blijken.

LIJST VAN GERAADPLEEGDE WERKEN

Androutsopoulos, K. N., & Zografos, K. G. (2009). Solving the multi-criteria time-dependent routing and scheduling problem in a multimodal fixed scheduled network. *European Journal of Operational Research* , 192, 18-28.

Barnhart, C., & Laporte, G. (2007). *Handbook in OR & MS* (Volume 14 ed.). Amsterdam: North Holland.

Barnhart, C., & Ratliff, D. H. (1993). Modeling intermodal routing. *Journal of Business Logistics* (Vol. 14 No. 1).

Bookbinder, J. H., & Fox, N. S. (1998). Intermodal routing of Canada-Mexico shipments under Nafta. *Transportation Research* (vol. 34 No. 4), 289-303.

Bowersox, D. J., & Closs, D. J. (1996). Logistical management: The integrated supply chain process.

Caramia, M., & Guerriero, F. (2009). A heuristic approach to long-haul freight transportation with multiple objective functions. *Omega* (37), 600-614.

Caris, A., Macharis, C., & Janssens, G. K. (2008). Planning Problems in Intermodal Freight Transport: Accomplishments and Prospects. *Transportation Planning and Technology* , Vol. 31, No. 3, 277-302.

Chang, T.-S. (2007). Best routes selection in international networks. *Computers & Operations Research* , 35, 2877-2891.

Chang, T.-S. (2008). Best routes selection in international networks. *Computers & Operations Research* , 35, 2877-2891.

Chinneck, J. W. (2001). *Practical Optimization: a Gentle Introduction*. Carleton University.

Cordeau, J. F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J. Y., & Semet, F. (2002). A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of Operational Research Society* (Vol. 53 No. 5), 512-552.

Grasman, S. E. (2006). Dynamic approach to strategic and operational multimodal routing decisions. *Int. J. Logistics Systems and Management* , Vol. 2 (No. 1), 96-106.

Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2005). *Introduction to operations research*. New York: Mc Graw Hill.

Jansen, B., Swinkels, P. C., Teeuwen, G. J., van Antwerpen de Fluiter, B., & Fleuren, H. A. (2004). Operational planning of a large-scale multi-modal transportation system. *European Journal of Operational Research* (156), 41-53.

Lambert, D. M., & Stock, J. R. (1993). *Strategic Logistics Management*.

Lowe, D. (2005). *Intermodal Freight Transportation*. Oxford: Elsevier.

Lozano, A., & Storchi, G. (2002). Shortest viable hyperpath in multimodal networks. *Transportations Research Part B* (36), 853-874.

Lozano, A., & Storchi, G. (2001). Shortest viable path algorithm in multimodal networks. *Transportation Research Part A* (35), 225-241.

Macharis, C., & Bontekoning, Y. M. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: a review. *European Journal of Operational Research* (153), 400-416.

Macharis, C., & Verbeke, A. (2004). *Binnenvaartvervoer*. Antwerpen: Garant.

Macharis, C., & Verbeke, A. (1999). *vervoer: economische en strategische aspecten van het intermodale vervoer in Vlaanderen*. Leuven/Apeldoorn: Garant.

Ortùzar, J. d. (1995). *Modeling Transport*. (Second Edition).

Woxenius, J. (2007). Generic Framework for Transport Network Designs: Applications and Treatment in Intermodal Freight Transport Literature. *Transport Reviews* , Vol. 27, No. 6, 733-749.

Ziliaskopoulos, A., & Wardell, W. (2000). An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamics arc travel times and switching delays. *European Journal of Operational Research* (125), 486-502.

LIJST VAN TABELLEN

TABEL 1: VERSCHIL TUSSEN x_{ij}^{mr} EN w_{ij}^m	22
TABEL 2: BESCHRIJVING VAN DE GOEDERENSTROMEN	33
TABEL 3: BESCHRIJVING VAN DE KNOOPPUNTEN	33
TABEL 4: BESCHRIJVING VAN DE VERBINDINGEN	34
TABEL 5: GETRAPTE LINEAIRE CONCAVE KOSTENFUNCTIE	35
TABEL 6: MOGELIJKE PADEN VOOR GOEDERENSTROOM m_1	38
TABEL 7: BEREKENING VAN DE KOSTEN VOOR PAD (1,3,6,8)	39
TABEL 8: BEREKENING VAN DE REISTIJD VOOR PAD (1,3,6,8).....	40
TABEL 9: DOELFUNCTIEWAARDEN VOOR GOEDERENSTROOM m_1	41
TABEL 10: OPLOSSINGEN VOOR ALLE GOEDERENSTROMEN EN ALLE GEWICHTEN	43
TABEL 11: VERSCHILLENDE COMBINATIES VAN DE VIER GOEDERENSTROMEN	44
TABEL 12: DOELFUNCTIEWAARDEN VOOR DE VERSCHILLENDE COMBINATIES VAN PADEN	45
TABEL 13: VOORBEELD VAN EEN GESPLITSTE GOEDERENSTROOM	46
TABEL 14: GEMIDDELDE KOSTEN PER VERBINDING (I,J)	49
TABEL 15: RANGSCHIKKING VERBINDINGEN VOLGENS OPLOPENDE GEMIDDELDE KOSTEN	50
TABEL 16: ZOEKTOCHT NAAR HET OPTIMALE PAD VOLGENS DE HEURISTIEK	51
TABEL 17: RANGSCHIKKING REISTIJDEN	54
TABEL 18: ZOEKTOCHT NAAR EEN GOEDE OPLOSSING VOLGENS DE HEURISTIEK	56
TABEL 19: OPLOSSING VAN DE HEURISTIEK	57
TABEL 20: BESCHRIJVING GOEDERENSTROMEN	60
TABEL 21: GETRAPTE KOSTENFUNCTIE	60
TABEL 22: COMBINATIES VAN DE TWEE GOEDERENSTROMEN MET BIJBEHORENDE Z_p WAARDES.....	62
TABEL 23: GEMIDDELDE KOSTEN PER VERBINDING (I,J)	63
TABEL 24: RANGSCHIKKING VERBINDINGEN VOLGENS OPLOPENDE GEMIDDELDE KOSTEN	64
TABEL 25: ZOEKTOCHT NAAR HET OPTIMALE PAD VOLGENS HEURISTIEK	65
TABEL 26: RANGSCHIKKING REISTIJDEN	67
TABEL 27: ZOEKTOCHT NAAR BEST MOGELIJKE OPLOSSING VOLGENS HEURISTIEK	68

LIJST VAN FIGUREN

FIGUUR 1 : VASTE EN VARIABELE KOSTEN VAN WEGTRANSPORT, SPOORWEGTRANSPORT EN BINNENVAART (BRON: MACHARIS EN VERBEKE, 1999)	5
FIGUUR 2 : KOSTEN VAN TRANSPORT (BRON: MACHARIS EN VERBEKE, 1999)	6
FIGUUR 3: DE CONTINENTALE MULTIMODALE KETEN (BRON: MACHARIS EN VERBEKE, 1999)	8
FIGUUR 4: DE MARITIEME MULTIMODALE KETEN (BRON: MACHARIS EN VERBEKE, 1999)	8
FIGUUR 5: ACTOREN IN DE MULTIMODALE TRANSPORTMARKT (BRON: MACHARIS EN VERBEKE, 1999) 9	
FIGUUR 6: TRUNK COLLECTION DISTRIBUTION NETWORK (BRON: KREUTZBERGER, 2005)	15
FIGUUR 7: HUB-AND-SPOKE NETWORK (BRON: KREUTZBERGER, 2005).....	15
FIGUUR 8: VOORSTELLING MULTIMODAAAL NETWERK (BRON: CHANG, 2007).....	32
FIGUUR 9: PADEN DIE GEMEDEN Zouden MOETEN WORDEN IN HET NETWERK (BRON: CHANG, 2007) 55	
FIGUUR 10: VOORSTELLING NIEUW MULTIMODAAAL NETWERK	59
FIGUUR 11: PARETO-OPTIMUM	73

BIJLAGEN

BIJLAGE 1: BEREKENINGEN VOOR GOEDERENSTROOM m_1

BIJLAGE 2: BEREKENINGEN VOOR GOEDERENSTROOM m_2

BIJLAGE 3: BEREKENINGEN VOOR GOEDERENSTROOM m_3

BIJLAGE 4: BEREKENINGEN VOOR GOEDERENSTROOM m_4

BIJLAGE 5: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 1

BIJLAGE 6: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 2

BIJLAGE 7: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 3

BIJLAGE 8: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 4

BIJLAGE 9: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 5

BIJLAGE 10: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 6

BIJLAGE 11: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 7

BIJLAGE 12: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 8

BIJLAGE 13: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 9

BIJLAGE 14: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 10

BIJLAGE 15: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 11

BIJLAGE 16: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 12

BIJLAGE 17: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 13

BIJLAGE 18: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 14

BIJLAGE 19: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 15

BIJLAGE 20: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 16

BIJLAGE 21: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 17

BIJLAGE 22: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 18

BIJLAGE 23: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 1

(VOORBEELD 2)

BIJLAGE 24: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 2
(VOORBEELD 2)

BIJLAGE 25: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 3
(VOORBEELD 2)

BIJLAGE 26: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 4
(VOORBEELD 2)

BIJLAGE 27: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 5
(VOORBEELD 2)

BIJLAGE 28: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 6
(VOORBEELD 2)

BIJLAGE 29: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 7
(VOORBEELD 2)

BIJLAGE 30: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 8
(VOORBEELD 2)

BIJLAGE 1: BEREKENINGEN VOOR GOEDERENSTROOM m_1

Commodity m_1 : 1 eenheid van knooppunt 1 naar knooppunt 8																
eenheden	1															
Link (i,j)	Inter val r	vaste kost F_{ij}^r	variabele kost per eenheid C_{ij}^r	variabele kost $C_{ij}^r * X_{ij}^{mr}$	totale kost	capaciteit op link (i,j) M_{ij}^r	capaciteit OVER op link (i,j) $M_{ij}^r - Q_{ij}^r$	vertrektijd knooppunt i D_i	Reis tijd link (i,j)	Aankomst tijd knooppunt j A_j^m	servicetijd knooppunt j s_j^m	tijdsvenster knooppunt j $[l_j, u_j]$	Zp met $w = 0$	Zp met $w = 1$	Zp met $w = 10$	Zp met $w = 100$
1-3	0-7	12	6	6	18	17	16	0	3	3	4	[0,5]	0	1	10	100
3-6	0-6	10	3	3	13	17	16	7	6	13		[13,20]				
6-8	0-7	10	20	20	30	16	15	21	1	22		[21,24]	61	83	281	2261
TOTAAL					61		capaciteit ok					tijdsvensters ok				
1-3	0-7	12	6	6	18	17	16	0	3	3	4	[0,5]				
3-7	0-1	10	6	6	16	3	2	7	5	12		[10,17]				
7-6	0-4	9	15	15	24	16	15	18	1	19		[13,20]				
6-8	0-7	10	20	20	30	16	15	21	1	22		[21,24]	88	110	308	2288
TOTAAL					88		capaciteit ok					tijdsvensters ok				
1-3	0-7	12	6	6	18	17	16	0	3	3	4	[0,5]				
3-7	0-1	10	6	6	16	3	2	7	5	12		[10,17]				
7-8	0-3	12	5	5	17	12	11	18	5	23		[21,24]	51	74	281	2351
TOTAAL					51		capaciteit ok					tijdsvensters ok				
1-4	0-2	8	9	9	17	16	15	0	3	3		[4,7]				
4-6	0-1	12	3	3	15	3	2	8	11	19		[13,20]				
6-8	0-7	10	20	20	30	16	15	21	1	22		[21,24]	62	84	282	2262
TOTAAL					62		capaciteit ok					tijdsvenster niet ok				

BIJLAGE 2: BEREKENINGEN VOOR GOEDERENSTROOM m_2

Commodity m2: 5 eenheden van knooppunt 1 naar knooppunt 9																
Een-heden	5															
Link (i,j)	Inter Val	vaste kost F_{ij}^v	variabele kost per eenheid C_{ij}^T	variabele kost $C_{ij}^T * X_{ij}^{mr}$	totale kost	capaciteit op link (i,j) M_{ij}^T	capaciteit OVER op link (i,j) $M_{ij}^T - Q_{ij}^T$	Vertrektijd knooppunt i D_i	Reis tijd link (i,j)	aankomsttijd knooppunt j A_j^m	servicetijd knooppunt j s_j^m	tijdsvenster knooppunt j $[l_i, u_i]$	Zp met w=0	Zp met w=1	Zp met w=10	Zp met w=100
1-3	0-7	12	6	30	42	17	12	0	3	3	4	[0,5]				
3-6	0-6	10	3	15	25	17	12	7	6	13		[13,20]				
6-9	2-5	18	7	35	53	10	5	21	3	24		[20,24]				
TOT					120		capaciteit ok					tijdsvensters ok	120	240	1320	12120
1-3	0-7	12	6	30	42	17	12	0	3	3	4	[0,5]				
3-7	2-3	17	2	10	27	3	-2	7	5	12		[10,17]				
7-6	4-9	29	10	50	79	16	11	18	1	19		[13,20]				
6-9	2-5	18	7	35	53	10	5	21	3	24		[21,24]	201	321	1401	12201
TOT					201		capaciteit niet ok					tijdsvensters ok				
1-3	0-7	12	6	30	42	17	12	0	3	3	4	[0,5]				
3-7	2-3	17	2	10	27	3	-2	7	5	12		[10,17]				
7-9	0-7	8	9	45	53	3	-2	18	3	21		[21,24]	122	227	1172	10622
TOT					122		capaciteit niet ok					tijdsvensters ok				
1-4	2-9	14	6	30	44	16	11	0	3	3		[4,7]				
4-6	2-3	15	1	5	20	3	-2	8	11	19		[13,20]				
6-9	2-5	18	7	35	53	10	5	21	3	24		[21,24]	117	237	1317	12117
TOT					117		capaciteit niet ok					tijdsvenster niet ok				

BIJLAGE 3: BEREKENINGEN VOOR GOEDERENSTROOM m_3

Commodity m3: 6 eenheden van knooppunt 2 naar knooppunt 8																
Een- heden	6															
Link (i,j)	Inter Val r	vaste kost F_{ij}^T	variabele kost per eenheid C_{ij}^T	variabele kost $C_{ij}^T * X_{ij}^{mr}$	totale kost	capaciteit op link (i,j) M_{ij}^T	capaciteit OVER op link (i,j) $M_{ij}^T - Q_{ij}^T$	vertrektijd knooppunt i D_i	reistijd link (i,j)	aankomsttijd knooppunt j A_j^m	servicetijd knooppunt j s_j^m	tijdsvenster knooppunt j $[l_i, u_i]$	Zp met $w=0$	Zp met $w=1$	Zp met $w=10$	Zp met $w=100$
2-3	2-3	32	5	30	62	3	-3	1	1	2	4	[0,5]				
3-6	0-6	10	3	18	28	17	11	6	6	12		[13,20]				
6-8	0-7	10	20	120	130	16	10	21	1	22		[21,24]	220	352	1540	13420
TOT					220		capaciteit niet ok					tijdsvenster niet ok				
2-3	2-3	32	5	30	62	3	-3	1	1	2	4	[0,5]				
3-7	2-3	17	2	12	29	3	-3	6	5	11		[10,17]				
7-6	4-9	29	10	60	89	16	10	18	1	19		[13,20]				
6-8	0-7	10	20	120	130	16	10	21	1	22		[21,24]	310	442	1630	13510
TOT					310		capaciteit niet ok					tijdsvensters ok				
2-3	2-3	32	5	30	62	3	-3	1	1	2	4	[0,5]				
3-7	2-3	17	2	12	29	3	-3	6	5	11		[10,17]				
7-8	3-9	15	4	24	39	12	6	18	5	23		[21,24]	130	268	1510	13930
TOT					130		capaciteit niet ok					tijdsvensters ok				
2-4	5-9	21	3	18	39	9	3	1	4	5		[4,7]				
4-6	2-3	15	1	6	21	3	-3	8	11	19		[13,20]				
6-8	0-7	10	20	120	130	16	10	21	1	22		[21,24]	190	322	1510	13390
TOT					190		capaciteit niet ok					tijdsvensters ok				

2-5	0-8	9	4	24	33	16	10	1	4	5	3	[0,6]	
5-6	3-6	15	4	24	39	9	3	8	4	12		[13,20]	
6-8	0-7	10	20	120	130	16	10	21	1	22		[20,24]	202 334 1522 13402
TOT					202		capaciteit ok!						tijdsvenster niet ok
2-5	0-8	9	4	24	33	16	10	1	4	5	3	[0,6]	
5-7	0-7	11	8	48	59	18	12	8	3	11		[10,17]	
7-6	4-9	29	10	60	89	16	10	18	1	19		[13,20]	
6-8	0-7	10	20	120	130	16	10	21	1	22		[21,24]	311 443 1631 13511
TOT					311		capaciteit ok!						tijdsvensters ok
2-5	0-8	9	4	24	33	16	10	1	4	5	3	[0,6]	
5-7	0-7	11	8	48	59	18	12	8	3	11		[10,17]	
7-8	3-9	15	4	24	39	12	6	18	5	23		[21,24]	131 269 1511 13931
TOT					131		capaciteit ok						tijdsvensters ok

BIJLAGE 4: BEREKENINGEN VOOR GOEDERENSTROOM m_4

Commodity m4: 2 eenheden van knooppunt 2 naar knooppunt 9																
eenheden	2															
Link	Inter Val	vaste kost	variabele kost per eenheid	variabele kost	totale kost	capaciteit op link (i,j)	capaciteit OVER op link (i,j)	vertrektijd knooppunt i	reistijd link (i,j)	aankomsttijd knooppunt j	servicetijd knooppunt j	tijdsvenster knooppunt j	Zp met w=0	Zp met w=1	Zp met w=10	Zp met w=100
(i,j)	r	F_{ij}^r	C_{ij}^r	$C_{ij}^r * X_{ij}^{mr}$		M_{ij}^r	$M_{ij}^r - Q_{ij}^r$	D_i	(i,j)	A_j^m	s_j^m	$[i, u_j]$				
2-3	1-2	20	11	22	42	3	1	1	1	2	4	[0,5]				
3-6	0-6	10	3	6	16	17	15	6	6	12		[13,20]				
6-9	0-2	10	11	22	32	10	8	21	3	24		[20,24]	90	138	570	4890
TOTAAL					90		capaciteit ok!					tijdsvenster niet ok				
2-3	1-2	20	11	22	42	3	1	1	1	2	4	[0,5]				
3-7	1-2	11	5	10	21	3	1	6	5	11		[10,17]				
7-6	0-4	9	15	30	39	16	14	18	1	19		[13,20]				
6-9	0-2	10	11	22	32	10	8	21	3	24		[20,24]	134	182	614	4934
TOTAAL					134		capaciteit ok!					tijdsvensters ok				
2-3	1-2	20	11	22	42	3	1	1	1	2	4	[0,5]				
3-7	1-2	11	5	10	21	3	1	6	5	11		[10,17]				
7-9	0-7	8	9	18	26	22	20	18	3	21		[21,24]	89	131	509	4289
TOTAAL					89		capaciteit ok					tijdsvensters ok				
2-4	0-4	7	6	12	19	9	7	1	4	5		[4,7]				
4-6	1-2	13	2	4	17	3	1	8	11	19		[13,30]				
6-9	0-2	10	11	22	32	10	8	21	3	24		[20,24]	68	116	548	4868
TOTAAL					68		capaciteit ok					tijdsvensters ok				
2-5	0-8	9	4	8	17	16	14	1	5	6	3	[0,6]				
5-6	0-3	9	6	12	21	9	7	9	4	13		[13,20]				
6-9	0-2	10	11	22	32	10	8	21	3	24		[20,24]	70	118	550	4870
TOTAAL					70		capaciteit ok					tijdsvensters ok				

2-5	0-8	9	4	8	17	16	14	1	5	6	3	[0,6]	
5-7	0-7	11	8	16	27	18	16	9	3	12		[10,17]	
7-6	0-4	9	15	30	39	16	14	18	1	19		[13,20]	
6-9	0-2	10	11	22	32	10	8	21	3	24		[20,24]	115 163 595 4915
TOTAAL					115		capaciteit ok					tijdsvensters ok	
2-5	0-8	9	4	2	11	16	14	1	5	6	3	[0,6] = ok	
5-7	0-7	11	8	16	27	18	16	9	3	12		[10,17] = ok	
7-9	0-7	8	9	18	26	22	20	18	3	21		[20,24] = ok	
TOTAAL					64		capaciteit ok					tijdsvensters ok	64 106 484 4264

BIJLAGE 5: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 1

COMBINATIE 1	M1	M2	M3	M4
	1-3-7-8	1-3-6-9	2-5-7-8	2-5-7-9
	1	5	6	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,5)	8	16	9	32	41
	(3,6)	5	17	10	15	25
	(3,7)	1	3	10	6	16
	(5,7)	8	18	25	48	73
	(6,9)	5	10	18	35	53
	(7,8)	7	12	15	28	43
	(7,9)	2	22	8	18	26
			OK	107	218	$Z_{p_1} = 325$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p_2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,5)	8	9	1	8	64
	(3,6)	5	21	7	14	70
	(3,7)	1	18	7	11	11
	(5,7)	8	18	9	9	72
	(6,9)	5	24	21	3	15
	(7,8)	7	23	18	5	35
	(7,9)	2	21	18	3	6
						$Z_{p_2} = 315$

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$ 640

BIJLAGE 6: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 2

COMBINATIE 2	M1	M2	M3	M4
	1-3-6-8	1-3-6-9	2-5-7-8	2-5-7-9
	1	5	6	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17		12	36
	(2,5)	8	16		9	32
	(3,6)	6	17		10	18
	(5,7)	8	18		25	48
	(6,8)	1	16		10	20
	(6,9)	5	10		18	35
	(7,8)	6	12		15	24
	(7,9)	2	22		8	18
			OK		107	231
						$Z_{p1} = 338$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	7	0		7
	(2,5)	8	9	1		8
	(3,6)	6	21	7		14
	(5,7)	8	18	9		9
	(6,8)	1	22	21		1
	(6,9)	5	24	21		3
	(7,8)	6	23	18		5
	(7,9)	2	21	18		3
						6
						$Z_{p2} = 314$

652

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

BIJLAGE 7 : BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 3

COMBINATIE 3	M1	M2	M3	M4
	1-3-7-6-8	1-3-6-9	2-5-7-8	2-5-7-9
	1	5	6	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,5)	8	16	9	32	41
	(3,6)	5	17	10	15	25
	(3,7)	1	3	10	6	16
	(5,7)	8	18	25	48	73
	(6,9)	5	10	18	35	53
	(6,8)	1	16	10	20	30
	(7,6)	1	16	9	15	24
	(7,8)	6	12	15	24	39
	(7,9)	2	22	8	18	26
	OK			126	249	$Z_{p_1} = 375$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p_2}
	(1,3)	6	6	7	0	7
	(2,5)	8	8	9	1	8
	(3,6)	5	5	21	7	14
	(3,7)	1	1	18	7	11
	(5,7)	8	8	18	9	9
	(6,9)	5	5	24	21	3
	(6,8)	1	1	22	21	1
	(7,6)	1	1	21	18	3
	(7,8)	6	6	23	18	5
	(7,9)	2	2	21	18	3
						6

$Z_{p_2} = 314$

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$

BIJLAGE 8: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 4

COMBINATIE 4	M1	1-3-7-8	1
	M2	1-3-6-9	5
	M3	2-5-7-6-8	6
	M4	2-5-7-9	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,5)	8	16	9	32	41
	(3,6)	5	17	10	15	25
	(3,7)	1	3	10	6	16
	(5,7)	8	18	25	48	73
	(6,8)	6	16	10	120	130
	(6,9)	5	10	18	35	53
	(7,6)	6	16	29	60	89
	(7,8)	1	12	12	4	16
	(7,9)	2	22	8	18	26
	OK			143	374	$Z_{p_1} = 517$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p_2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,5)	8	9	1	8	64
	(3,6)	5	21	7	14	70
	(3,7)	1	18	7	11	11
	(5,7)	8	18	9	9	72
	(6,8)	6	22	21	1	6
	(6,9)	5	24	21	3	15
	(7,6)	6	21	18	3	18
	(7,8)	1	23	18	5	5
	(7,9)	2	21	18	3	6
						$Z_{p_2} = 309$

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$ 826

BIJLAGE 9 : BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 5

COMBINATIE 5	M1	M2	M3	M4	1	5	6	2
	1-3-6-8	1-3-6-9	2-5-7-6-8	2-5-7-9				

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,5)	8	16	9	32	41
	(3,6)	6	17	10	18	28
	(5,7)	8	18	25	48	73
	(6,9)	5	10	18	35	53
	(6,8)	7	16	10	140	150
	(7,6)	6	12	29	60	89
	(7,9)	2	22	8	18	26
			OK	121	387	$Z_{p_1} = 508$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,5)	8	9	1	8	64
	(3,6)	6	21	7	14	84
	(5,7)	8	18	9	9	72
	(6,9)	5	24	21	3	15
	(6,8)	7	22	21	1	7
	(7,6)	6	23	18	5	30
	(7,9)	2	21	18	3	6
						$Z_{p_2} = 320$

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$ 828

BIJLAGE 10: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 6

COMBINATIE 6	M1	M2	M3	M4
	1-3-7-6-8	1-3-6-9	2-5-7-6-8	2-5-7-9
	1	5	6	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17		12	36
	(2,5)	8	16		9	32
	(3,6)	5	17		10	15
	(3,7)	1	3		10	6
	(5,7)	8	18		25	48
	(6,9)	5	10		18	35
	(6,8)	7	16		10	140
	(7,6)	7	16		9	105
	(7,9)	2	22		8	18
	OK				111	435

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,5)	8	9	1	8	64
	(3,6)	5	21	7	14	70
	(3,7)	1	18	7	11	11
	(5,7)	8	18	9	9	72
	(6,9)	5	24	21	3	15
	(6,8)	7	22	21	1	7
	(7,6)	7	21	18	3	21
	(7,9)	2	21	18	3	6

$Z_{p2} = 308$

854

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

$Z_{p1} = 546$

BIJLAGE 11: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 7

COMBINATIE 7	M1	M2	M3	M4
	1-3-7-8	1-3-6-9	2-5-7-8	2-4-6-9
	1	5	6	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,4)	2	9	7	12	19
	(2,5)	6	16	9	24	33
	(3,6)	5	17	10	15	25
	(3,7)	1	3	10	6	16
	(4,6)	2	3	13	4	17
	(5,7)	6	18	25	36	61
	(6,9)	7	10	18	49	67
	(7,8)	6	12	15	24	39
		OK		119	206	$Z_{p1} = 325$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,4)	2	8	1	7	14
	(2,5)	6	9	1	8	48
	(3,6)	5	21	7	14	70
	(3,7)	1	18	7	11	11
	(4,6)	2	21	8	13	26
	(5,7)	6	18	9	9	54
	(6,9)	7	24	21	3	21
	(7,8)	6	23	18	5	30
						$Z_{p2} = 316$

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$ 641

BIJLAGE 12: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 8

COMBINATIE 8	M1	M2	M3	M4
	1-3-6-8	1-3-6-9	2-5-7-8	2-4-6-9
	1	5	6	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,4)	2	9	7	12	19
	(2,5)	6	16	9	24	33
	(3,6)	6	17	10	18	28
	(4,6)	2	3	13	4	17
	(5,7)	6	18	25	36	61
	(6,8)	1	16	10	20	30
	(6,9)	7	10	18	49	67
	(7,8)	6	12	15	24	39
	OK			119	223	$Z_{p_1} = 342$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p_2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,4)	2	8	1	7	14
	(2,5)	6	9	1	8	48
	(3,6)	6	21	7	14	84
	(4,6)	2	21	8	13	26
	(5,7)	6	18	9	9	54
	(6,8)	1	22	21	1	1
	(6,9)	7	24	21	3	21
	(7,8)	6	23	18	5	30
						$Z_{p_2} = 320$

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$ 662

BIJLAGE 13: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 9

COMBINATIE 9	M1	M2	M3	M4
	1-3-7-6-8	1-3-6-9	2-5-7-8	2-4-6-9
	1	5	6	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,4)	2	9	7	12	19
	(2,5)	6	16	9	24	33
	(3,6)	5	17	10	15	25
	(3,7)	1	3	10	6	16
	(4,6)	2	3	13	4	17
	(5,7)	6	18	25	36	61
	(6,9)	7	10	18	49	67
	(6,8)	1	16	10	20	30
	(7,6)	1	16	9	15	24
	(7,8)	6	12	15	24	39
	OK			138	241	$Z_{p1} = 379$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,4)	2	8	1	7	14
	(2,5)	6	9	1	8	48
	(3,6)	5	21	7	14	70
	(3,7)	1	18	7	11	11
	(4,6)	2	21	8	13	26
	(5,7)	6	18	9	9	54
	(6,9)	7	24	21	3	21
	(6,8)	1	22	21	1	1
	(7,6)	1	21	18	3	3
	(7,8)	6	23	18	5	30
						$Z_{p2} = 320$

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

BIJLAGE 14: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 10

COMBINATIE 10	M1	1-3-7-8	1
	M2	1-3-6-9	5
	M3	2-5-7-6-8	6
	M4	2-4-6-9	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,4)	2	9	7	12	19
	(2,5)	6	16	9	24	33
	(3,6)	5	17	10	15	25
	(3,7)	1	3	10	6	16
	(4,6)	2	3	13	4	17
	(5,7)	6	18	25	36	61
	(6,8)	6	16	10	120	130
	(6,9)	7	10	18	49	67
	(7,6)	6	16	29	60	89
	(7,8)	1	12	15	4	19
	OK			158	366	$Z_{p_1} = 524$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p_2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,4)	2	8	1	7	14
	(2,5)	6	9	1	8	48
	(3,6)	5	21	7	14	70
	(3,7)	1	18	7	11	11
	(4,6)	2	21	8	13	26
	(5,7)	6	18	9	9	54
	(6,8)	6	22	21	1	6
	(6,9)	7	24	21	3	21
	(7,6)	6	21	18	3	18
	(7,8)	1	23	18	5	5
						$Z_{p_2} = 315$

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$

839

BIJLAGE 15: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 11

COMBINATIE 11	M1	1-3-6-8	1
	M2	1-3-6-9	5
	M3	2-5-7-6-8	6
	M4	2-4-6-9	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,4)	2	9	7	12	19
	(2,5)	6	16	9	24	33
	(3,6)	6	17	10	18	28
	(4,6)	2	3	13	4	17
	(5,7)	6	18	25	36	61
	(6,8)	7	16	10	140	150
	(6,9)	7	10	18	49	67
	(7,6)	6	12	29	60	89
			OK	133	379	$Z_{p_1} = 512$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p_2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,4)	2	8	1	7	14
	(2,5)	6	9	1	8	48
	(3,6)	6	21	7	14	84
	(4,6)	2	21	8	13	26
	(5,7)	6	18	9	9	54
	(6,9)	7	24	21	3	21
	(6,8)	7	22	21	1	7
	(7,6)	6	23	18	5	30
						$Z_{p_2} = 326$

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$ 838

BIJLAGE 16: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 12

COMBINATIE 12	M1	1-3-7-6-8	1
	M2	1-3-6-9	5
	M3	2-5-7-6-8	6
	M4	2-4-6-9	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,4)	2	9	7	12	19
	(2,5)	6	16	9	24	33
	(3,6)	5	17	10	15	25
	(3,7)	1	3	10	6	16
	(4,6)	2	3	13	4	17
	(5,7)	6	18	25	36	61
	(6,9)	5	10	18	35	53
	(6,8)	7	16	10	140	150
	(7,6)	7	16	9	105	114
	OK			123	413	$Z_{p_1} = 536$

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p_2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,4)	2	8	1	7	14
	(2,5)	6	9	1	8	48
	(3,6)	5	21	7	14	70
	(3,7)	1	18	7	11	11
	(4,6)	2	21	8	13	26
	(5,7)	6	18	9	9	54
	(6,9)	5	24	21	3	15
	(6,8)	7	22	21	1	7
	(7,6)	7	21	18	3	21
						$Z_{p_2} = 308$

$(\omega = 1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$ 844

BIJLAGE 17: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 13

COMBINATIE 13	M1	M2	M3	M4	
	1-3-7-8	1-3-6-9	2-5-7-8	2-5-6-9	
	1	5	6	2	

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17		12	36
	(2,5)	8	16		9	32
	(3,6)	5	17		10	15
	(3,7)	1	3		10	6
	(5,7)	6	18		11	48
	(5,6)	2	9		9	12
	(6,9)	7	10		43	14
	(7,8)	7	12		15	28
	OK				119	191
						310

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,5)	8	9	1	8	64
	(3,6)	5	21	7	14	70
	(3,7)	1	18	7	11	11
	(5,7)	6	18	9	9	54
	(5,6)	2	21	9	12	24
	(6,9)	7	24	21	3	21
	(7,8)	7	23	18	5	35
						321

$(\omega=1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

631

BIJLAGE 18: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 14

COMBINATIE 14	M1	1-3-6-8	1
	M2	1-3-6-9	5
	M3	2-5-7-8	6
	M4	2-5-6-9	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,5)	8	16	9	32	41
	(3,6)	6	17	10	18	28
	(5,7)	6	18	11	48	59
	(5,6)	2	9	9	12	21
	(6,8)	1	16	10	20	30
	(6,9)	7	10	43	14	57
	(7,8)	6	12	15	24	39
	OK			119	204	323

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,5)	8	9	1	8	64
	(3,6)	6	21	7	14	84
	(5,7)	8	18	9	9	72
	(5,6)	2	21	9	12	24
	(6,8)	1	22	21	1	1
	(6,9)	5	24	21	3	15
	(7,8)	6	23	18	5	30
						332

$(\omega=1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$ 655

BIJLAGE 19: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 15

COMBINATIE 15	M1	M2	M3	M4	
	1-3-7-6-8	1-3-6-9	2-5-7-8	2-5-6-9	
	1	5	6	2	

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,5)	8	16	9	32	41
	(3,6)	5	17	10	15	25
	(3,7)	1	3	10	6	16
	(5,7)	6	18	11	48	59
	(5,6)	2	9	9	12	21
	(6,9)	7	10	43	14	57
	(6,8)	1	16	10	20	30
	(7,6)	1	16	9	15	24
	(7,8)	6	12	15	24	39
	OK			138	222	360

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,5)	8	9	1	8	64
	(3,6)	5	21	7	14	70
	(3,7)	1	18	7	11	11
	(5,7)	6	18	9	9	54
	(5,6)	2	21	9	12	24
	(6,9)	7	24	21	3	21
	(6,8)	1	22	21	1	1
	(7,6)	1	21	18	3	3
	(7,8)	6	23	18	5	30

$(\omega=1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

680

320

BIJLAGE 20: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 16

COMBINATIE 16	M1	1-3-7-8	1
	M2	1-3-6-9	5
	M3	2-5-7-6-8	6
	M4	2-5-6-9	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,5)	8	16	9	32	41
	(3,6)	5	17	10	15	25
	(3,7)	1	3	10	6	16
	(5,7)	6	18	11	48	59
	(5,6)	2	9	9	12	21
	(6,8)	6	16	10	120	130
	(6,9)	7	10	43	14	57
	(7,6)	6	16	29	60	89
	(7,8)	1	12	12	4	16
	OK			155	347	502

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	6	0	6	42
	(2,5)	8	8	1	7	64
	(3,6)	5	5	7	2	70
	(3,7)	1	1	7	6	11
	(5,7)	6	6	9	3	54
	(5,6)	2	2	9	7	24
	(6,8)	6	6	21	15	6
	(6,9)	7	7	21	14	21
	(7,6)	6	6	18	6	18
	(7,8)	1	1	18	17	5
	OK			23	315	

$(\omega=1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

817

315

BIJLAGE 21: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 17

COMBINATIE 17	M1	M2	M3	M4	
	1-3-6-8	1-3-6-9	2-5-7-6-8	2-5-6-9	1 5 6 2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,5)	8	16	9	32	41
	(3,6)	6	17	10	18	28
	(5,7)	6	18	11	48	59
	(5,6)	2	9	9	12	21
	(6,9)	7	10	43	14	57
	(6,8)	7	16	10	140	150
	(7,6)	6	12	29	60	89
	OK			133	360	493

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,5)	8	9	1	8	64
	(3,6)	6	21	7	14	84
	(5,7)	6	18	9	9	54
	(5,6)	2	21	9	12	24
	(6,9)	7	24	21	3	21
	(6,8)	7	22	21	1	7
	(7,6)	6	23	18	5	30
						326

819

$(\omega=1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

BIJLAGE 22: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 18

COMBINATIE 18	M1	1-3-7-6-8	1
	M2	1-3-6-9	5
	M3	2-5-7-6-8	6
	M4	2-5-6-9	2

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	6	17	12	36	48
	(2,5)	8	16	9	32	41
	(3,6)	5	17	10	15	25
	(3,7)	1	3	10	6	16
	(5,7)	6	18	11	48	59
	(5,6)	2	9	9	12	21
	(6,9)	7	10	43	14	57
	(6,8)	7	16	10	140	150
	(7,6)	7	16	9	105	114
	OK			123	408	531

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	6	7	0	7	42
	(2,5)	8	9	1	8	64
	(3,6)	5	21	7	14	70
	(3,7)	1	18	7	11	11
	(5,7)	6	18	9	9	54
	(5,6)	2	21	9	12	24
	(6,9)	7	24	21	3	21
	(6,8)	7	22	21	1	7
	(7,6)	7	21	18	3	21

314

845

$(\omega=1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

BIJLAGE 23: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 1 (VOORBEELD 2)

COMBINATIE 1	M1	1-4-6-9	4
	M2	2-5-8-9	5

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,4)	4	5	13	12	25
	(2,5)	5	8	19	20	39
	(4,6)	4	7	17	12	29
	(5,8)	5	8	8	25	33
	(6,9)	4	4	15	8	23
	(8,9)	5	9	15	15	30
			OK	87	92	179

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,4)	4	9	0	9	36
	(2,5)	5	12	0	12	60
	(4,6)	4	24	9	15	60
	(5,8)	5	26	12	14	70
	(6,9)	4	27	24	3	12
	(8,9)	5	28	26	2	10
						248

$(\omega=1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$

427

BIJLAGE 24: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 2 (VOORBEELD 2)

COMBINATIE 2	M1	1-3-4-6-9	4
	M2	2-5-8-9	5

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	4	10		10	22
	(2,5)	5	8		19	39
	(3,4)	4	6		18	22
	(4,6)	4	7		17	29
	(5,8)	5	8		8	33
	(6,9)	4	4		15	23
	(8,9)	5	9		15	30
			OK		102	198

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	4	4	0	4	16
	(2,5)	5	12	0	12	60
	(3,4)	4	9	4	5	20
	(4,6)	4	24	9	15	60
	(5,8)	5	26	12	14	70
	(6,9)	4	27	24	3	12
	(8,9)	5	28	26	2	10
					102	248

$(\omega=1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$

446

BIJLAGE 25: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 3 (VOORBEELD 2)

COMBINATIE 3	M1	1-3-7-9	4
	M2	2-5-8-9	5

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	4	10		10	22
	(2,5)	5	8		19	39
	(3,7)	4	9		15	23
	(5,8)	5	8		8	33
	(7,9)	4	10		19	27
	(8,9)	5	9		15	30
			OK		86	174

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	4	4	0	4	16
	(2,5)	5	12	0	12	60
	(3,7)	4	21	9	12	48
	(5,8)	5	26	12	14	70
	(7,9)	4	27	21	6	24
	(8,9)	5	28	26	2	10
						228

$(\omega=1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$

402

BIJLAGE 26: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 4 (VOORBEELD 2)

COMBINATIE 4	M1	1-3-7-6-9	4
	M2	2-5-8-9	5

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	4	10		10	22
	(2,5)	5	8		19	39
	(3,7)	4	9		15	23
	(5,8)	5	8		8	33
	(6,9)	4	4		15	23
	(7,6)	4	4		9	13
	(8,9)	5	9		15	30
			OK		91	183

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	4	4	0	4	16
	(2,5)	5	12	0	12	60
	(3,7)	4	21	9	12	48
	(5,8)	5	26	12	14	70
	(6,9)	4	27	24	3	12
	(7,6)	4	24	21	3	12
	(8,9)	5	28	26	2	10
					91	228

$(\omega=1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

411

BIJLAGE 27: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 5 (VOORBEELD 2)

COMBINATIE 5	M1	1-4-6-9	4
	M2	2-3-7-9	5

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,4)	4	5	13	12	25
	(2,3)	5	10	16	10	26
	(3,7)	5	9	15	10	25
	(4,6)	4	7	17	12	29
	(6,9)	4	4	15	8	23
	(7,9)	5	10	19	10	29
			OK	95	62	157

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,4)	4	9	0	9	36
	(2,3)	5	9	0	9	45
	(3,7)	5	21	9	12	60
	(4,6)	4	24	9	15	60
	(6,9)	4	27	24	3	12
	(7,9)	5	27	21	6	30
						243

$(\omega=1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$

400

BIJLAGE 28: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 6 (VOORBEELD 2)

COMBINATIE 6	M1	1-3-4-6-9	4
	M2	2-3-7-9	5

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	4	10		10	22
	(2,3)	5	6		16	26
	(3,4)	4	6		18	22
	(4,6)	4	7		17	29
	(3,7)	5	9		15	25
	(6,9)	4	4		15	23
	(7,9)	5	10		19	29
			OK		110	176

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	4	4	0	4	16
	(2,3)	5	9	0	9	45
	(3,4)	4	9	4	5	20
	(4,6)	4	24	9	15	60
	(3,7)	5	21	9	12	60
	(6,9)	4	27	24	3	12
	(7,9)	5	27	21	6	30
						243

$(\omega=1) Z_p = Z_{p_1} + Z_{p_2}$

419

BIJLAGE 29: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 7 (VOORBEELD 2)

COMBINATIE 7	M1	1-3-7-9	4
	M2	2-3-7-9	5

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	4	10	10	12	22
	(2,3)	5	6	16	10	26
	(3,7)	9	8	20	9	29
	(7,9)	9	5	19	18	37
	OK			65	49	114

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	4	4	0	4	16
	(2,3)	5	9	0	9	45
	(3,7)	9	21	9	12	108
	(7,9)	9	27	21	6	54
						223

$(\omega=1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

337

BIJLAGE 30: BEREKENING VAN DE Z_p WAARDE VOOR DE TOTALE GOEDERENSTROOM MET COMBINATIE 8 (VOORBEELD 2)

COMBINATIE 8	M1	1-3-7-6-9	4
	M2	2-3-7-9	5

Berekening kosten	link	hoeveelheid goederen op link	capaciteit op link	vaste kost	variabele kost	totale kost
	(1,3)	4	10	10	12	22
	(2,3)	5	6	16	10	26
	(3,7)	9	8	20	9	29
	(6,9)	4	4	15	8	23
	(7,6)	4	4	9	4	13
	(7,9)	5	5	19	10	29
			OK	89	53	142

Berekening tijd	link	hoeveelheid goederen op link	$\max(D_j, A_j+S_j)$	$\max(D_i, A_i+S_i)$	$\max(D_j, A_j+S_j) - \max(D_i, A_i+S_i)$	waarde voor Z_{p2}
	(1,3)	4	4	0	4	16
	(2,3)	5	9	0	9	45
	(3,7)	9	21	9	12	108
	(6,9)	4	27	24	3	12
	(7,6)	4	24	21	3	12
	(7,9)	5	27	21	6	30
						223

$(\omega=1) Z_p = Z_{p1} + Z_{p2}$

365

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Rittenplanning in multimodaal transport

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

Jaar: **2010**

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

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

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

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

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

Voor akkoord,

Jansen, Martine

Datum: **27/05/2010**