

2012•2013
FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN
*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

Masterproef
Opnemen van logistieke beslissingen in transportkeuze

Promotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Copromotor :
Prof. dr. An CARIS

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

2012•2013

FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE
WETENSCHAPPEN

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

Masterproef

Opnemen van logistieke beslissingen in transportkeuze

Promotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Copromotor :
Prof. dr. An CARIS

Carmen Vaes

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

Woord vooraf

Deze eindverhandeling vormt het sluitstuk van mijn vijfjarige opleiding tot Handelsingenieur aan de Universiteit Hasselt. Tijdens de laatste twee jaar van deze opleiding heb ik de afstudeerrichting Operationeel Management en Logistiek gevolgd. Ik heb voor deze masterproef dan ook gekozen voor het onderwerp „Opnemen van logistieke beslissingen in transportkeuze”. De keuze voor dit onderwerp vloeit voort uit mijn interesse in logistiek en de manier waarop bedrijven hun logistieke activiteiten regelen.

Het realiseren van deze eindverhandeling was enkel mogelijk dankzij een aantal mensen die mij gedurende dit hele proces hebben gesteund en die daarvoor een woord van dank verdienen. In de eerste plaats zou ik graag mijn promotor dr. Katrien Ramaekers willen bedanken voor haar ondersteunde, snelle en opbouwende feedback. Daarnaast wens ik ook mijn copromotor dr. An Caris te danken voor haar kritische beoordeling bij de tussentijdse evaluatie. Verder wil ik ook mevrouw Tabitha Maes in het bijzonder bedanken voor haar hulp, haar kritische beoordeling, de continue opvolging en het ter beschikking stellen van de nodige data bij het uitwerken van mijn praktijkstudie.

Op persoonlijk gebied wil ik zeer graag mijn ouders bedanken voor hun morele en financiële steun die ze mij de afgelopen vijf jaar hebben geboden. Eveneens wens ik ook mijn familie, vrienden en medestudenten te bedanken voor hun hulp, steun en onvergetelijke momenten die we samen hebben mogen meemaken gedurende de afgelopen jaren.

Mede dankzij de steun van al deze mensen heb ik mijn opleiding tot Handelsingenieur tot een goed einde kunnen brengen.

Carmen Vaes
Diepenbeek, mei 2012

Samenvatting

Goederentransport is onmisbaar geworden in onze huidige snelgroeïende economie. Het is als het ware een essentieel element voor de economische welvaart van een land. Maar tegelijkertijd moet eveneens rekening gehouden worden met het feit dat transport ook nadelige effecten met zich meebrengt, zoals congestie, milieuvervuiling en veiligheid (Samimi et al., 2009).

Overheden proberen deze negatieve effecten van het transport tegen te gaan aan de hand van verschillende beleidsmaatregelen zoals het verlenen van subsidies of het heffen van tol op wegen. Deze beleidsmaatregelen kunnen de keuze van bedrijven wat betreft de transportmodus sterk beïnvloeden en kunnen zo serieuze gevolgen hebben voor het goederentransport. Om de consequenties van dergelijke beleidsmaatregelen op de optimale transportkeuze te kunnen evalueren, is er nood aan goederenvervoermodellen die publieke beleidsmakers ondersteunen bij het nemen van hun beslissingen. Deze modellen moeten de goederen- en voertuigstromen, die voortvloeien uit interacties tussen verschillende actoren of partijen, zowel in huidige situaties als in toekomstige situaties kunnen voorspellen (Boerkamps et al., 2007). Het is dus noodzakelijk dat deze modellen opgesteld en getest worden aan de hand van reële gegevens en op deze manier een zo nauwkeurig mogelijk beeld geven van de situatie. Maar net daar zit het probleem. Er blijkt namelijk een enorm tekort te zijn aan bruikbare data. Het gaat hier voornamelijk om gedesaggregeerde data die op bedrijfsniveau verzamelt dient te worden en belangrijke logistieke elementen omvat.

Hoewel er zich de laatste decennia belangrijke logistieke veranderingen hebben voorgedaan (Just-In-Time, consolidatie, et cetera), ontbreken er in veel van deze goederenvervoermodellen nog steeds logistieke elementen (Ben-Akiva & De Jong, 2008). Daarom is het belangrijk te kijken hoe de keuze betreffende een bepaalde transportmodus tot stand komt. Op deze manier kan bepaald worden welke logistieke elementen sterk beïnvloedende factoren zijn voor de transportkeuze en welke dus zeker geïncorporeerd dienen te worden in de goederenvervoermodellen om zo beter transportbeslissingen te kunnen modelleren.

In de **literatuurstudie** wordt nagegaan welke goederenvervoermodellen reeds bestaan. Hieruit blijkt dat veel transportmodellen weinig of geen rekening houden met de logistieke keuzes. Toch wordt binnen deze modellen onderzocht hoe de keuze betreffende de transportmodus tot stand komt.

Het traditionele vierstapsmodel beschouwt alle stappen op een geaggregeerd niveau. Er worden geen gedragsaspecten van individuele actoren opgenomen. Het vierstapsmodel noemt wel enkele factoren die een invloed hebben op de transportkeuze, maar logistieke beslissingen worden niet in rekening gebracht.

Het simulatiemodel van Liedtke (2009) houdt wel rekening met logistieke beslissingen. Zo wordt er virtueel over transportcontracten onderhandeld waardoor beslissingen betreffende de gemiddelde

verzendingsgrootte en routegeneratie tot stand komen. Deze logistieke beslissingen zijn gebaseerd op het "minimale totale logistieke kost" principe. Een nadeel van het model is dat het enkel betrekking heeft op het wegtransport.

Het Aggregate-Disaggregate-Aggregate (ADA) model bevat een relatief complete logistieke module. Voor deze logistieke module vindt een desaggregatiestap plaats. Deze stap zorgt ervoor dat logistieke beslissingen op bedrijfsniveau in plaats van op geaggregeerd niveau geanalyseerd worden. Op deze manier kunnen er ook meer gedetailleerde en nauwkeurigere gegevens opgenomen worden in het model. Verder maakt deze module gebruik van het "totale logistieke kosten" principe om logistieke elementen zoals de lotgrootte, de voorraadpolitiek en consolidatiemogelijkheden te integreren.

Het model van Roorda (2010) is een gedragsgericht goederenvervoermodel dat rekening houdt met de verschillende rollen die actoren in goederenvervoermodellen spelen, de interacties tussen deze actoren en eventuele economische veranderingen die zich voordoen in de bedrijfsomgeving. Daarnaast geeft het model ook het belang van contracten aan en de manier waarop deze contracten bijdragen aan de ontwikkeling van zowel korte als lange termijn interacties tussen bedrijfsvestigingen.

Vervolgens wordt de **logistieke module** van goederenvervoermodellen onderzocht. De verschillende directe transportmodi worden kort besproken en vergeleken met elkaar. Ook de mogelijkheid van intermodaal transport wordt kort aangehaald. De totale logistieke kosten van een bepaalde transportketen zijn de basis voor het nemen van belangrijke logistieke beslissingen. Vernimmen en Witlox (2003) stellen dat deze totale logistieke kosten bestaan uit transportkosten enerzijds en voorraadkosten anderzijds. Deze voorraadkosten kunnen verder worden opgesplitst in vier componenten, namelijk bestelkosten, voorraadkosten van goederen in-transit, voorraadkosten en kosten van een veiligheidsvoorraad (safety-stock).

Het **praktijkgedeelte** is gebaseerd op het eerder besproken ADA-model van Ben-Akiva en De Jong (2008). Uit 53 reeds gegenereerde links tussen tien Vlaamse gemeenten wordt een selectie van acht links gemaakt op basis van een 2^2 factorieel design. Hierbij wordt de afstand tussen twee gemeenten als de eerste factor beschouwd en de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom (Q) als de tweede factor. Op deze manier worden vier ($=2^2$) verschillende combinaties verkregen, namelijk hoog-hoog, hoog-laag, laag-hoog en laag-laag. Per combinatie worden twee links bekeken. Voor elke link worden dezelfde zes transportketens beschouwd, namelijk 'weg klein', 'weg groot', 'weg klein - spoor - weg klein', 'weg groot - spoor - weg groot', 'weg klein - binnenvaart - weg klein' en 'weg groot - binnenvaart - weg groot'. Vervolgens wordt voor elke transportketen de totale logistieke kost berekend en gekeken welke de goedkoopste transportketen is. Hierbij zullen vijf kostencomponenten in beschouwing genomen worden, namelijk de bestelkost, de transportkost, de kapitaalkost van goederen in-transit, de voorraadkost en de kapitaalkost van goederen in voorraad.

Verder zal aan de hand van een **sensitiviteitsanalyse** nagegaan worden wat het effect is van een verandering van één van de inputparameters in de totale logistieke kostenfunctie, ceteris paribus, op de keuze van de transportmodus. Het effect van negen inputparameters wordt onderzocht, namelijk de gemiddelde verzendingsgrootte, de transportkost van weg klein, de transportkost van weg groot, de transportkost van spoor, de transportkost van binnenvaart, de bestelkost per verzending, de disconteringsvoet, de waarde van de vervoerde goederen en de opslagkost. Op deze manier wordt nagegaan welke inputparameters het meeste invloed hebben op de keuze wat betreft de transportmodus.

Tot slot toont de **conclusie** dat het verzamelen van accurate en juiste data noodzakelijk is. De uiteindelijke keuze betreffende de transportmodus is zeer uiteenlopend bij verschillende waarden van de inputparameters. Nauwkeurige gegevens over de gemiddelde verzendingsgrootte, transportkosten et cetera zijn nodig wanneer overheden de invloed van hun beleidsmaatregelen zo goed mogelijk willen voorspellen op basis van goederenvervoermodellen.

Inhoudsopgave

Woord vooraf.....	I
Samenvatting	III
Inhoudsopgave.....	VII
Lijst van afbeeldingen	XI
Lijst met tabellen.....	XIII
1. Inleiding	1
1.1 Probleemstelling.....	1
1.2 Onderzoeksvragen.....	3
1.2.1 Centrale onderzoeksvraag	3
1.2.2 Deelvragen.....	3
1.3 Methodologie	4
1.3.1 Kwalitatief onderzoek: literatuurstudie.....	4
1.3.2 Kwantitatief onderzoek: praktisch	5
2. Bestaande modellen om goederenvervoer te modelleren.....	7
2.1 Vierstapsmodel	8
2.1.1 Inleiding	8
2.1.2 Model	8
2.1.3 Aanvullingen op het vierstapsmodel.....	12
2.1.4 Kritische reflectie	13
2.2 Simulatiemodel van Liedtke (2009)	13
2.2.1 Kernassumpties en basisprincipes	14
2.2.2 Generatiemodule.....	15
2.2.3 Sourcing module	16
2.2.4 Dynamische simulatie van de transportmarkten	16
2.3 ADA-model van Ben-Akiva en De Jong (2008).....	17
2.3.1 Structuur van het ADA-model	17
2.3.2 Relaties tussen componenten	19
2.3.3 Gegevensvereisten voor het logistieke model (Stappen A en B)	20

2.4	Model van Roorda (2010)	21
2.4.1	Inleiding	21
2.4.2	Model	22
2.5	Belang van data	26
2.5.1	Niveau van aggregatie	27
2.5.2	Dataverzameling	28
2.5.3	Sensitiviteitsanalyse	29
3.	Logistieke module in goederenvervoermodellen	31
3.1	Types transportmodi	31
3.1.1	Wegtransport	32
3.1.2	Spoor	32
3.1.3	Zee- en binnenvaart	33
3.1.4	Luchttransport	33
3.1.5	Pijpleiding	33
3.1.6	Vergelijking verschillende transportmodi	34
3.2	Totale logistieke kost	34
4.	Praktijkgedeelte	37
4.1	Situering	37
4.2	Inleiding	37
4.3	Factorieel design	38
4.4	Transportmogelijkheden	39
4.5	Berekening totale logistieke kost	41
4.6	Sensitiviteitsanalyse	44
4.6.1	Scenario 1: inputparameter 'gemiddelde verzendingsgrootte'	45
4.6.2	Scenario 2: inputparameter 'transportkost van weg klein'	51
4.6.3	Scenario 3: inputparameter 'transportkost van weg groot'	56
4.6.4	Scenario's 4 en 5: inputparameters 'transportkost van spoor' en 'transportkost van binnenvaart'	60
4.6.5	Scenario 6: inputparameters 'constante bestelkost'	63
4.6.6	Scenario 7: inputparameter 'disconteringsvoet'	64

4.6.7	Scenario 8: inputparameter 'waarde van de vervoerde goederen'	65
4.6.8	Scenario 9: inputparameter 'opslagkost'	66
4.7	Interactie 'gemiddelde verzendingsgrootte' en 'transportkost van spoor/binnenvaart'	67
4.7.1	Scenario 1: interactie 'gemiddelde verzendingsgrootte' en 'transportkost van spoor'	68
4.7.2	Scenario 2: interactie 'gemiddelde verzendingsgrootte' en 'transportkost van binnenvaart'	71
4.8	Besluit	73
5.	Conclusie	75
5.1	Opnemen van logistieke beslissingen in goederenvervoermodellen en transportkeuze.....	75
5.2	Bespreking van de logistieke module	75
5.3	Toelichting praktijkgedeelte	76
6.	Lijst van geraadpleegde werken	79
7.	Bijlagen	83
7.1	Bijlage 1: Zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2004)	83
7.2	Bijlage 2: Grafieken scenario 'gemiddelde verzendingsgrootte'.....	86
7.3	Bijlage 3: Grafieken scenario 'transportkost van weg klein'	88
7.4	Bijlage 4: Grafieken scenario 'transportkost van weg groot'	90
7.5	Bijlage 5: Scenario inputparameter 'transportkost van binnenvaart'	92
7.6	Bijlage 6: Scenario interactie 'gemiddelde verzendingsgrootte' en 'transportkost van binnenvaart'	93

Lijst van afbeeldingen

Figuur 1. Structuur van het traditioneel vierstapsmodel (Immers & Stada, 2004)	8
Figuur 2. Algemene vorm van een herkomst-bestemmingsmatrix (Immers & Stada, 2011).....	9
Figuur 3. Voorbeeld kortste pad probleem (Hillier & Lieberman, 2010)	11
Figuur 4. INTERLOG simulatiemodules (Liedtke, 2009).....	15
Figuur 5. ADA structuur (Ben-Akiva & De Jong, 2008).....	18
Figuur 6. Twee opties voor de combinatie van het logistieke model en het netwerkmodel (Ben-Akiva & De Jong, 2008)	20
Figuur 7. Conceptuele structuur van een bedrijfsvestiging (Roorda et al., 2010).....	22
Figuur 8. Conceptuele structuur van een logistiek netwerk (Roorda et al., 2010)	23
Figuur 9. Logistieke beslissingen (Roorda et al., 2010).....	25
Figuur 10. Diverse terminals in België (Caenen, 2012)	41
Figuur 11. Scenario inputparameter q – link HL.....	47
Figuur 12. Scenario inputparameter T_k - link HL	53
Figuur 13. Scenario inputparameter T_g - link HL	58
Figuur 14. Scenario inputparameter T_s - link HL1.....	62
Figuur 15. Randvoorwaarden zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2004).....	83
Figuur 16. Weerstand zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2004).....	83
Figuur 17. Waarden distributiefunctie voor zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2004)	84
Figuur 18. Resultaat zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2004).....	85
Figuur 19. Scenario inputparameter q – link HH	86
Figuur 20. Scenario inputparameter q – link LH.....	86
Figuur 21. Scenario inputparameter q – link LL	87
Figuur 22. Scenario inputparameter T_k – link HH	88
Figuur 23. Scenario inputparameter T_k – link LH.....	88
Figuur 24. Scenario inputparameter T_k – link LL	89
Figuur 25. Scenario inputparameter T_g – link HH	90
Figuur 26. Scenario inputparameter T_g – link LH.....	90
Figuur 27. Scenario inputparameter T_g – link LL	91
Figuur 28. Scenario inputparameter T_b – link HL1	92

Lijst met tabellen

Tabel 1. SWOT-analyse van verschillende transportmodi (Vannieuwenhuyse, 2003, in Berghmans, 2006).....	34
Tabel 2. Vergelijking kenmerken transportmodi (Vannieuwenhuyse, 2006, in Ribus 2007)	34
Tabel 3. Overzicht gebruikte links	39
Tabel 4. Gegevens transportmodi	40
Tabel 5. Overzicht inputparameters	42
Tabel 6. Algemene data.....	42
Tabel 7. Specifieke data link HH1 'Kortrijk - Antwerpen'	43
Tabel 8. Analyse link HH1 'Kortrijk - Antwerpen'	44
Tabel 9. Sensitiviteitsanalyse inputparameter q - link HL1 'Antwerpen - Brugge_1'	45
Tabel 10. Overzicht kostencomponenten inputparameter q	48
Tabel 11. Samenvattende tabel inputparameter q	50
Tabel 12. Sensitiviteitsanalyse inputparameter T_k - link HL1 'Antwerpen - Brugge_1'	52
Tabel 13. Samenvattende tabel inputparameter T_k	54
Tabel 14. Sensitiviteitsanalyse inputparameter T_g - link HL1 'Antwerpen - Brugge_1'	56
Tabel 15. Samenvattende tabel inputparameter T_g	59
Tabel 16. Effect inputparameter T_s	61
Tabel 17. Effect inputparameter o	63
Tabel 18. Effect inputparameter d	64
Tabel 19. Effect inputparameter v	65
Tabel 20. Effect inputparameter w	67
Tabel 21. Samenvattende tabel interactie q en T_s	69
Tabel 22. Overzicht kostencomponenten interactie q en T_s	70
Tabel 23. Samenvattende tabel interactie q en T_b	72
Tabel 24. Effect inputparameter T_b	92
Tabel 25. Overzicht kostencomponenten interactie q en T_b	93

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling

In de steeds groeiende consumptie-economie is goederenvervoer zeer belangrijk geworden. Bedrijven worden alsmaar dynamischer en hun activiteiten breiden voortdurend uit, zelfs voorbij de eigen landsgrenzen. Dit zorgt ervoor dat ook de logistieke activiteiten mee moeten veranderen. Het is daarom belangrijk dat publieke en private besluitvormers bij het nemen van hun beslissingen betreffende transport en logistiek, waaronder ook voorraad, rekening houden met de recente trends die zich voordoen binnen het goederenvervoer. Deze beslissingen kunnen een grote impact hebben op de verschillende onderdelen van de supply chain (Tavasszy et al., 1998). Een lage voorraad of een traag transport kan bijvoorbeeld zorgen voor bottlenecks waardoor de gehele keten vertraagd wordt en niet meer optimaal kan functioneren.

Een eerste belangrijke drijfveer waar bedrijven rekening mee moeten houden is de massaindividualisatie. De kwaliteit van dienstverlening fungeert als het ware als een motor voor veranderingen in het goederenvervoer. Zo worden de massaproductiesystemen die door de eeuwen heen ontstaan zijn vervangen door systemen die op maat gemaakte of geïndividualiseerde goederen produceren. Logistiek- en transportdiensten ondersteunen deze ontwikkeling met nieuwe aangepaste supply chains. Het Just-In-Time systeem (JIT-systeem) bijvoorbeeld is een belangrijke logistieke methode voor voorraadbeheersing wat betreft de ontwikkeling van de transportsystemen. Dit impliceert dat het juiste product, op het juiste tijdstip, op de juiste plaats en aan de juiste klant geleverd wordt. In de toekomst wordt gestreefd naar een nog sterkere integratie van logistiek en transport met de huidige productiesystemen (Tavasszy et al., 2010).

Een andere zeer belangrijke trend die de logistieke kosten van een bedrijf beïnvloedt is globalisatie. De versoepeling van de handelsbarrières evenals de daling van de transportkosten en vermindering van de totale logistieke kosten hebben met de jaren de groei van de wereldhandel enorm gestimuleerd. Deze ontwikkeling heeft er voor gezorgd dat er steeds meer vraag is naar internationaal goederenvervoer (Tavasszy et al., 2010).

Zowel publieke als private besluitvormers moeten in staat zijn om deze drijfveren van goederenvervoer te begrijpen en te voorspellen in de toekomst. Zo kunnen ze vervolgens bepalen welke impact hun beslissingen betreffende logistiek en transport op het goederenvervoer hebben (Tavasszy et al., 2010). Er zijn dus goede modellen nodig waarin deze beslissingen moeten worden opgenomen.

Het modelleren van goederenvervoer staat echter nog steeds achter op het personenvervoer en er ontbreken nog steeds een aantal aspecten vergeleken met de modellen opgesteld voor personenvervoer. Ondanks het feit dat de veranderingen die zich voordoen in het goederenvervoer bijna allemaal gedreven worden door logistieke principes, ontbreekt in vrijwel alle internationale,

ationale of regionale transportsystemen de behandeling van deze logistieke beslissingen. Voorbeelden hiervan zijn beslissingen betreffende het voorraadbeleid, de grootte van de bestelling, het toepassen van consolidatie, de keuze van verschillende distributiecentra en de transportmodi die verbonden zijn met het creëren van een goederenvervoerstroam. Zeker bij de keuze van een transportmodus is het heel belangrijk dat deze logistieke beslissingen, naast andere transportbeslissingen, ook mee opgenomen moeten worden in het keuzeproces (Ben-Akiva & De Jong, 2007).

Geïntegreerde logistieke modellen zoeken naar het minimum van zowel voorraad- als transportkosten, rekening houdend met de servicestandaard of servicekwaliteit die aan klanten wordt aangeboden (Ben-Akiva & De Jong, 2007). Enerzijds wil een bedrijf zijn transportkosten minimaliseren door te kiezen voor een langzame transportmodus met een hoge capaciteit zodat grote hoeveelheden vervoerd kunnen worden. Dit wil zeggen dat er niet zo frequent geleverd wordt waardoor de voorraad dus in grote hoeveelheden geleverd en opgeslagen moet worden en de voorraadkosten al snel hoog kunnen oplopen. Anderzijds wil het bedrijf natuurlijk ook deze voorraadkosten zo laag mogelijk houden (Vernimmen & Witlox, 2003). Dit kan gedaan worden door kleinere hoeveelheden meer frequent te leveren, wat dan op zijn beurt weer hogere transportkosten met zich meebrengt. Deze trade-off tussen transportkosten en voorraadkosten is dus een belangrijk onderdeel van het logistiek model (Ben-Akiva & De Jong, 2007).

Oorspronkelijk werden het voorraadbeheer en transportbeleid als twee afzonderlijke planningsproblemen behandeld. De kostenstructuur van de voorraad en de integratie tussen voorraadbeheer en productie zijn in de meeste systemen en modellen zeer goed ontwikkeld. Hetzelfde kan echter niet gezegd worden over het transportbeleid. Vaak wordt door het bedrijf aangenomen dat het transport ofwel behandeld wordt door de leverancier en het dus al in de eenheidsprijs opgenomen is, ofwel wordt ervan uitgegaan dat de transportkosten vast zijn. Maar onderzoeken van Carter & Ferrin (1996) en Swenseth & Godfrey (2002) hebben aangetoond dat er duidelijk een verschil is tussen beide wanneer men de optimale bestelhoeveelheid, die in de meeste modellen gebruikt wordt om tot een goed voorraadbeleid te komen, wil berekenen. Het is dus zeer nuttig om beslissingen betreffende voorraadbeheer en transportbeleid samen te brengen en de gecombineerde kosten te minimaliseren (Andersson et al., 2010).

Binnen de supply chain is het aantal 'Vendor Managed Inventory' of VMI-contracten tussen verschillende actoren in de keten ook enorm gestegen. Binnen zo een contract krijgt de leverancier de vrijheid over alle beslissingen betreffende de voorraad zoals de timing en de grootte van de leveringen. In ruil hiervoor moet de leverancier ervoor zorgen dat zijn klanten nooit zonder voorraad komen te zitten. Op die manier kan de leverancier het voorraadbeleid afstemmen op het transportbeleid (Andersson et al., 2010).

Naast het voorraadbeleid zijn het al dan niet toepassen van consolidatie en het gebruik van distributiecentra ook belangrijke logistieke beslissingen die de kostenstructuur en de keuze van een transportmodus kunnen beïnvloeden. Consolidatie is het samenvoegen of bundelen van verschillende ladingen om daarna gezamenlijk te verzenden. Er ontstaan vollere voertuigen of

vaartuigen. Als gevolg zal de transportkost dalen omdat deze gedeeld kan worden met andere verzenders. De mate van consolidatie is echter wel afhankelijk van de transportmiddelen die beschikbaar zijn binnen een bepaalde transportketen en de aanwezigheid van andere ladingen die verzonden worden vanuit het hetzelfde consolidatiecentrum (Ben-Akiva & De Jong, 2007). Verder zijn er nog schaalvoordelen, die worden verkregen door het verzenden van vollere ladingen. Dit stimuleert bedrijven om hun kosten te drukken. Deze schaalvoordelen worden ook beïnvloed door de manier waarop goederen worden vervoerd en opgeslagen. Zo is het bijvoorbeeld goedkoper om kisten te vervoeren dan individuele eenheden en het vervoeren van paletten is op zijn beurt goedkoper dan het vervoeren van kisten (Meixell & Norbis, 2008).

1.2 Onderzoeksvragen

1.2.1 Centrale onderzoeksvraag

De selectie van een transportmodus om de inkomende en uitgaande goederen van een bedrijf te verplaatsen is een zeer belangrijke beslissing voor het logistiek management. Het transport en de distributie kunnen een grote rol spelen bij het bereiken van concurrentievoordeel ten op zichte van andere bedrijven in de sector. Naast de keuze van transportmodus kunnen ook de prestaties van de transporteur een grote invloed hebben op de gehele logistieke functie van een bedrijf. Het proces van het selecteren van een geschikte en efficiënte transportmodus en transporteur is zeer belangrijk voor het succes van een bedrijf (Meixell & Norbis, 2008). Om tot zo een selectie te komen is het zeer belangrijk dat naast transportkosten ook verschillende logistieke beslissingen in acht worden genomen. Zoals het bovenstaande praktijkprobleem aangeeft, is er nood aan de integratie van logistieke aspecten met transport wat betreft het beslissingsproces. Daarom wordt in dit onderzoek vooral gekeken naar welke logistieke beslissingen een grote invloed hebben op de keuze betreffende transportmodus en hoe we deze dan kunnen integreren in bestaande goederenvervoermodellen. Hieruit volgt de volgende centrale onderzoeksvraag:

- *Waarom en hoe moeten logistieke beslissingen opgenomen worden in goederenvervoermodellen?*

1.2.2 Deelvragen

Om tot deze centrale onderzoeksvraag te komen, worden eerst een aantal deelvragen beantwoord.

1. *Welke goederenvervoermodellen bestaan er?*

Hier wordt onderzocht welke goederenvervoermodellen al bestaan en beschreven worden in de literatuur. Het is belangrijk om een duidelijk overzicht te maken van welke aspecten of fasen al dan niet worden opgenomen in de verschillende goederenvervoermodellen en welke methoden men hanteert in deze modellen. Er wordt dus gekeken wat in de meeste goederenvervoermodellen

ontbreekt of welke aspecten in mindere mate opgenomen worden in het model. Het antwoord op deze vraag is al voor een deel bekend, het zijn namelijk de logistieke beslissingen die vaak niet in rekening worden gebracht. Verder wordt nog dieper ingegaan op *waarom* de meeste goederenvervoermodellen dit niet of in mindere mate opnemen. Voorbeelden van goederenvervoermodellen die nader bekeken zullen worden zijn het bekende vierstapsmodel en het ADA-model van Ben-Akiva en De Jong (2008).

2. *Wat houdt de logistieke module in?*

Vervolgens zal deze derde deelvraag onderzoeken wat juist verstaan wordt onder de logistieke module in goederenvervoermodellen. Hier wordt gekeken naar onder andere:

- welke logistieke beslissingen bestaan er en welke moeten in rekening gebracht worden?
- welke transportmodi zijn er en welke invloed hebben deze op de logistieke beslissingen?
- welke informatie hebben we nodig bij het maken van logistieke beslissingen?
- welke gegevens zijn nodig om de totale logistieke kosten te kunnen modelleren?

3. *Hoe beïnvloeden deze logistieke beslissingen de keuze van een transportmodus?*

Tot slot zal de vierde deelvraag het "totale logistieke kosten" principe nader toelichten. Dit zal gedaan worden aan de hand van een concreet voorbeeld. Verder wordt ook onderzocht wat de invloed is van een wijziging in één van de logistieke aspecten op de transportkeuze. Hier zal ook duidelijk worden waarom het zo belangrijk is dat deze totale logistieke kost wordt opgenomen in het model als men een goede en efficiënte keuze wil maken betreffende de transportmodus.

1.3 Methodologie

Om te kunnen onderzoeken hoe logistieke beslissingen opgenomen dienen te worden bij de keuze betreffende transportmodus, zal enerzijds een kwalitatief onderzoek of literatuurstudie gedaan worden en anderzijds een kwantitatief onderzoek in de vorm van een praktijkvoorbeeld. De masterproef zal voornamelijk bestaan uit kwantitatief onderzoek.

1.3.1 Kwalitatief onderzoek: literatuurstudie

Het eerste deel van de masterproef bestaat uit een literatuurstudie die hoofdzakelijk gedaan is op basis van wetenschappelijke artikels. Relevante informatiebronnen voor deze literatuurstudie zijn voornamelijk elektronische databases zijn zoals EBSCOhost, die dankzij U Hasselt ter onzer beschikking is, maar ook wetenschappelijk boeken of tijdschriften zullen geraadpleegd worden.

In de zoekmachine EBSCOhost wordt vooral gezocht op termen die te maken hebben met logistiek en transport. Zo wordt de zoektocht gestart met trefwoorden zoals "freight transportation models",

“incorporating logistics”, “inventory-theoretic approach”, “transportation mode”, “transport choice”, “integrated logistics”, et cetera.

Ook het gebruik van referenties in wetenschappelijke artikels naar andere auteurs leidt tot goede resultaten. Zo kan een wetenschappelijk artikel verwijzen naar meer gedetailleerde paper die veel dieper op een bepaald onderwerp ingaan. Deze laatste zijn zeer gemakkelijk om te zoeken aangezien de titel, auteur en plaats van publicatie terug te vinden zijn in de referentielijst van het oorspronkelijk artikel.

Vervolgens is het zeer belangrijk dat elk wetenschappelijk artikel voldoende kritisch gelezen wordt, zeker wanneer het gaat om oudere artikels. Deze bevatten vaak verouderde informatie en houden geen rekening met recente ontwikkelingen. Wanneer er twijfel is omtrent de uitleg van een bepaald begrip of wanneer verschillende wetenschappelijke artikels elkaar tegenspreken, is het zeker nodig meer informatie en recentere informatie omtrent dit onderwerp te onderzoeken.

Verder beperkt het onderwerp van deze masterproef zich niet tot een bepaald geografisch gebied. Transport is internationaal aanwezig en er kan dus gebruik gemaakt worden van wetenschappelijke artikels over en uit andere landen.

Op basis van deze literatuurstudie zal een antwoord op de eerste twee deelvragen gevormd worden. Er zal enerzijds een overzicht gegeven worden van de verschillende bestaande goederenvervoermodellen en de theorieën. Ook zal er al gekeken worden naar aspecten die nog ontbreken in deze modellen en die toch belangrijk zijn om tot een efficiënte keuze wat betreft transportmodus te kunnen komen. Dit zal dan een goede basis vormen voor het praktijkgedeelte van de masterproef.

1.3.2 Kwantitatief onderzoek: praktijk

In het tweede deel van de masterproef wordt een praktijkvoorbeeld uitgewerkt. In het kader van het bekende vierstapsmodel, is deze praktijkstudie eigenlijk de derde stap. Hier wordt er op zoek gegaan naar *hoe* een bepaalde hoeveelheid van een bepaald product van de ene locatie naar de andere locatie vervoerd zal worden, met minimalisatie van de totale logistieke kosten voor ogen. Er wordt, met andere woorden, gezocht naar de optimale transportkeuze.

Aan de hand van dit praktijkprobleem zal een antwoord geformuleerd worden op de laatste twee deelvragen. Eerst zal gekeken worden naar welke logistieke beslissingen allemaal opgenomen kunnen worden. Vervolgens worden daar de meest relevante uitgehaald om in het model op te nemen. Daarnaast moeten ook specifieke paramaters bepaald worden om deze beslissingen op een juiste manier te kunnen kwantificeren. Zo zullen beslissingen gemaakt moeten worden wat betreft de locatie van de verzender, de locatie van de vervanger, de afstand tussen deze locaties, het type goederen, de gemiddelde verzendinggrootte, de verschillende transportketens die beschikbaar zijn en alle mogelijke transportmodi.

Het praktijkvoorbeeld wordt echter niet op een reële situatie toegepast. Er wordt gebruik gemaakt van een fictieve situatie en er zullen dus onvermijdelijk een aantal veronderstellingen gemaakt moeten worden. Daarom zal ook gebruik gemaakt worden van een sensitiviteitsanalyse om de invloed van een gemaakte veronderstelling of een bepaald gegeven op het uiteindelijke resultaat na te gaan. Bij transport via het water, kan het type schip (groot, klein,..) dat gekozen wordt al dan niet een grote invloed hebben op het eindresultaat. Er wordt onderzocht hoe de uiteindelijke transportkeuze beïnvloed wordt door veranderingen van waarden of variabelen in de totale logistieke kostenfunctie aan te brengen. Hiertoe zullen verschillende scenario's langs elkaar gelegd worden om te vergelijken. Op deze manier kunnen de variabelen die het meeste invloed hebben op het resultaat geïdentificeerd worden.

Het praktijkgedeelte zal worden afgesloten met een conclusie die de link legt tussen de twee delen en enkele kritische bedenkingen wat betreft de verschillende gegevens en parameters die worden opgenomen in het model.

2. Bestaande modellen om goederenvervoer te modelleren

Het afgelopen decennium heeft veel nieuwe goederenvervoermodellen gekend die voor transportplanning gebruikt worden. Sommige van deze modellen hebben nieuwe concepten zoals de logistieke module, het opnemen van overslag, opslag, sourcing en het bepalen van de grootte van de bestelling ontwikkeld. Er wordt steeds meer druk uitgeoefend op transportmodellering. Om de impact van het transportbeleid te kunnen bestuderen is er een voortdurend groeiende drang om de beperkingen van de verschillende goederenvervoermodellen te begrijpen (De Jong et al., 2010).

Goederenvervoermodellen worden ontwikkeld om de toekomstige hoeveelheden die getransporteerd moeten worden te voorspellen. Uit vorig onderzoek (De Jong et al., 2004), blijkt dat veel goederenvervoermodellen oorspronkelijk ontwikkeld zijn voor personenvervoer.

De meest belangrijke verschillen tussen goederenvervoer- en personenvervoermarkten liggen ten eerste in de diversiteit van de beslissers in goederenvervoer, zo zijn er verzenders, ontvangers, tussenpersonen, chauffeurs en operatoren die betrokken zijn met het nemen van logistieke beslissingen, het planningsprobleem en de coördinatie van de transportketen. Ten tweede is er de diversiteit van de items die vervoerd worden en ten derde is er nog de beperkte beschikbaarheid van data bij goederenvervoer. Hier gaat het vooral om gedesaggregeerde data die mede als gevolg van vertrouwelijkheidredenen niet snel wordt vrijgegeven. Daarom maken de meeste goederenvervoermodellen dan ook alleen gebruik van geaggregeerde data. De hierboven besproken verschillen zorgen ervoor dat het modelleren van goederenvervoer veel complexer is dan het modelleren van personenvervoer (De Jong et al., 2010).

In dit hoofdstuk wordt eerst gekeken naar een aantal bekende bestaande modellen zoals het vierstapsmodel, het simulatiemodel van Liedtke (2009), het ADA-model van Ben-Akiva en De Jong (2008) en het model van Roorda et al. (2010). Bij deze laatste drie modellen wordt het opnemen van logistieke beslissingen extra benadrukt. Omdat het type data dat gebruikt wordt bij het maken van een model zeer belangrijk is en een grote impact heeft op de uitkomst van het model wordt in dit hoofdstuk ook nog teruggekomen op het verschil tussen gedesaggregeerde en geaggregeerde data. Hierbij wordt ingegaan op de dataverzameling voor goederenvervoermodellen en het ontbreken van voornamelijk gedesaggregeerde data (die vaak logistieke beslissingen inhouden). Verder wordt gekeken hoe aan de hand van een sensitiviteitsanalyse bepaald kan worden welke data nu juist belangrijk is en in welke mate deze een impact heeft op de resultaten van een model.

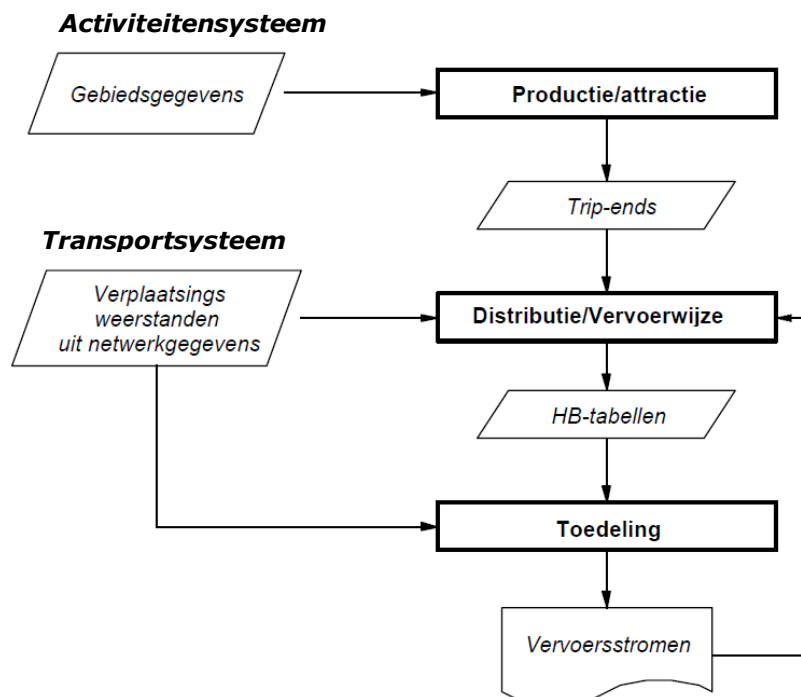
2.1 Vierstapsmodel

2.1.1 Inleiding

Het vierstapsmodel is een geaggregeerd model dat opgebouwd is uit vier modules, namelijk Productie-Attractie, Distributie, Transportkeuze en Toewijzing. Het model vindt zijn oorsprong in het personenvervoer en kan dankzij een aantal aanpassingen ook gebruikt worden voor het modelleren van goederenvervoer. Zo worden er additionele transformatiemodules gebruikt om goederenstromen uitgedrukt in monetaire eenheden om te zetten naar goederenstromen uitgedrukt in ton. Een andere module behandelt dan weer het converteren van goederenstromen naar fysieke voertuigenstromen (De Jong et al. 2004).

2.1.2 Model

De vier modules van het vierstapsmodel moeten rekening houden met omgevingsfactoren. Meer specifiek wil dit zeggen dat zowel het Activiteitensysteem (de activiteiten waaruit de vraag naar transport zal komen) als het Transportsysteem (het transportnetwerk, de verschillende transportmodi, wetgevingen, infrastructuur et cetera) in acht genomen moeten worden (Mc Nally, 2000). De vier stappen van het model zullen hieronder besproken worden.



Figuur 1. Structuur van het traditioneel vierstapsmodel (Immers & Stada, 2004)

PRODUCTIE - ATTRACTIE

Het doel van de productie-attractie stap in het klassieke transportmodel is het voorspellen van het totaal aantal geproduceerde respectievelijk aangetrokken verplaatsingen voor elke zone in het studiegebied. De productiemodule beschrijft het aantal verplaatsingen dat gegenereerd wordt in een bepaalde zone op basis van een aantal persoonlijke kenmerken (inkomen, autobezit et cetera) en kenmerken van de omgeving (bereikbaarheid en kwaliteit van de transportmogelijkheden vanuit die zone). Het totaal aantal geproduceerde verplaatsingen per zone wordt berekend, ongeacht de zone van bestemming. De attractiemodule beschrijft dan het totaal aantal verplaatsingen dat aangetrokken wordt door een bepaalde zone, ongeacht de zone van herkomst, als functie van kenmerken zoals werkgelegenheid of winkeloppervlak. De berekende producties en attracties worden ook wel trip-ends genoemd. Over een voldoende lange periode moet het totaal aantal vertrekken over alle zones gelijk zijn aan het totaal aantal aankomsten. De uitkomsten van productie- en attractiemodules zullen worden aangepast indien deze niet in balans zijn (Immers & Stada, 2004).

DISTRIBUTIE

In de distributiemodule worden de verplaatsingen met herkomst uit een bepaalde zone i (berekend in de productiemodule) verdeeld over de mogelijke bestemmingen j . De verplaatsingen met zone j als bestemming (berekend in de attractiemodule) worden verdeeld over de mogelijke herkomsten i . Dit volledige patroon van verplaatsingen in het studiegebied kan weergegeven worden in een zogenaamde herkomst-bestemmingsmatrix (HB-matrix).

Vertrekken	Aankomsten				$\sum_j T_{ij}$
	1	2	j	n	
1	T_{11}	T_{12}		T_{1n}	O_1
2	T_{21}	T_{22}		T_{2n}	O_2
i			T_{ij}		O_i
m	T_{m1}	T_{m2}		T_{mn}	O_m
$\sum_i T_{ij}$	D_1	D_2	D_j	D_n	$\sum_j T_{ij} = T$

Figuur 2. Algemene vorm van een herkomst-bestemmingsmatrix (Immers & Stada, 2011)

Een HB-matrix is een tweedimensionale matrix die bestaat uit m rijen en n kolommen. De rijen van de HB-matrix stellen de herkomstzones voor en de kolommen representeren de bestemmingszones. Een zone is meestal zowel herkomst- als bestemmingszone en dus is de matrix vierkant (dit wil zeggen $m=n$). De cellen van rij i stellen verplaatsingen voor die uit zone i vertrekken met de zone van de corresponderende kolom j als bestemming. Op de diagonaal van de matrix van links boven naar rechts onder bevinden zich de *intrazone* verplaatsingen. Dit zijn verplaatsingen waarvan de herkomst en de bestemming zich in dezelfde zone bevinden. De andere cellen (buiten de diagonaal) zijn *interzone* verplaatsingen. Verder wordt het aantal verplaatsingen van zone i naar j (per tijdseenheid) voorgesteld met T_{ij} . De som van T_{ij} over alle kolommen voor rij

i is het totaal aantal verplaatsingen vertrekkend uit zone i en wordt aangeduid met O_i . De som van T_{ij} over alle rijen voor kolom j is het totaal aantal verplaatsingen met zone j als bestemming en wordt aangeduid met D_j . (O staat voor origins en D voor destinations.) Het totaal aantal verplaatsingen in de gehele matrix wordt aangegeven met T . Het doel van de distributiemodule is om T_{ij} te bepalen. Hierbij fungeren O_i en D_j als randvoorwaarden en worden bijvoorbeeld verkregen uit een toepassing van een productie- of attractiemodule. Belangrijk op te merken, is dat de distributiemodule zich beperkt tot unimodaal transport. De verdeling van verplaatsingen over verschillende transportmodi (modal split) komt aan bod in de volgende stap (Immers & Stada 2004).

De meest gebruikte methode in deze module is het zwaartekrachtmodel. Dit model gaat de vervoerstromen tussen de zones verdelen over een HB-matrix op basis van reisweerstand. Deze weerstanden kunnen de afgelegde afstand en/of de reistijd omvatten. Daarnaast zijn ook variabelen zoals de veiligheid van het traject en de transportkosten (brandstof, tol, et cetera) van belang. In de meeste gevallen worden enkel factoren beschouwd die effectief kwantificeerbaar zijn zoals tijd- en kostengerelateerde variabelen. In Bijlage 1 is de werking van het zwaartekrachtmodel opgenomen (Immers & Stada 2004).

TRANSPORTKEUZE/MODAL SPLIT

Deze stap berekend welke transportmodus de reizigers gebruiken op basis van persoonskenmerken en de transportmodi die beschikbaar zijn. Deze verdeling van verplaatsingen over de verschillende transportmodi wordt "modal split" genoemd (Immers & Stada 2004). Zowel geaggregeerde als gedesaggregeerde data worden hier gebruikt om de vervoerstromen aan verschillende transportmodi toe te wijzen. Geaggregeerde modellen worden geschat op basis van gegevens over het aandeel van de verschillende transportmodi voor een aantal zones. Ze geven dus het marktaandeel van een bepaalde modus en niet de absolute hoeveelheid van transport (in ton) of verkeer (in voertuigen). Gedesaggregeerde modellen gebruiken gegevens uit enquêtes en/of stated preference onderzoeken die gevoerd worden (De Jong et al., 2004).

De factoren die een impact hebben op de keuze van de transportmodus kunnen in drie grote groepen ondergebracht worden (Ortúzar & Willumsen, 1995). Deze factoren zijn in eerste instantie van toepassing op personenvervoer maar sommigen gelden ook voor goederenvervoer (aangeduid met *):

1. Eigenschappen van de persoon die de reis maakt
 - Beschikbaarheid van een voertuig (*)
 - Bezit van een rijbewijs (*)
 - Structuur van het huishouden (aantal kinderen, koppels, alleenstaand,...)
 - Inkomen
 - Externe beslissingen
 - Dichtheid van de bevolking

2. Eigenschappen van de reis

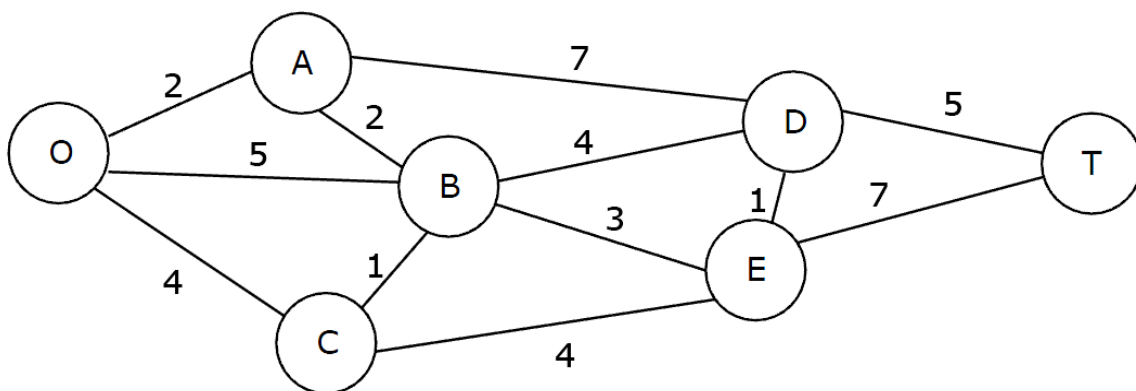
- Doel van de reis: bijvoorbeeld de reis naar/van het werk is gemakkelijker via het openbaar vervoer omdat deze op regelmatige tijdstippen rijdt.
- Tijdstip van de reis: bijvoorbeeld al dan niet tijdens het spitsuur (*)

3. Eigenschappen van de transportvoorziening

- Relatieve reistijd: onderweg zijn, wachten, in- en uitladen (*)
- Relatieve kost: brandstof, taxen, lonen, directe kosten (*)
- Beschikbaarheid en kost van parkeren
- Comfort en gemak
- Betrouwbaarheid, flexibiliteit en regelmaat (*)
- Bescherming en beveiliging (*)

TOEWIJZING AAN EEN NETWERK

Vaak zijn er verschillende routes mogelijk tussen een herkomst en een bestemming (ook indien er maar één transportmodus gebruikt wordt). In de toewijzingsmodule worden de verplaatsingen tussen verschillende herkomsten en bestemmingen afkomstig uit de HB-tabellen toegewezen aan de mogelijke routes op het netwerk en dit op basis van de eigenschappen van die routes (bijvoorbeeld files). Deze toewijzing gebeurt voor elke transportmodus afzonderlijk en resulteert in vervoerstromen op de schakels van de verschillende netwerken. Complexe routeplanningsproblemen kunnen door middel van algoritmes en GIS-software opgelost worden. Deze algoritmes zijn gebaseerd op het principe van knooppunten en links of connecties hiertussen (paden). Een heel bekend voorbeeld hiervan is het traveling salesman probleem waarbij gezocht wordt naar het kortste pad tussen twee locaties. Het kan hier gaan om afstanden, kosten of tijden die geminimaliseerd moet worden.



Figuur 3. Voorbeeld kortste pad probleem (Hillier & Lieberman, 2010)

2.1.3 Aanvullingen op het vierstapsmodel

Voor goederenvervoermodellen zijn er, naast de traditionele vier stappen, vaak transformatiemodules nodig. De conversies die toegepast worden zijn afhankelijk van het soort goederenvervoermodel dat gebruikt wordt. De goederenvervoermodellen die vertrekken van het vierstapsmodel kunnen opgedeeld worden in twee subgroepen, namelijk de rittengebaseerde en de goederengebaseerde modellen.

Het rittengebaseerde model focust zich op de afgelegde weg van het transport en niet zozeer op de goederen die getransporteerd worden. De goederenstromen worden in de meeste gevallen op een geaggregeerd niveau geschat. Deze stromen worden vaak rechtstreeks gegenereerd uit factoren zoals aantal werknemer, grondoppervlakte et cetera (Wisetjindawat et al., 2007). Door nadruk te leggen op de ritten kan een onderscheidt gemaakt worden tussen geladen en lege ritten. Hier staat tegenover dat er geen rekening gehouden wordt met economische eigenschappen van zendingen, die een grote invloed hebben op de keuze van de transportmodus, het routeplanningsproces en de grootte van het voer- of vaartuig. Bovendien is dit model vaak maar beperkt toepasbaar voor intermodaal goederenvervoer (Holguín-Veras & Thorson, 2003).

Goederengebaseerde modellen daarentegen leggen de nadruk op de beweging van goederen. Het voordeel van deze modellen is dat ze wel rekening houden met economische karakteristieken van goederen, zoals het gewicht, het volume, de vorm en de waarde (Wisetjindawat et al., 2007). Daar tegenover staat dat lege ritten niet in rekening gebracht kunnen worden (Holguín-Veras & Thorson, 2003).

Deze transformatiemodules kunnen bijvoorbeeld goederenstromen uitgedrukt in monetaire eenheden omzetten naar fysieke stromen, uitgedrukt in ton. Deze omzetting zou kunnen gedaan worden aan de hand van waarde/gewicht-ratio's voor verschillende soorten goederen, om zo bijvoorbeeld productie en attractie te bepalen.

Een andere mogelijke transformatie is het omzetten van goederenstromen uitgedrukt in ton naar transporteenheden, bijvoorbeeld tussen de modules transportkeuze en toewijzing aan een netwerk. Dergelijke omzetting kan gebeuren in drie stappen. Eerst worden de lotgrootte en de frequentie van de leveringen bepaald, meestal op basis van voorraad- en transportkosten. Vervolgens wordt de goederenstromen toegewezen aan een transportmodus en een transporteur. Deze keuze is sterk afhankelijk van de eigenschappen van de verzenders, de ontvangers, de getransporteerde goederen en het bedrijf zelf. Ook de totale transportkosten zijn zeer belangrijk bij het nemen van deze keuzes en moeten geminimaliseerd worden. Tot slot wordt een transportroute geselecteerd. Deze route moet de leveringen zo optimaal mogelijk inbouwen zodat goederen voor meerdere klanten in één rit bezorgd kunnen worden. Ook hier moeten de totale transportkosten geminimaliseerd worden (Wisetjindawat et al., 2007).

2.1.4 Kritische reflectie

De noodzaak van de integratie van de logistieke module met de transportmodule in goederenvervoermodellen wordt alsmaar meer benadrukt. Toch hanteren de meest gekende modellen deze aspecten als twee aparte onderdelen. Zoals eerder aangehaald moeten managers rekening houden met recente trends zoals het steeds populairdere JIT-principe. Ook de druk uit de ecologische hoek zorgt ervoor dat beleidsmaatregelen steeds meer rekening moeten houden met transportmanagement en de regularisering. Deze beleidsmaatregelen kunnen echter een grote invloed hebben op het keuzegedrag van de verschillende betrokken actoren. De huidige goederenvervoermodellen moeten dus meer rekening houden met gedragsgerichte beslissingen. Dit is een belangrijke tekortkoming van het vierstapsmodel. Ook wordt er in het vierstapsmodel geen rekening gehouden met de integratie van logistieke beslissingen waardoor het model minder accuraat is (Ben-Akiva & De Jong, 2007).

De vier modules onderling zijn verder niet erg sterk gelinkt met elkaar, waardoor feedback soms niet naar andere modules wordt overgedragen. Ook kunnen de effecten van de beslissingen van de verschillende actoren niet over de verschillende modules heel geïntegreerd worden. Bovendien gaat de heterogeniteit van de actoren verloren over de modules, alsook gegevens over beperkingen in bepaalde beslissingen. Tot slot wordt er geen rekening gehouden met het tijdsperspectief waardoor korte en lange termijnbeslissingen niet van elkaar onderscheiden kunnen worden (Heinitz & Liedtke, 2010).

Een model dat logistieke beslissingen wel opneemt is zeker vereist. Beslissingen die verbonden zijn aan de transportmodule mogen hierbij natuurlijk niet verwaarloosd worden. Daarom moet er meer aandacht besteedt worden aan een goede integratie van de logistieke beslissingen met deze transportmodule (Ben-Akiva & De Jong, 2007).

Goederenmodellen die wel rekening houden met de logistieke module en de integratie hiervan met de transportmodule zijn het simulatiemodel van Liedtke (2009), het ADA-model van Ben-Akiva en De Jong (2008) en het model van Roorda (2010). Deze drie modellen zullen hieronder besproken worden.

2.2 Simulatiemodel van Liedtke (2009)

Liedtke (2009) beschrijft een goederenvervoermodel waarin verschillende logistieke- en transportbeslissingen gemodelleerd worden op micro-economisch niveau. Hierbij worden gedragsgerichte beleidsmaatregelen geëvalueerd rekening houdend met complexe logistieke reactiepatronen. Het gedrag van individuele actoren wordt gesimuleerd aan de hand van normatieve logistieke modellen en verzamelde marktkennis. De interactie tussen de verzenders en transporteurs wordt via gesimuleerde veilingen van transportcontracten bepaald en resulteert uiteindelijk in de generatie van routes.

In goederenvervoermodellen is het formuleren van een afzonderlijk micro-economische gedragsmodel voor elk type speler zeer belangrijk. Zo krijgen de verzenders en de ontvangers te maken met logistieke beslissingsproblemen met betrekking tot voorraad, bestellingen en productie. De transporteurs moeten omgaan met routeplanningsproblemen en de expediteurs coördineren en ontwerpen transportketens.

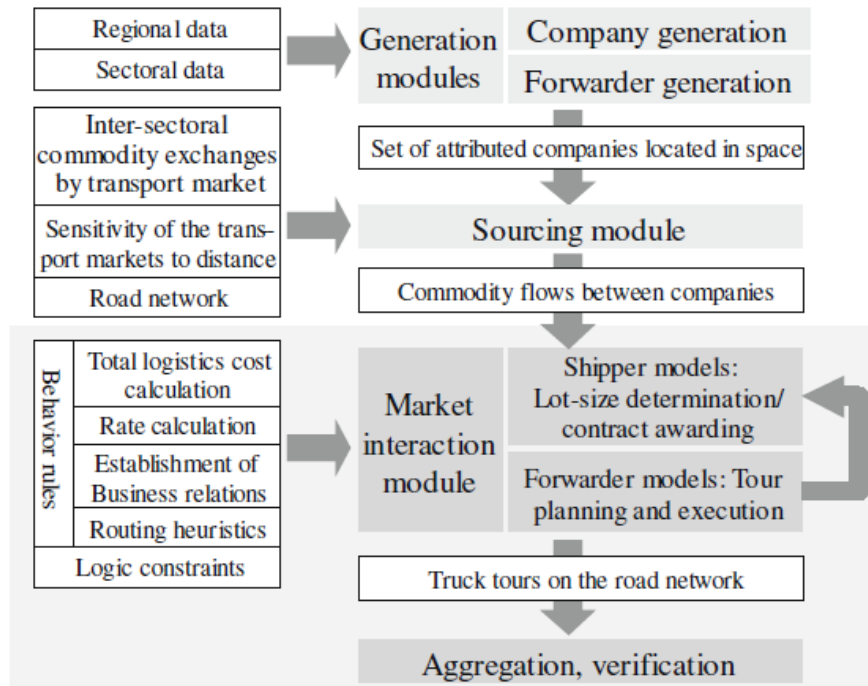
2.2.1 Kernassumpties en basisprincipes

Het simulatiemodel maakt een onderscheid tussen endogene en exogene variabelen, afhankelijk van het doel. De gedragsregels hebben een invloed op de ontwikkeling van de endogene variabelen en worden dus beïnvloed door het model. Dit is niet het geval voor de exogene variabelen. De basisassumpties voor een microscopische transportsimulatie, gericht op de korte termijn reacties van de actoren op de beleidsmaatregelen, zijn als volgt:

- De belangrijkste beslissers zijn bedrijven (fabrieken en groothandel) die fungeren als verzenders/ontvangers.
- De locatiepatronen van bedrijven en de beslissingen betreffende de jaarlijkse goederenstroom tussen bedrijven worden gescheiden van de tactische en operationele logistieke besluitvorming.
- De verzenders en ontvangers wisselen een vaste hoeveelheid van goederen uit over een bepaalde periode (microscopische goederenstroom).
- De optimale leverhoeveelheid is onderling overeengekomen tussen verzender en ontvanger en is gebaseerd op het "minimale totale logistieke kosten" principe (volledige samenwerking).
- De uitwisseling van informatie tussen verzenders en expediteurs gebeurt via de markt voor transportcontracten (lokale markt).
- Transportbedrijven bouwen tijdelijk een stabiel micro transportnetwerk uit.

Het model van Liedtke (2009) is ontworpen om het langeafstandstransport in Duitsland te modelleren met behulp van de operationele softwaretool INTERLOG¹. Het model heeft dus enkel betrekking op wegtransport. Elke simulatie, uitgevoerd met deze software, kan onderverdeeld worden in drie stappen of modules (Figuur 4). De eerste stap genereert locatiepatronen van heterogene bedrijven op basis van beschikbare statistieken (= generatiemodule). Vervolgens worden de verzender-ontvanger relaties opgebouwd en de bedrijven bepalen de vraag naar goederen die geleverd moeten worden (=sourcing module). Ten slotte wordt er een interactieve markt gesimuleerd waarin goederenstromen worden omgezet naar individuele zendingen, transportcontracten worden toegewezen aan expediteurs en routes worden opgebouwd (=dynamische simulatie van transportmarkten).

¹ INTERLOG is een systeem dat het bieden op transportcontracten simuleert met feedback over beslissingen betreffende bestelgrootte en routeplanning.



Figuur 4. INTERLOG simulatiemodules (Liedtke, 2009)

2.2.2 Generatiemodule

De generatiemodule creëert een virtuele industriewereld bestaande uit n verzenders, ontvangers en transportbedrijven. De staat van elk bedrijf wordt gekenmerkt door zijn economische activiteit, het aantal werknemers en de locatie. Het locatiepatroon van de verschillende actoren wordt gegenereerd door een Monte Carlo algoritme met behulp van statistische gegevens. De belangrijkste input voor deze module zijn statistische gegevens over de verdeling van de grootte van bedrijven op nationaal niveau en informatie betreffende het aantal werknemers per sector en regio.

Aangezien er algemeen een afweging is tussen sectorale en regionale nauwkeurigheid, wordt de volgende procedure voorgesteld: Eerst worden er stapsgewijs en willekeurig ondernemingen gecreëerd via het Monte Carlo algoritme. Vervolgens wordt de grootte van de nieuwe onderneming bepaald. Tot slot wordt een branch-and-bound algoritme toegepast om elke gegenereerde onderneming toe te wijzen aan een bepaalde geografische zone. Bij elke tak (branch) wordt nagegaan of de grootte van het bedrijf kleiner is dan de beschikbare structurele gegevens op dit regionale niveau.

Het resultaat van deze generatiemodule is een ruimtelijke verdeling van bedrijven die toegewezen kan worden aan de transportvraag en -aanbod.

2.2.3 Sourcing module

De sourcing module richt zich op de keuzes betreffende de leveranciers en de uitwisseling van microscopische goederenstromen (in ton per jaar) tussen de verschillende actoren van de transportvraag.

De verschillende leveranciers voor elk bedrijf wordt bepaald met behulp van een Monte Carlo algoritme. Voor de beoordeling van de bedrijven als potentiële leveranciers worden de beschikbaarheid van het product (resterende onbenutte capaciteit), de transportkost, het nut van de goederen (economische activiteit), de communicatie en het risico binnen de supply chain (afstandgevoelig) in beschouwing genomen. Nadat het bedrijf een set van leveranciers gekozen heeft (relatienetwerk), wordt de nodige productiehoeveelheid verdeeld over deze leveranciers. De microscopische goederenstromen worden dan bepaald op basis van een Monte Carlo algoritme dat automatisch de productie- en attractie mogelijkheden en beperkingen opneemt.

2.2.4 Dynamische simulatie van de transportmarkten

Deze marktinteractie module laat zien hoe verzenders de goederenstromen verdelen in afzonderlijke zendingen en hoe deze zendingen op hun beurt worden toegewezen aan de expediteurs, rekening houdend met het kosten minimalisatie principe. Deze module maakt een onderscheidt tussen twee niveaus.

Op het eerste niveau wordt gekeken naar de transportvraagzijde. De verzenders gaan onderhandelen over contracten waarin de operationele voorwaarden van de transportrelatie vastliggen. Elk transportcontract bevat de vooraf gedefinieerde objecten die geladen en gelost moeten worden op een bepaalde locatie. Verder worden ook de lotgrootte, de frequentie van de levering, het gewicht en de compatibiliteit opgenomen in het contract. De optimale lotgrootte wordt bepaald met behulp van de totale logistieke kostenfunctie (TLC), die naast de transportkosten ook de voorraadkosten, safety-stock kosten en bestelkosten mee opneemt. Deze contracten worden dan toegewezen aan expediteurs.

Het tweede niveau omvat de coördinatie van de hiervoor genoemde transportcontracten door middel van routeplanning. De meeste routeplanningsproblemen zijn gedeeltelijk dynamisch. Dit wil zeggen dat naast het bepalen van een initieel routeplan, ook nieuwe stopplaatsen geïntroduceerd moeten kunnen worden in het bestaande routeplan. De onderstaande heuristiek beschrijft de opeenvolgende stappen die nodig zijn om nieuwe ophaal- en afleverpunten toe te voegen:

- 1) Neem het huidig routeplan en creëer een nieuw waarin de volgorde van de stopplaatsen onbepaald is
- 2) Schrap de stopplaatsen die al bediend zijn
- 3) Neem de nieuwe transportorders op uit de contracten
- 4) Sorteert deze nieuwe orders volgens transportafstand

- 5) Neem de order met de langste transportafstand uit de lijst in stap vier
- 6) Zoek de goedkoopst mogelijke positie in het routeplan om het nieuwe ophaal- en afleverpaar te plaatsen
- 7) Probeer dit nieuwe paar toe te voegen aan het bestaande routeplan op de goedkoopste locatie die gevonden werd in stap zes. Indien dit mogelijk is wordt het nieuwe paar vastgezet en wordt de rest van het routeplan berekend (ga verder met stap vijf). Indien het invoegen niet mogelijk is, wordt deze goedkope locatie uitgesloten en wordt er verder gegaan met stap 6.
- 8) Leg alle stopplaatsen vast (met behulp van het vorige voorlopige routeplan) en vervang het huidige routeplan met het nieuwe

2.3 ADA-model van Ben-Akiva en De Jong (2008)

Ben-Akiva en De Jong (2008) hebben het ADA-model (geaggregeerd-gedesaggregeerd-geaggregeerd) beschreven. Zij passen dit logistieke model toe op het Noorse en Zweedse goederentransport.

Het ADA-model is een goederenvervoermodel op internationaal, nationaal en regionaal niveau dat ontworpen is door en voor publieke besluitvormers. Deze goederenvervoermodellen worden gebruikt voor verschillende doeleinden zoals:

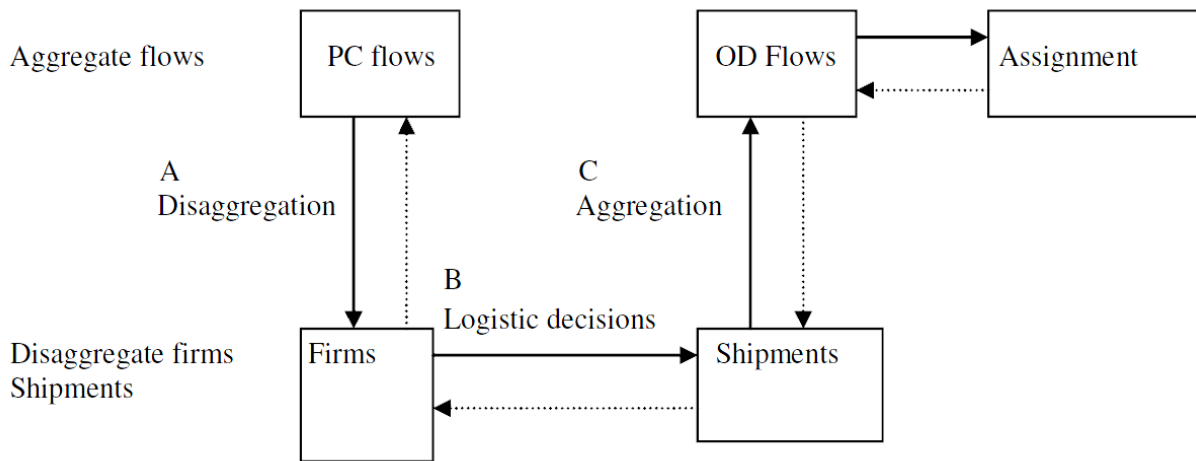
- het voorspellen van de vraag naar transport op middellange en lange termijn onder verschillende scenario's
- het testen van transportmaatregelen en veranderingen in het beleid, zoals de tolheffing op wegen
- het voorspellen van effecten op het verkeer als gevolg van nieuwe infrastructuur, zoals nieuwe wegen, spoorlijnen, kanalen, bruggen, tunnels, havens en openbare goederenterminals

Deze structuur van het ADA-model zal hieronder uitgebreider besproken worden. Vervolgens worden de relaties tussen de verschillende componenten van het ADA-model toegelicht. Tot slot wordt er gekeken naar welke gegevens vereist zijn binnen dit logistieke model.

2.3.1 Structuur van het ADA-model

In het ADA-model worden de productie-consumptie (PC) stromen en het netwerkmodel gespecificeerd op een geaggregeerd niveau omwille van de beperkte beschikbaarheid van gegevens. Tussen deze twee geaggregeerde componenten bevindt zich het logistieke model wat op het gedesaggregeerde niveau gespecificeerd wordt. Dit logistieke model verklaart de keuze van de grootte van de verzending en de transportketen met inbegrip van de keuze van de transportmodus voor elke tak van deze transportketen.

Figuur 5 is een schematische voorstelling van de structuur van het goederenvervoermodel. De verschillende componenten worden weergegeven in de vierkanten. De geaggregeerde modellen bevinden zich bovenaan de figuur en de gedesaggregeerde modellen onderaan.



Figuur 5. ADA structuur (Ben-Akiva & De Jong, 2008)

Het ADA-model onderscheidt volgende componenten:

1. *Productie-consumptie (PC) stromen*

Het model start met het bepalen van de goederenstromen (in ton, per productgroep) tussen de productie (P) zones en de consumptie (C) zones (zowel retail goederen voor eindgebruik als verdere verwerking van goederen voor intermediair gebruik worden beschouwd). Algemeen zijn deze modellen gebaseerd op economische statistieken die alleen beschikbaar zijn op geaggregeerd niveau.

2. *Logistieke model*

De PC stroom uit de eerste component van het ADA-model wordt omgezet in een origin-destination (OD) stroom (ook wel herkomst-bestemming stroom genoemd) aan de hand van drie stappen:

- A. Desaggregatie: de PC stromen worden toegewezen aan individuele bedrijven (= besluitvormers). De 'zone-naar-zone' stromen worden omgezet naar 'bedrijf-naar-bedrijf' stromen om zo de logistieke beslissingen te kunnen vastleggen op het niveau van de besluitvormers. Deze stap maakt het dus mogelijk om handel tussen individuele bedrijven te modelleren in plaats van handel tussen zones. Deze bedrijven kunnen fabrikanten, groothandelaren of detailhandelaren zijn.
- B. Het nemen van logistieke beslissingen: deze beslissingen hebben betrekking op de grootte van de levering, de frequentie van de levering, de transportmodi, het gebruik

van consolidatie- en distributiecentra, het gebruik van containers, het gebruik van terminals, havens, luchthavens et cetera. De minimalisatie van de totale logistieke kost ligt aan de basis bij het maken van deze beslissingen. (Deze werkwijze wordt in het praktijkgedeelte toegepast op een fictieve case)

- C. Aggregatie: de zendingen per producttype wordt omgezet naar origin-destination (OD) stromen.

3. *Netwerkmodel*

De verkregen OD stromen uit stap C worden toegewezen aan een netwerk. Deze toewijzing kan in principe ook gebeuren het niveau van individuele voertuigen. In dat geval wordt er gesproken van een ADD-model. Op het netwerk level zijn validatie/kalibratiegegevens (zoals verkeerstellingen op verschillende locaties) meestal beschikbaar. Toch komen voertuigspecifieke gegevens, die gebruikt kunnen worden om netwerkmodellen op micro level te schatten, steeds vaker voor.

2.3.2 Relaties tussen componenten

1. *Relatie tussen PC stromen en het logistieke model*

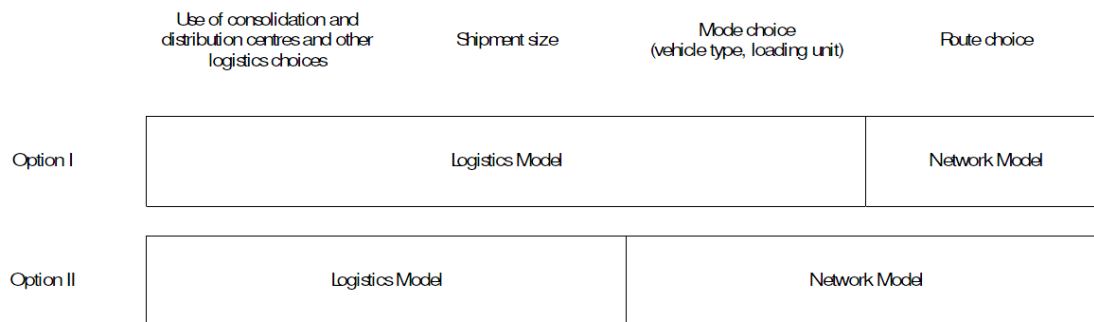
De PC stromen vertegenwoordigen wat belangrijk is in termen van economische relaties, zoals transacties binnen en tussen verschillende sectoren. Veranderingen in de finale vraag, de structuur van de economie en de international/interregionale handelspatronen hebben dan ook een directe impact op deze PC stromen.

Een direct toewijzing van de PC stromen aan het netwerk zou tot onjuiste resultaten leiden omdat de logistieke elementen niet in rekening worden gebracht. Veranderingen in logistieke processen (bijvoorbeeld een ander aantal of andere locatie van opslagplaatsen) en in logistieke kosten hebben een directe impact op de manier waarop PC stromen worden toegewezen aan logistieke ketens. Ben-Akiva en De Jong (2008) geven een voorbeeld dat betrekking heeft op een transportketen die zuiver gebaseerd is op het wegennetwerk. In dit voorbeeld brengt een kleine bestelwagen de lading eerst naar een consolidatiecentrum. Hier wordt de lading gebundeld met andere ladingen. Daarna wordt de lading met een grote vrachtwagen naar een distributiecentrum gebracht. Tot slot wordt er terug een kleine bestelwagen gebruikt om de lading tot aan de eindbestemming te vervoeren. Het toewijzen van deze OD stromen aan het netwerk verschilt sterk van het geval waarin enkel wordt uitgegaan van de PC stroom aangezien hier geen rekening wordt gehouden met de aanwezigheid van consolidatie- en distributiecentra. De toevoeging van een logistieke module die de PC stromen omzet in OD stromen zorgt dus voor een meer nauwkeurige toewijzing aan het netwerk.

2. Relatie tussen het logistieke model en het netwerkmodel

In een aantal bestaande goederenvervoermodellen, voert een deterministisch netwerkmodel zowel de keuze van de transportmodi uit als de toewijzing aan het netwerk (bij een multimodale toewijzing). Indien de toewijzing in het ADA-model multimodaal is, moet het logistieke model de keuze van de transportmodus dus niet voorspellen. Deze moduskeuze zou dan bepaald worden aan de hand van een deterministische optimalisatie. In figuur 6 wordt dit aangeduid als Optie II.

Een betere aanpak is echter om de keuze van de transportmodus op te nemen in het logistieke model en te beperken tot een unimodale toewijzing. Bij deze benadering wordt de keuze van transportmodus bepaald op een stochastische manier, samen met alle andere logistieke beslissingen (zoals grootte van de levering, het aantal takken in een transportketen, het gebruik van terminals et cetera). Dit wordt aangeduid als Optie I in figuur 6. De output van het logistieke model zal dan in termen van voertuigen of vaartuigen (niet alleen in ton) weergegeven worden tussen de verschillende OD stromen.



Figuur 6. Twee opties voor de combinatie van het logistieke model en het netwerkmodel (Ben-Akiva & De Jong, 2008)

2.3.3 Gegevensvereisten voor het logistieke model (Stappen A en B)

Voor het hierboven voorgestelde logistieke model zijn er een aantal eisen wat de data betreft.

De volgende gegevens zijn nodig voor stap A (desaggregatie van de stromen naar bedrijven):

- Het aantal bedrijven (of de lokale eenheden van bedrijven met meerdere vestigingen) per producttype en per zone
- De omzet van deze lokale eenheden en/of het aantal werknemers van de ze bedrijven

Deze informatie is zowel nodig voor de productie zones als voor de consumptie zones. Een ander vereiste is het consumptiepatroon van de bedrijven per producttype. Er wordt aangenomen dat elk bedrijf (of lokale eenheid) goederen zal produceren in slechts één productklasse maar het kan wel goederen consumeren van meerdere productklassen.

Stap B (de logistieke beslissingen) heeft informatie nodig over de volgende elementen:

- Gegevens van individuele zendingen: sector van de verzender en ontvanger, vertrekpunt en bestemming, de waarde van de goederen, de transportmodi en het type voertuig/vaartuig, de laadeenheid (bijvoorbeeld containers), de lotgrootte en frequentie, het gebruik van terminals, consolidatie- en distributiecentra, havens en luchthavens. Dit is transportketen informatie (welke zendingen gaan direct van P naar C en welke gebruiken bovenstaande tussenstops?). Deze data zijn het meest cruciaal.
- Gegevens over de locatie van de terminals, havens, luchthavens, consolidatie- en distributiecentra.
- Gegevens over de transport- en logistieke kosten: transportkost per km, terminal kosten en opslagkosten voor alle beschikbare alternatieven.

2.4 Model van Roorda (2010)

2.4.1 Inleiding

Recent zijn een aantal hybride modellen ontwikkeld om gedragselementen van supply chain management en logistieke ketens te kunnen integreren in de publieke besluitvormingsmodellen. Deze hybride modellen geven meer inzicht wat betreft drie onderwerpen (Roorda et al., 2010).

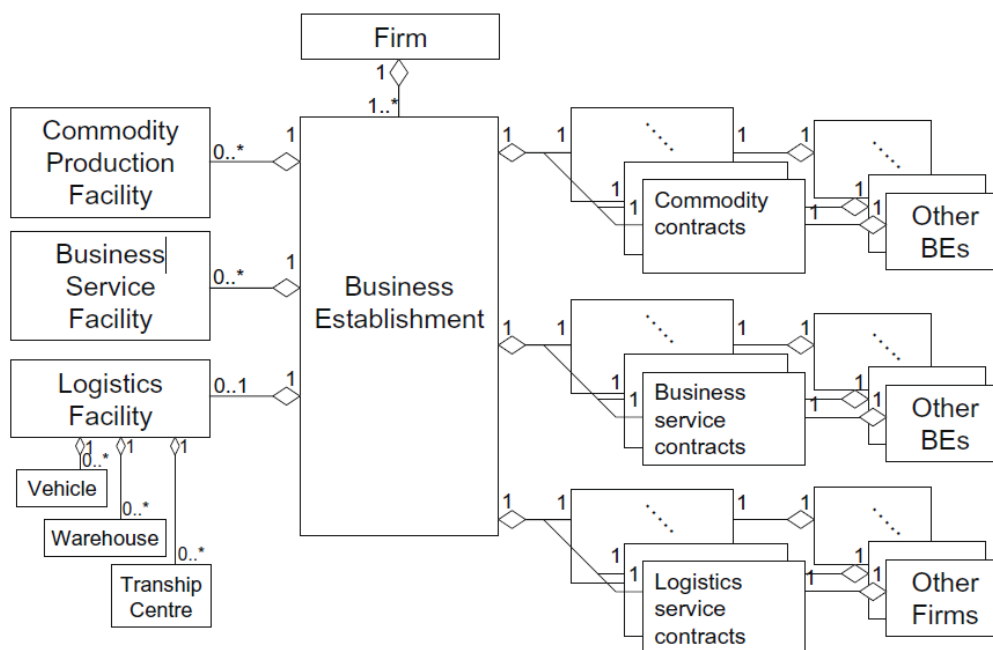
Ten eerste zijn er verschillende actoren betrokken bij de productie en distributie van goederen. Geen van deze actoren heeft volledige controle of kennis van alle beslissingen die gemaakt worden binnen de gehele supply chain. Eén enkele speler kan gespecialiseerd zijn in slechts één bepaald onderdeel van de supply chain (een kleine transporteur kan bijvoorbeeld alleen directe transportdiensten leveren). Ook kan deze speler een hele reeks van logistieke diensten leveren (bijvoorbeeld consolidatie, opslag, distributie, transport, voorraadbeheer enz.) of kan een rol spelen in zowel productie als distributie, bijvoorbeeld een productiebedrijf met een eigen transportvloot (Roorda et al., 2010).

Ten tweede zijn de interacties tussen bedrijven verschillend. Succesvolle supply chains bevatten meer lange termijn samenwerkingsverbanden tussen leveranciers, producenten, retailers, transporteurs en Third Party Logistics (3PL) providers. De prijzen en het niveau van dienstverlening is afhankelijk van de aard van de relatie die onderhouden wordt tussen deze bedrijfsvestigingen (Roorda et al., 2010).

Ten derde veranderen de bedrijfsmodellen voortdurend. Zo wordt steeds meer gestreefd naar lagere voorraden (Just In Time principe) en wordt de bedrijfsomgeving in toenemende mate gedreven door orders van de klanten (pull logistiek). De bestelgrootte wordt dan afgestemd op de wensen van de klant om zo een snelle levering te kunnen garanderen (Roorda et al., 2010).

Het begrijpen van de verschillende rollen die actoren in goederenvervoermodellen spelen, de interacties tussen deze actoren en de veranderingen hiervan in de tijd zijn van fundamenteel belang voor de ontwikkeling van meer gedragsgerichte goederenvervoermodellen (Roorda et al., 2010).

Roorda et al. (2010) presenteren een kader dat de diversiteit aan rollen en functies van bedrijfsvestigingen weergeeft, alsook hun onderlinge interacties binnen de markt. Daarnaast wordt ook het belang van contracten aangegeven en hoe deze bijdragen aan de ontwikkeling van zowel korte als lange termijn interacties tussen de bedrijfsvestigingen. Het is belangrijk op te merken dat er enkel een kader wordt voorgesteld, geen specifieke toepassing van het model. In de volgende paragraaf wordt het kader verder toegelicht (Roorda et al., 2010).



Figuur 7. Conceptuele structuur van een bedrijfsvestiging (Roorda et al., 2010)

2.4.2 Model

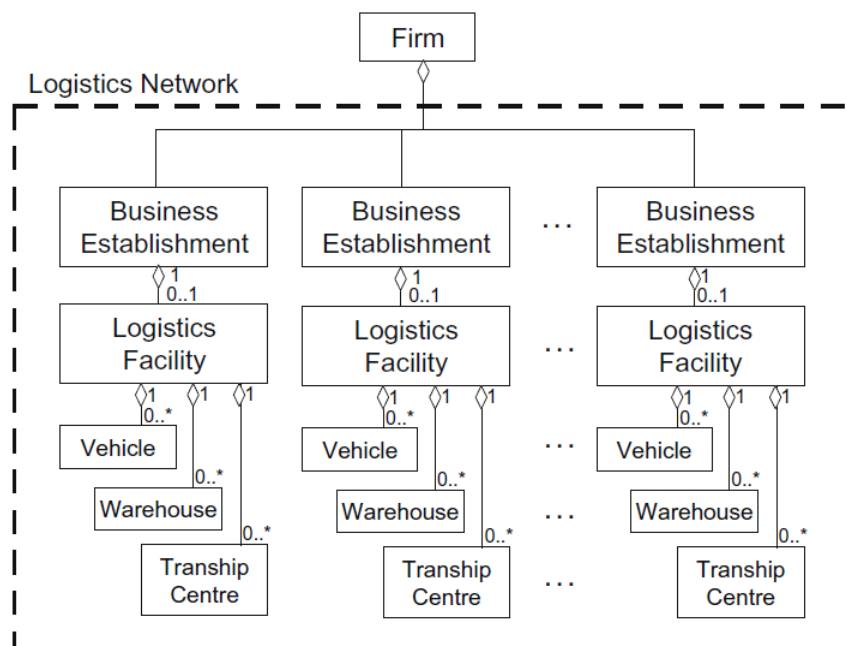
ACTOREN

In figuur 7 wordt een conceptuele structuur weergegeven waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen een bedrijfsvestiging en een bedrijf. Een vestiging is een organisatie op een specifieke locatie die logistieke en/of bedrijfsdiensten biedt, of goederen produceert, verwerkt en opslaat. Een bedrijf is een organisatie die één of meer van deze vestigingen bezit (Roorda et al., 2010).

Een *commodity production facility* is één van de interne resources van een bedrijfsvestiging. De functie van deze faciliteit is het produceren of verwerken van onafgewerkte input (grondstoffen of onvoltooide goederen) tot een (verder) afgewerkt product. Belangrijk hierbij is dat er waarde wordt

toegevoegd aan de input. Beslissingen over hoe een product het meest efficiënt geproduceerd kan worden zijn de enige beslissingen waar een commodity production facility verantwoordelijk voor is. *Business service facilities* bieden ondersteunende diensten die ervoor zorgen dat de vestiging operationeel is. Tot slot is er nog de *logistic facility*. Deze faciliteit verleent logistieke diensten, met inbegrip van transport en voorraadbeheer. Deze diensten kunnen intern gebruikt worden om eigen goederen te transporteren naar de klanten. In dit geval functioneert de logistieke faciliteit als een private transportvloot. Wanneer de logistieke diensten worden aangeboden aan andere bedrijfsvestigingen functioneert de logistieke faciliteit als een 3PL (Third Party Logistics provider). Belangrijk op te merken is dat de dienst op één enkele locatie gevestigd is (Roorda et al., 2010).

Bedrijven die gespecialiseerd zijn in het verlenen van logistieke diensten en waarvan meerdere vestigingen (op verschillende locaties) zich bezig houden met deze logistieke dienstverlening, kunnen worden geïntegreerd in een logistiek netwerk. De organisatie en de interacties binnen zo een logistiek netwerk zijn van zeer groot belang in het kader voorgesteld door Roorda et al. (2010), aangezien deze een sterke impact hebben op de logistieke kosten (door middel van schaalvoordelen) en het bewegingspatroon van de goederen (het goederenvervoer). Figuur 8 geeft de structuur van een logistiek netwerk weer. De verbindingen tussen de vestigingen binnen een logistiek bedrijf zijn hier expliciet vertegenwoordigd, terwijl in het oorspronkelijke geval elke vestiging een afzonderlijke link had met het bedrijf (Roorda et al., 2010).



Figuur 8. Conceptuele structuur van een logistiek netwerk (Roorda et al., 2010)

CONTRACTEN

Contracten worden gedefinieerd als zakelijke relaties tussen twee bedrijfsvestigingen die de uitwisseling van goederen diensten organiseren tegen een bepaalde prijs. Binnen het conceptueel kader van Roorda et al. (2010) worden drie soorten contracten voorgesteld, namelijk de goederencontracten, de dienstencontracten en de contracten voor logistieke diensten. Elk van deze contracten heeft zijn eigen specifieke bepalingen en toepassingen.

Een goederencontract vloeit voort uit de behoefte om goederen van de ene vestiging naar de andere te transfereren. In dit contract wordt een verkoper, een klant, een prijs en een lijst van leveringen geïdentificeerd. De verkoper is hier een bedrijfsvestiging die het product produceert, terwijl de klant zowel een andere bedrijfsvestiging kan zijn als een eindconsument die het product koopt. Voor elke levering worden de volgende elementen opgenomen in het contract:

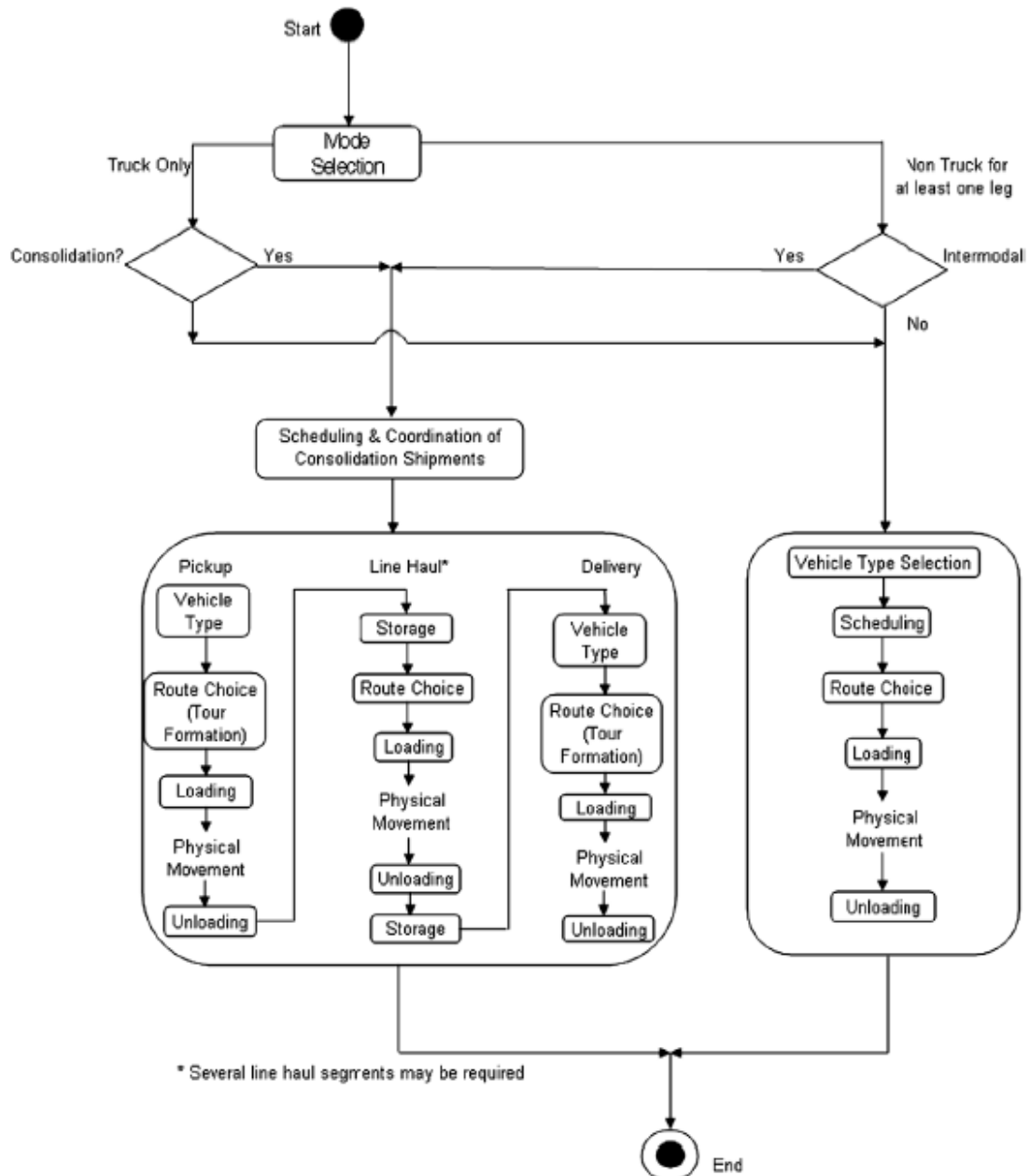
- Vertrekplaats (bestemming van de vestiging)
- Eindbestemming (andere vestiging of eindconsument)
- Datum van de levering
- Gewicht van de goederen
- Type goederen
- Prijs van de goederen
- Vestiging verantwoordelijk voor de logistieke diensten van de levering

Een dienstencontract is zeer vergelijkbaar met een goederencontract. In plaats van een lijst met leveringen, zoals in het goederencontract, definieert het contract hier verschillende diensten die worden aangeboden door de verkoper aan de klant. Er wordt van uitgegaan dat het bedrijf een eigen transportvloot bezit en onderhoudt indien er transport nodig is om deze diensten te kunnen aanbieden. Verder worden dienstverleningen in uren gemeten in plaats van gewicht en zijn de voorraad- en vervoerskosten niet relevant.

Een logistiek contract definieert welke bedrijfsvestiging verantwoordelijk is voor de organisatie van de leveringen en welke logistieke vestiging deze leveringen uitvoert. Daarnaast wordt ook een prijs en een lijst met leveringen vastgelegd in het contract. Als er geen interne logistieke faciliteit aanwezig is binnen de vestiging of als deze interne logistieke faciliteit de leveringen niet op de meest kosteffectieve manier kan leveren, dan zijn externe logistieke contracten een noodzaak.

LOGISTIEKE BESLISSINGEN

Nadat het logistieke contract is opgesteld, moeten operationele beslissingen genomen worden over hoe de leveringen zullen worden uitgevoerd. Deze logistieke beslissingen, die nodig zijn om de logistieke contracten uit te voeren, worden weergegeven in figuur 9. De opeenvolging van de verschillende stappen is gebaseerd op een literatuurstudie van McCabe et al. (2006, in Roorda et al., 2010). Er dient echter wel opgemerkt te worden dat de opeenvolging van stappen verschillend is afhankelijk van de situatie.



Figuur 9. Logistieke beslissingen (Roorda et al., 2010)

Het proces begint met de selectie van de *transportmodus*. Hier kan gekozen worden voor unimodaal transport (weg-, spoor-, lucht- of binnenvaartransport) of voor intermodaal transport (een combinatie van twee of meer transportmodi). Deze keuze van transportmodus is natuurlijk afhankelijk van de middelen die de logistieke faciliteit ter beschikking heeft (Roorda et al., 2010).

Een volgende beslissing is het al dan niet gebruik maken van *consolidatie*. Dit wil zeggen dat verschillende leveringen, die naar eenzelfde bestemming moeten, samengebundeld worden. Zo kunnen er grotere en meer voordelige voertuigen gebruikt worden en zullen er minder ritten met lege voertuigen plaatsvinden. Op die manier kunnen schaalvoordelen en een hogere ladingsgraad

verkregen worden, en bijgevolg is het transport veel efficiënter. Maar om van deze schaalvoordelen te kunnen genieten is het wel noodzakelijk dat geschikte consolidatie- en distributiecentra aanwezig zijn (Roorda et al., 2010).

Wanneer besloten wordt om geen gebruik te maken van consolidatie, wordt gekozen welk type voertuig het transport zal uitvoeren. Deze keuze is afhankelijk van de kenmerken van de levering (prijs, gewicht, type enz.), het verkeersreglement, de beschikbaarheid van voertuigen, beschikbaarheid van chauffeurs, kosten en speciale vereisten voor een levering (bijvoorbeeld koelwagens of speciale voertuigen om gevaarlijke stoffen veilig te transporteren) (Roorda et al., 2010).

Planning van de voertuigen is een volgende stap. Hier moet rekening gehouden met de beschikbaarheid van de chauffeurs, de laad- en lostijden, eventuele andere haltes of leveringen die gedaan moeten worden door dat voertuig en bepaalde netwerkkarakteristieken zoals reistijd, tolheffingen en congestie (files). Ook de keuze van de route is afhankelijk van deze netwerkkarakteristieken. Zo mag het transport van gevaarlijke goederen bijvoorbeeld enkel via bepaalde routes gaan om risico's te voorkomen. Verder zal het bedrijf kiezen voor die routes die de reistijd en de kosten minimaliseren (Roorda et al., 2010).

Na de planning volgt het laden van de voertuigen waarna het eigenlijke transport plaatsvindt. Op de locatie van de ontvanger worden de goederen dan gelost. Zowel het *laden* als het *lossen* van de goederen heeft een directe impact op de planning van de voertuigen omdat deze handelingen tijdrovend en onvoorspelbaar kunnen zijn (Roorda et al., 2010).

Wanneer gekozen wordt om toch gebruik te maken van consolidatie, dan is extra planning en coördinatie vereist. Dit is nodig omdat juist dezelfde stappen als bij de niet-consolidatie doorlopen worden maar deze worden nu meer dan één keer herhaald. Verder moet ook rekening gehouden worden met het tussentijds laden, lossen, opslaan en behandelen van goederen. Ook is de kans groot dat de verschillende leveringen gecoördineerd worden als onderdeel van een tour (zie 'tour formation' in het flow diagram) (Roorda et al., 2010).

2.5 Belang van data

Zoals eerder aangehaald in de inleiding van deze masterproef, is er een tekort aan data voor gedesaggregeerde goederenvervoermodellen. Deze data, die de input van het model zijn, moeten ervoor zorgen dat besluitvormers de resultaten van hun beslissingen juist kunnen interpreteren. Daarnaast kan aan de hand van deze gegevens een sensitiviteitsanalyse worden opgesteld om de verschillende beslissingen te kunnen evalueren en met elkaar te vergelijken.

2.5.1 Niveau van aggregatie

Bij de ontwikkeling van een model wordt eerst de mate van aggregatie bepaald voor de data die gebruikt zal worden. Er moet echter rekening gehouden worden met het feit dat verschillende soorten data leiden tot verschillende empirische resultaten of output van de modellen. Algemeen kan gedesaggregeerde data voorgesteld worden door een verzameling van individuele observaties (afzonderlijke bedrijven), elk gewaardeerd op een bepaald aantal variabelen. Geaggregeerde data bestaan uit sommen (of volumes) van individuele stromen die op hun beurt gekenmerkt worden door bepaalde variabelen. Ze hebben dus betrekking op een volledige zone/regio (De Maeyer & Pauwels, 2003).

GEDESAGGREGEERDE DATA

In goederenvervoermodellen is de gedesaggregeerde data beperkt tot informatie over individuele zendingen. Modellen gebaseerd op gedesaggregeerde gegevens zijn meer gedragsgericht en voldoen aan de behoefte om beleidsmaatregelen of bepaalde plannen te evalueren. Deze modellen bieden heel gemakkelijk de mogelijkheid om extra variabelen toe te voegen zoals levertijd, betrouwbaarheid en frequentie van de dienst.

Het hoge niveau van detail, dat gedesaggregeerde data kenmerkt, leidt tot een toenemende mate van nauwkeurigheid. Het nadeel is dan wel dat de kosten voor de gegevensverzameling en -analyse aanzienlijk hoger zijn. Bovendien wijst Meersman (1998) erop dat gedesaggregeerde data meestal van vertrouwelijke aard is en dus moeilijk te verkrijgen.

Wanneer gedesaggregeerde data gebruikt wordt om een model te ontwikkelen, richt het onderzoek zich op het bedrijfsniveau. Er moet een modus gekozen worden uit verschillende alternatieven (discrete keuze). De uitkomst van deze modellen probeert dan een schatting te geven van de moduskeuze (De Maeyer & Pauwels, 2003).

GEAGGREGEERDE DATA

Geaggregeerde data in goederenvervoermodellen bestaat uit goederenstromen op regionaal of nationaal niveau. In plaats van absolute waarden te gebruiken, zoals bij gedesaggregeerde data, bestaat geaggregeerde data eerder uit gemiddelde waarden. Als gevolg blijven bedrijfspecifieke elementen verborgen en kan dus een zekere misleiding optreden. Dit is het grootste nadeel van geaggregeerde data. Er wordt daarom algemeen aangenomen dat schattingen van belangrijke effecten uit modellen die gebaseerd zijn op gedesaggregeerde data meer betrouwbaar zijn.

Het gebruik van geaggregeerde data is meer geschikt in geval van studies betreffende politieke besluitvorming en beleidsondersteunende voorspellingen. Het doel voor goederenvervoermodellen op geaggregeerd niveau kan bijvoorbeeld zijn de totale hoeveelheid goederen toe te wijzen aan de verschillende transportmodi (De Maeyer & Pauwels, 2003).

De onderzoeker moet uiteindelijk de meest geschikte methode kiezen (Ortúzar & Willumsen, 1995). Deze keuze hangt af van het doel van de studie, de beschikbaarheid van de data en de kosten die nodig zijn om de gegevens te verzamelen. Het is belangrijk om op te merken dat de keuze van de onderzoeker niet beperkt is tot het gebruik van slechts één methode (ofwel geaggregeerd ofwel gedesaggregeerd). Het niveau van aggregatie kan doorheen het onderzoek verschillen (De Maeyer & Pauwels, 2003).

2.5.2 Dataverzameling

Transportonderzoeken zijn één van de meest belangrijke manieren om de kritische informatie die nodig is voor transportplanning en het nemen van logistieke beslissingen te verzamelen. Besluitvormers moeten hierbij rekening houden met de steeds veranderende omgeving zoals de stijgende aandacht voor luchtkwaliteit en broeikasgassen, congestie en de privatisering van wegen en transportsystemen (consolidatie- en distributiecentra, terminals, et cetera) (Griffiths et al., 2000).

Een veel voorkomend probleem bij data verzameling voor goederenvervoermodellen is de beperkte steekproefgrootte, aangezien het zeer duur is om onderzoek op grote schaal uit te voeren. Daarnaast is het ook heel moeilijk om gegevens uit een uitgebreide dataset te desaggregeren omdat er rekening gehouden worden met de heterogeniteit van de verschillende actoren die een rol spelen. Bovendien is het type data dat verzameld wordt vaak niet gedetailleerd genoeg om een degelijk en betrouwbaar onderzoek te kunnen uitvoeren (Griffiths et al., 2000).

Aanvankelijk werden er kwaliteitsvolle gegevens verkregen door het afnemen van face-to-face interviews met de verschillende agenten. Door recente ontwikkelingen, zoals onder andere globalisatie, werd deze onderzoeksmethode echter ontzettend duur en werd er steeds meer overgeschakeld op grote vragenlijsten voor het verzamelen van gegevens (Griffiths et al., 2000).

Het meest voorkomende probleem bij transportonderzoek aan de hand van vragenlijsten is de lage respons, wat een enorme impact heeft op de kwaliteit van de gegevens. Oplossingen hiervoor zijn bijvoorbeeld herinneringsbrieven, geldbeloningen en kosteloze inzendingen (Griffiths et al., 2000). De belangrijkste problemen binnen dataverzameling voor goederenvervoermodellen zijn dus vooral het tekort aan nauwkeurige, betrouwbare en actuele gegevens en het feit dat deze data heel kostelijk en moeilijk te verkrijgen zijn. Om deze redenen zijn continue verbeteringen in de verschillende methoden voor dataverzameling dus noodzakelijk.

Griffiths et al. (2000) geven enkele suggesties om transportonderzoeken te verbeteren in de toekomst. Een eerste voorstel is het combineren van interviews en vragenlijsten. Zo kunnen respondenten zelf kiezen wanneer, waar en hoe het interview afgenomen kan worden. Hierdoor zal ook het responsieniveau stijgen. Vervolgens kan meer uitgebreide data verzameld worden aan de hand van vragenlijsten.

Een ander voorstel is gebruik maken van automatische monitortechnologieën zoals Global Positioning Systems (GPS). Wanneer deze gelinkt worden aan een geografisch informatiesysteem, kunnen zeer nauwkeurige en volledige gegevens verzameld worden. De start- en stoppunten worden echter geregistreerd en de route wordt heel gedetailleerd weergegeven. Ook kan er een GPS geïnstalleerd worden in de mobiele telefoon van respondenten zodat hun bewegingen vastgelegd kunnen worden zonder dat ze er zelf moeite voor moeten doen. Wanneer goederen of respondenten zulke tags bevatten, kan dit bijvoorbeeld informatie opleveren over lege ritten (Kochan et al. 2006).

2.5.3 Sensitiviteitsanalyse

Een sensitiviteitsanalyse is nuttig bij het ontwikkelen van een model om te bepalen hoe veranderingen in de inputparameters van het model de output of resultaten beïnvloeden. Er zijn altijd meerdere bronnen van onzekerheid aanwezig. De meeste inputparameters worden geassocieerd met een bepaalde errorterm. Ook is het vaak onmogelijk om alle parameters, die het systeem daadwerkelijk beïnvloeden, op te nemen in het model. Een sensitiviteitsanalyse onderzoekt dus hoe onzekerheden zich verspreiden doorheen het model. Zo kan er bepaald worden waar juist toezicht gehouden moet worden op de output en hoeveel gegevens verzameld moeten worden (Hier-Majumder et al., 2006).

Vaak wordt er een kostenfunctie gekozen om een representatief beeld te geven van de toestand van het model. Er wordt dus berekend hoe de kosten veranderen wanneer de waarde van een bepaalde inputparameter gewijzigd wordt. In het geval van goederenvervoermodellen waarbij een keuze betreffende de transportmodus gemaakt moet worden, zal de totale logistieke kostenfunctie (TLC) gebruikt worden.

De meest eenvoudige methode die gebruikt wordt om de gevoeligheid van een model te bepalen is de 'brute force' methode. Hierbij wordt eerst een bepaalde inputparameter gewijzigd. Vervolgens wordt het model herberekend met deze wijziging en tot slot wordt er vergeleken hoe de output veranderd is. Deze methode vereist wel dat het model telkens volledig herberekend wordt om de gevoeligheid van elke individuele parameter te testen (Hier-Majumder et al., 2006).

Wanneer bijvoorbeeld binnenvaart gekozen werd als transportmodus, kan de grootte van een schip nog steeds variëren. De inputparameter die dan verandert is de hoeveelheid goederen die getransporteerd kunnen worden. Dit zal te zien zijn in de totale logistieke kostenfunctie en zo kan de goedkoopste optie gekozen worden. Wanneer bijvoorbeeld gekozen wordt voor een groot schip met grote hoeveelheden, kan de transportkost verspreid worden over meerdere eenheden. Ook zal er minder frequent geleverd moeten worden. Maar langs de andere kant zullen de voorraadkosten hoger zijn voor grote hoeveelheden. Voor kleine schepen geldt juist het omgekeerde. Een sensitiviteitsanalyse kan dus helpen om de verschillende alternatieven tegen elkaar af te wegen en zo de goedkoopste optie te kiezen.

3. Logistieke module in goederenvervoermodellen

In de huidige economie met belangrijke trends zoals globalisatie is goederentransport onmisbaar geworden. Dit maakt dat de keuze van een geschikte transportmodus zeer belangrijk is. Het probleem dat zich hier echter bij stelt, is dat de meeste bestaande goederenvervoermodellen zich enkel baseren op directe transportkosten en geen rekening houden met de integratie van logistieke aspecten (Vannieuwenhuysse & Misschaert, 2006). Voorbeelden hiervan zijn beslissingen betreffende het voorraadbeleid, de frequentie en de grootte van de bestelling, bestelkosten, consolidatiemogelijkheden, et cetera.

De integratie van deze logistieke elementen gebeurt aan de hand van het "totale logistieke kosten" principe, waarbij naast de directe transportkosten ook rekening wordt gehouden met indirecte logistieke kosten. Wanneer verschillende transportmodi worden vergeleken, moet er gekeken worden naar alle kosten in de waardeketen die beïnvloed worden door de keuze van de transportmodus (Vernimmen & Witlox, 2003).

Het ADA-model van Ben-Akiva en De Jong (2008) maakt gebruik van dit "totale logistieke kosten" principe. Aan de hand van de desaggregatie stap in de logistieke module van het model, worden de volgende logistieke beslissingen opgenomen:

- Frequentie en grootte van de levering
- Ladingseenheid: het al dan niet gebruik maken van containers
- Transportroute: dit houdt in het al dan niet gebruik maken van consolidatie- en distributiecentra, goederenterminals, havens en/of luchthavens alsook het aantal vertakkingen in een transportketen (direct transport of werken met tussenstops)
- Transportmodus per transportketen

Zoals eerder aangehaald heeft de keuze van een bepaalde transportmodus een significante invloed op alle andere logistieke componenten. De verschillende transportmodi zullen hieronder dan ook nader worden toegelicht. Ook wordt er verder in dit hoofdstuk gekeken naar de verschillende kostencomponenten die in de totale logistieke kostenfunctie worden opgenomen.

3.1 Types transportmodi

De meest voorkomende transportmodi om goederen te vervoeren zijn wegtransport, spoor, zee- en binnenvaart, luchttransport en pijpleidingen.

3.1.1 Wegtransport

Het wegtransport wordt gekenmerkt door snel en betrouwbaar transport. Voornamelijk in het geval van korte afstanden is deze transportmodus vaak zeer flexibel en goedkoop. Dit komt mede door de 'deur-tot-deur' service waarbij laden en lossen niet vereist is tussen de herkomstlocatie en bestemming. De lading kan op de vrachtwagen blijven staan zonder overslag (Berghmans, 2006).

Dankzij de lage initiële investering die nodig is, betreft het wegverkeer een groot aantal kleine bedrijven. Verder is er ook sprake van een grote toegankelijkheid omwille van het dichte wegennetwerk.

Het transport via de weg kent echter ook enkele nadelen. Door de toenemende congestieproblematiek treden er veel vertragingen op die de leveringsbetrouwbaarheid en -snelheid niet ten goede komen. Verder heeft het wegverkeer een grotere negatieve impact op het milieu dan andere transportmodi. Hoewel de initiële investeringskost relatief laag is, brengt deze transportmodus een hoge variabele kost (arbeids-, brandstof- en belastingkosten) met zich mee. Hierdoor loopt de kost per eenheid hoog op.

3.1.2 Spoor

Het spoor wordt gekenmerkt door een lagere dichtheid en aansluiting op terminals. Transport via het spoor geraakt zelden rechtstreeks tot op de eindbestemming, waardoor overslag en natransport (of voortransport om aan het spoor te geraken) noodzakelijk zijn. De goederen worden dan bijvoorbeeld overgeladen op een vrachtwagen die wel tot op de eindbestemming geraakt (= intermodaal transport)

Transport via het spoor is voornamelijk geschikt voor het vervoeren van laagwaardige goederen (hout, papier, et cetera) en grondstoffen (kolen, zand, et cetera) omwille van de grote hoeveelheden en lange afstanden die bereikt kunnen worden. Hierdoor is de kost per eenheid relatief laag. De initiële investeringskost van het spoorverkeer is echter erg hoog (sporen, signalisatie, et cetera), in tegenstelling tot het wegverkeer (Berghmans, 2006). Dit maakt dat het spoorverkeer vaak in handen is van een klein aantal grote bedrijven.

Wat snelheid betreft zijn spoor- en wegtransport aan elkaar gewaagd, voornamelijk vanaf middellange afstanden.

3.1.3 Zee- en binnenvaart

Zee- en binnenvaart zijn, net zoals bij het spoor, moeilijker toegankelijk en de kade zal zelden de eindbestemming van de levering zijn. Ook hier zijn overslag en voor- en/of natransport dus noodzakelijk (= intermodaal transport).

Deze transportmodus wordt gebruikt om grote volumes van goederen met een lage waarde over lange afstanden te vervoeren. Hoewel de initiële investeringskosten voor zee- en binnenvaart erg hoog zijn, kunnen deze verspreid worden omwille van de lange levensduur van schepen. Verder kunnen er door het grote laadvermogen schaalvoordelen behaald worden. De kosten per eenheid voor zee- en binnenvaart zijn dus zeer laag (Berghmans, 2006).

De grootste beperking van vervoer via binnenvaart is het binnenlands waterwegennetwerk. Schepen moeten vaak wachten aan sluizen of bruggen wat zorgt voor een lage transportsnelheid. Verder is de vaarroute afhankelijk van het type schip dat gekozen wordt. Sommige vaarroutes zijn niet mogelijk voor bepaalde schepen omwille van hun afmetingen en diepgang.

3.1.4 Luchttransport

Transport via de lucht is erg duur omwille van de hoge initiële investering en de hoge variabele kosten. Luchttransport komt daarom enkel in aanmerking voor het vervoeren van goederen met een hoge waarde waarbij de snelheid van leveren essentieel is, zoals onder andere bederfelijke goederen (Berghmans, 2006).

Een groot voordeel van luchttransport is dat de goederen minder snel verloren of beschadigd geraken, waardoor er ook minder beschermende verpakking vereist is. Dit zorgt voor lagere kosten met betrekking tot verlies en schade (Ballou, 1999).

Een nadeel van deze transportmodus is echter de betrouwbaarheid van de leveringen. De variabiliteit in levertermijnen ligt hoger dan bij andere transportmodi omwille van mechanische defecten, congestie en weersomstandigheden.

3.1.5 Pijpleiding

Pijpleidingen worden gebruikt voor een zeer beperkt aantal producten, zoals ruwe olie, aardolie of gezuiverde petroleumproducten. Hoewel de initiële vaste kost erg hoog is, zijn de variabele kosten zeer laag (Berghmans, 2006).

Het vervoeren van producten via pijpleidingen gaat zeer traag (ongeveer 5 tot 6 km/u), maar hier staat tegenover dat de producten wel 24 uur op 24 en 7 dagen op 7 getransporteerd kunnen

worden (Ballou, 1999). Verder moet er bij deze transportmodus geen rekening gehouden worden met vertragingen en de kans op schade is zeer klein omwille van de ondergrondse structuur.

3.1.6 Vergelijking verschillende transportmodi

Tabel 1 geeft de sterktes, zwaktes, kansen en bedreigingen van de verschillende transportmodi weer.

Tabel 1. SWOT-analyse van verschillende transportmodi (Vannieuwenhuysse, 2003, in Berghmans, 2006)

	Weg	Spoor	Binnenvaart	Luchtvaart	Pijpleiding
Sterktes	Flexibiliteit Bereikbaarheid	Bestaand netwerk	Lage operationele kost	Snelheid	Milieu- vriendelijk
Zwaktes	Congestie	Gebrek aan flexibiliteit	Traagheid	Duur	Beperkte toepassingen
Kansen	Nieuwe logistieke evoluties	Liberalisatie	Politieke prioriteit	Liberalisatie	Nieuwe goederenniches
Bedreigingen	Extra regelgeving	Bedrijfs- cultuur	Beperkt netwerk	Congestie	Terrorisme

Onderstaande tabel bevat de kenmerken van de verschillende transportmodi betreffende kosten, betrouwbaarheid, flexibiliteit en frequentie (Tabel 2).

Tabel 2. Vergelijking kenmerken transportmodi (Vannieuwenhuysse, 2006, in Ribus 2007)

	Weg	Spoor	Binnenvaart	Luchtvaart	Pijpleiding
Kosten	Slecht	Goed	Zeer goed	Zeer slecht	goed
Betrouwbaarheid	Matig	Matig	Goed	Matig	Zeer goed
Flexibiliteit	Zeer goed	Slecht	Matig	Matig	Zeer slecht
Frequentie	Zeer goed	Goed	Goed	Matig	Zeer goed

3.2 Totale logistieke kost

De totale logistieke kosten zijn alle kosten in een waardeketen die beïnvloed worden door de keuze van de transportmodus (Vernimmen & Witlox, 2003).

Volgens het inventory-theoretic model van Baumol en Vinod (1970, in Vernimmen & Witlox, 2003) worden de totale logistieke kosten weergegeven in onderstaande formule:

$$TLC = r \cdot T + u \cdot t \cdot T + \frac{a}{s} + \frac{w \cdot s \cdot T}{2} + w \cdot k \sqrt{(s + t) \cdot T}$$

met

- TLC = totale logistieke kost van een transportmodus (jaarlijks);
- r = transportkost per eenheid;
- T = totale hoeveel getransporteerd per jaar (in eenheden);
- u = voorraadkost van goederen in-transit (per jaar);
- t = lead time (in jaren);
- a = bestelkost;
- s = gemiddelde tijd tussen verzendingen (in jaren);
- w = voorraadkost (per eenheid per jaar);
- K = een constante, afhankelijk van de kans dat er zich geen stock-outs zullen voordoen tijdens de lead time.

Deze formule veronderstelt dat de transportkost per eenheid (r) constant is. De transportkosten ($r \cdot T$) variëren dus niet met het verzendingsvolume of met de afstand. In realiteit ontstaan er schaalvoordelen wanneer het verzendingsvolume stijgt, waardoor de transportkost per eenheid daalt. Wanneer enkel transportkosten zouden opgenomen worden, verkrijgen trage transportmodi met een grote capaciteit (zoals binnenvaart) de voorkeur.

Zoals eerder vermeld moeten zijn er ook andere logistieke kosten die beïnvloed worden door de keuze van de transportmodus. Een goed voorbeeld van deze zogenaamde *niet-transport* logistieke kosten zijn de voorraadkosten. De totale voorraadkosten bestaan uit vier elementen, namelijk de bestelkosten, de voorraadkosten van goederen in-transit, de voorraadkosten en de kosten van een veiligheidsvoorraad.

De bestelkosten (a/s) kunnen gereduceerd worden door de frequentie of het aantal bestellingen (jaarlijks) te verlagen, waardoor de goederen in grote hoeveelheden getransporteerd zullen worden. Vandaag de dag spelen bestelkosten maar een kleine rol in de totale logistieke kosten, omwille van de grootschalige automatisering binnen de logistiek. Een andere manier om bestelkosten te reduceren is het groeperen van meerdere bestellingen in één levering (consolidatie). Hierdoor is de totale bestelkost lager dan de som van de afzonderlijke bestelkosten. Het toepassen van consolidatie heeft echter niet enkel effect op de bestelkosten maar ook op de transportkosten en andere voorraadkosten.

De voorraadkosten van goederen in-transit ($u \cdot t \cdot T$) geven de voorkeur aan het gebruik van snelle transportmodi (zoals weg- en luchttransport).

De voorraadkosten ($\frac{w \cdot s \cdot T}{2}$) zijn de kosten voor de goederen die worden opgeslagen in een magazijn en daar verblijven to ze verzonden worden. Deze kosten moedigen het gebruik van transportmodi met een kleine capaciteit aan. In dat geval zal de gemiddelde tijd tussen verzendingen (s) dalen, waardoor ook de voorraadkosten dalen.

Een veiligheidsvoorraad wordt aangelegd ter bescherming van vertragingen in leveringen of veranderingen in koopgedrag van consumenten. Hierdoor worden stock-outs vermeden. Hoe kleiner de lead time (t) en de gemiddelde tijd tussen verzendingen (s), ceteris paribus, hoe kleiner de veiligheidsvoorraad en dus hoe lager de kosten van een veiligheidsvoorraad ($w \cdot k \cdot \sqrt{(s+t) \cdot T}$) (Vernimmen & Witlox, 2003).

Voorraadkosten zijn sterk gelinkt aan transportbeslissingen. Een goede afweging tussen voorraadkosten en transportkosten is zeer belangrijk. Wanneer transportkosten geminimaliseerd worden door het gebruik van trage transportmodi met een grote capaciteit, zal dit eveneens leiden tot een stijging in zowel de voorraadkosten van goederen in-transit als de voorraadkosten op de bestemming (Blauwens et al., 2008).

Het inventory-theoretic model kijkt voornamelijk naar de afweging tussen transport- en voorraadkosten. Volgens Blauwens et al. (2008) zijn er echter nog andere kosten waar rekening mee gehouden moet worden om tot het "totale logistieke kosten" principe te komen.

Zo kunnen transportbeslissingen eveneens een invloed hebben op de overslagkosten, zoals het in- en uitladen van een transportmodus of de nodige overslag. Deze kosten zullen voornamelijk aanwezig zijn wanneer er gebruik wordt gemaakt van intermodaal transport.

Beslissingen betreffende de transportmodus kunnen verder ook een invloed op de verpakingskosten hebben. Bulktransport vereist minder dure verpakking in vergelijking met kleine leveringen. Ook de keuze tussen weg-, spoor-, water- en luchttransport kan verschillende verpakkingseisen met zich meebrengen.

4. Praktijkgedeelte

4.1 Situering

Het praktijkgedeelte van deze masterproef zal zich concentreren op de factoren die een belangrijke rol spelen bij de keuze van een transportmodus. Er wordt uitgegaan van een goederenvervoermodel dat toegepast wordt op Vlaanderen. Dit goederenvervoermodel focust zich op vier bouwstenen, namelijk productie/attractie, distributie, logistieke transportbeslissingen en de toewijzing aan een netwerk. Deze vier bouwstenen zijn gebaseerd op het traditionele vierstapsmodel dat reeds besproken werd in de literatuurstudie.

Het doel van deze praktijkstudie is te onderzoeken hoe de keuze wat betreft de transportmodus verandert naarmate de waarde van één inputparameter in de totale logistieke kostenfunctie, *ceteris paribus*, gewijzigd wordt. Dit wordt gedaan aan de hand van een sensitiviteitsanalyse. Hierbij wordt een factorieel design opgesteld met twee factoren, namelijk de afstand tussen de gemeenten en de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q . Er worden dus meer bepaald wijzigingen aangebracht in de totale logistieke kostenfunctie om te zien wat de invloed hiervan is op de optimale transportkeuze. Op deze manier kan aangetoond worden dat de beschikbaarheid en nauwkeurigheid van de nodige logistieke data zeer belangrijk is om beslissingen juist te kunnen modelleren.

Deze logistieke beslissingen werden gemodelleerd op basis van de logistieke module in het Aggregate-Disaggregate-Aggregate (ADA) model van Ben-Akiva en De Jong (2008). Deze module beschouwt de beslissingen betreffende de keuze van de transportmodus op bedrijfsniveau (gedesaggregeerd niveau). Op die manier kunnen de verschillende actoren en hun beslissingen individueel worden opgenomen.

4.2 Inleiding

De data die gebruikt wordt in deze masterproef heeft betrekking op Vlaanderen. Vlaanderen bevat 308 gemeenten die beschouwd werden als zones. Uit deze 308 gemeenten werden tien gemeenten geselecteerd om teveel rekenwerk te vermijden.

Van alle mogelijke relaties tussen twee zones, tussen de verzenders en de ontvangers van een bepaald goed, werden 934 links gerealiseerd. Er werd dus gekeken hoeveel verzenders en ontvangers (bedrijven) van een bepaald goed er waren in de tien verschillende zones (gemeenten). Vervolgens werd dan gekeken welke relaties (links) er waren tussen deze individuele bedrijven van een verschillende zone. Om deze links te bepalen werd gebruik gemaakt van de verschillende stappen in het Aggregate-Disaggregate-Aggregate model van Ben-Akiva en De Jong (2008). Deze

'bedrijf-naar-bedrijf' relaties (firm-to-firm, F2F) werden berekend aan de hand van volgende formule (Maes et al., 2011):

$$\text{F2F relaties} = F_k \cdot P_k \cdot C_k \quad \text{met } F_k = \frac{N_k}{\sum_s C_k}$$

waarbij:

- F_k = de fractie van de gerealiseerde links tussen verzender en ontvanger van twee zones.
- P_k = het aantal producenten van product k in zone r.
- C_k = het aantal consumenten van product k in zone s.
- N_k = het aantal ontvangers per verzender voor het product k.

Vervolgens werden de 934 gerealiseerde links met behulp van random selectie proportioneel herleid tot 53 links.

De productie-consumptiestromen tussen de verschillende zones hebben betrekking op de goederencategorie NSTR 1. NSTR² is een veel gebruikte classificatie van goederen in Europa. De goederencategorie NSTR 1 betreft voedingsproducten en veevoeder (behalve landbouwproducten). Deze PC-stromen werden geconverteerd naar gedesaggregeerde 'bedrijf-naar-bedrijf' stromen. Voor elk gemeentepaar werden dan willekeurig een aantal 'bedrijf-naar-bedrijf' stromen berekend waarvan er dan slechts enkele beschouwd worden. Zo bleken er bijvoorbeeld 22 links te bestaan tussen Antwerpen en Mechelen, waarvan er, ter vereenvoudiging, slechts twee beschouwd werden.

Om het praktijkgedeelte te kunnen starten, wordt nog eens een selectie van acht links gemaakt uit de 53 reeds gegenereerde links. Dit wordt gedaan op basis van een factorieel design, dat in paragraaf 4.3 nader wordt uitgelegd. Op deze acht links zal dan een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd worden. Deze sensitiviteitsanalyse staat beschreven in paragraaf 4.6.

4.3 Factorieel design

Een factorieel design is een onderzoeksconstruct dat wordt gebruikt om het effect van twee of meer onafhankelijke variabelen (factoren) te meten op een responsvariabele. Er wordt dus een onderzoek opgezet met twee of meer factoren, die elk verschillende niveaus kunnen aannemen. Voor de meeste factorexperimenten kan elke factor slechts twee niveaus aannemen. Zo heeft een design met twee factoren, die elk twee niveaus kunnen aannemen, vier (= 2x2) verschillende combinaties die onderzocht kunnen worden. Dit wordt dan een 2² factorieel design genoemd. Een 2³ factorieel design wil dus zeggen dat er gekeken wordt naar drie factoren die elk twee niveaus kunnen aannemen en in dit geval zijn er dus acht (= 2x2x2) verschillende combinaties die onderzocht kunnen worden (Law, 2007).

De gegevens die gebruikt worden in deze praktijkstudie worden voorgesteld als een 2² factorieel design. Dit wil zeggen dat er gekeken wordt naar twee factoren die elk twee verschillende niveaus

² Nomenclature uniforme des marchandises pour les Statistiques de Transport, Révisée

kunnen aannemen. In deze praktijkstudie wordt de afstand tussen twee gemeenten als de eerste factor beschouwd en de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q als de tweede factor. Deze twee factoren kunnen dan elk een hoog en een laag niveau aannemen. Er worden op die manier vier ($=2^2$) verschillende combinaties verkregen, namelijk hoog-hoog, hoog-laag, laag-hoog en laag-laag. Per combinatie worden er twee verschillende links bekeken waardoor er in totaal acht links geanalyseerd zullen worden. Er worden dus twee links gekozen waarbij zowel de afstand tussen twee gemeenten als de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q hoog zijn. Verder worden er twee links geselecteerd waarbij de afstand tussen twee gemeenten hoog is en de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q laag. Vervolgens worden twee links gekozen waarbij de afstand tussen twee gemeenten laag is en de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q hoog. Tot slot worden er nog twee links geselecteerd waarbij zowel de afstand tussen twee gemeenten als de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q laag zijn.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van deze acht links waarbij HH1 staat voor link 1 met *hoge* afstand (H) en *hoge* jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q (H) (analoog voor andere notaties).

Tabel 3. Overzicht gebruikte links

Notatie	Link	Afstand (in km)	Jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' stroom Q (in ton)
HH1	Kortrijk - Antwerpen	105,68	2530,1610
HH2	Kortrijk - Genk	171,43	2898,6650
HL1	Antwerpen - Brugge_1	98,39	235,4746
HL2	Brugge - Antwerpen_2	98,44	316,3042
LH1	Gent - Aalst	32,16	1648,9679
LH2	Gent - Brugge_1	46,39	1433,0268
LL1	Mechelen - Antwerpen_2	29,74	367,3137
LL2	Mechelen - Zaventem	21,45	403,8261

Door gebruik te maken van dit factorieel design kan onderzocht worden of de afstand tussen twee gemeenten en de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom (Q) een invloed hebben op de resultaten van de sensitiviteitsanalyse. Er kan dus gekeken worden naar wat het effect is van een bepaalde combinatie (HH, HL, LH of LL) op de uiteindelijke keuze van de transportmodus. Er kan worden nagegaan of er een duidelijk verschil is tussen deze vier segmenten wat betreft de keuze van de transportmodus. Welke transportmodi worden bijvoorbeeld het meest als optimaal aangeduid en bij welk segment.

4.4 Transportmogelijkheden

Binnen deze praktijkstudie worden slechts vier verschillende transportmodi gedefinieerd, namelijk wegtransport klein, wegtransport groot, spoor en binnenvaart. De transportmodi luchtverkeer en

pijpleiding worden buiten beschouwing gelaten, aangezien de afstand tussen de verschillende gemeenten niet groot genoeg is om luchttransport te gebruiken en de goederencategorie NSTR 1 zich niet leent tot het transport via pijpleiding. Zoals hierboven vermeld wordt er een onderscheid gemaakt wat betreft het wegtransport. Dit wordt gedaan omdat kleine vrachtwagens een kleinere laadcapaciteit hebben en sneller zijn dan de traditionele grote vrachtwagens.

Enkel het transport via de weg is direct. Het transport via spoor en binnenvaart gebeurt in combinatie met wegtransport klein of wegtransport groot waardoor er overslag zal plaatsvinden. Hier zullen er soms dan ook meerdere routes per transportketen mogelijk zijn. Enkele gegevens betreffende deze vier transportmodi zijn terug te vinden in onderstaande tabel.

Tabel 4. Gegevens transportmodi

Transportmodus	Capaciteit (in ton)	Transportkost (in €/km)	Laad- en loskosten (in €/ton)	Frequentie (per week)
Wegtransport klein	1,5	0,5	1	50
Wegtransport groot	27	1	2	10
Spoor	1200	15	0,4	15
binnenvaart	1000	9	0,4	15

Deze vier transportmodi vormen de basis van zes transportketens waarvan de totale logistieke kosten berekend worden. De volgende ketens zullen beschouwd worden:

- weg klein
- weg groot
- weg klein - spoor - weg klein
- weg groot - spoor - weg groot
- weg klein - binnenvaart - weg klein
- weg groot - binnenvaart - weg groot

In figuur 10 wordt de netwerkstructuur van de verschillende transportmodi en de locatie van de diverse terminals weergegeven. De binnenvaart - weg terminals worden op de kaart weergegeven in het groen. De spoor - weg terminals zijn in het zwart aangeduid. De zeehavens worden in het blauw aangegeven en de trimodale terminals worden in het rood afgebeeld.



Figuur 10. Diverse terminals in België (Caenen, 2012)

4.5 Berekening totale logistieke kost

De totale logistieke kost wordt berekend voor elke transportketen. Deze berekening wordt gedaan op basis van de totale logistieke kostenfunctie in het ADA-model van Ben-Akiva en De Jong (2008).

$$G_{rskmnl} = O_{kq} + T_{rskl} + Y_{rskl} + I_{kq} + K_{kq}$$

waarbij onderstaande logistieke componenten zijn opgenomen:

- bestelkost (O)
- transportkost (T)
- kapitaalkost van goederen in-transit (Y)
- Voorraadkost (I)
- Kapitaalkost van goederen in voorraad (K)

Hierbij moet worden opgemerkt dat de stock-out kosten (Z) en de kosten van veroudering en schade aan goederen in-transit (D) niet mee worden opgenomen omdat het zeer moeilijk is om hierover data te verkrijgen.

Voor het verder verloop van deze praktijkstudie zal steeds vertrokken worden van een basisscenario. Hierin zullen de waarden van de verschillende inputparameters van de totale logistieke kostenfunctie gewijzigd worden, om zo het effect op de keuze van de transportmodus te

kunnen waarnemen. De beginwaarden van deze verschillende inputparameters in het basisscenario zijn hetzelfde voor de acht links. Een overzicht hiervan is terug te vinden in tabel 5.

Tabel 5. Overzicht inputparameters

Symbol	Beschrijving	Afhankelijk van	Waarde
q	Gemiddelde verzendingsgrootte (in ton)	NSTR categorie	68,40 ton
o	Constante bestelkosten per verzending (in €)	NSTR categorie	€ 55
d	Disconteringsvoet (per jaar)	constant	4%
v	Waarde van de vervoerde goederen (in €/ton)	NSTR categorie	€ 672/ton
w	Kosten van opslag (in €/ton/jaar)		20%
T_k	Transportkost weg klein (in €/km)		€ 0,5/km
T_g	Transportkost weg groot (in €/km)		€ 1/km
T_s	Transportkost spoor (in €/km)		€ 15/km
T_b	Transportkost binnenvaart (in €/km)		€ 9/km

Het basisscenario met bovenstaande waarden voor de verschillende inputparameters (zie tabel 5) geeft voor alle acht links aan dat de transportmodus 'weg groot' het meest optimaal is. Dus wanneer deze waarden uit tabel 5 voor de inputparameters ingevuld worden in de totale logistieke kostenfunctie, geeft de transportroute waarbij enkel grote vrachtwagens gebruikt worden de laagste totale logistieke kost. Dit geldt voor de basisscenario's van alle links die bekeken worden in deze praktijkstudie (zie tabel 3).

Ter illustratie zullen de totale logistieke kosten voor de transportketen 'weg groot - spoor - weg groot' van de link HH1 'Kortrijk - Antwerpen' verder uitgewerkt worden. De extra algemene data die nodig is voor de berekeningen is terug te vinden in tabel 6. De data die specifiek betrekking heeft op deze link wordt weergegeven in tabel 7.

Tabel 6. Algemene data

Symbol	Beschrijving	Waarde
Cap_{weg groot}	Capaciteit weg groot (in ton)	27 ton
Cap_{spoor}	Capaciteit spoor (in ton)	1200 ton
L_{weg groot}	Kost van laden/lossen voor weg groot (in €/ton)	€ 2/ton
L_{spoor}	Kost van laden/lossen voor spoor (in €/ton)	€ 0,4/ton
W_{weg groot}	Wachttijd voor weg groot (in uur)	8,4 uur
W_{spoor}	Wachttijd voor spoor (in uur)	5,6 uur

Tabel 7. Specifieke data link HH1 'Kortrijk - Antwerpen'

Symbol	Beschrijving	Waarde
Q	Jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom (in ton)	2530,161 ton
f	frequentie	36,991 verzendingen/jaar
d_{vt}	Afstand voortransport (in km)	5,45 km
d_{ht}	Afstand hoofdtransport (in km)	114,31 km
d_{nt}	Afstand natransport (in km)	10,16 km
R_{vt}	Reistijd voortransport (in uur)	0,061138333 uur
R_{ht}	Reistijd hoofdtransport (in uur)	1,428911883 uur
R_{nt}	Reistijd natransport (in uur)	0,266224833 uur

De frequentie van de verzendingen wordt berekend door de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom te delen door de gemiddelde verzendingsgrootte: $Q/q = 2530,161/68,4 = 36,991$. Het aantal verzendingen, Q/q , wordt afgerond naar boven om ervoor te zorgen dat er enkel volledige leveringen verzonden worden. In dit geval krijgen we dus 37 leveringen van 68,4 ton.

Hieronder zullen de afzonderlijke componenten van de totale logistieke kostenfunctie verder uitgewerkt worden om zo uiteindelijk tot de totale logistieke kost van de transportketen 'weg groot - spoor - weg groot' van de link HH1 'Kortrijk - Antwerpen' te komen.

De bestelkosten (O) worden berekend als volgt:

$$O = o \cdot f$$

$$O = 55 \cdot 37 = \text{€ } 2035$$

De transportkosten (T) worden berekend aan de hand van onderstaande formule:

$$T = [d_{vt} \cdot T_g \cdot 3 + d_{ht} \cdot T_s \cdot [q / (0,75 \cdot \text{Cap}_{\text{spoor}})] + d_{nt} \cdot T_g \cdot 3 + q \cdot (4 \cdot L_{\text{weg groot}} + 2 \cdot L_{\text{spoor}})] \cdot Q / q$$

$$T = [5,45 \cdot 1 \cdot 3 + 114,31 \cdot 15 \cdot [68,4 / (0,75 \cdot 1200)] + 10,16 \cdot 1 \cdot 3 + 68,4 \cdot (4 \cdot 2 + 2 \cdot 0,4)] \cdot 2530,161 / 68,4 = \text{€ } 28\,818,068$$

De transportkosten voor 'weg groot' (T_g) moeten vermenigvuldigd worden met drie aangezien er drie grote vrachtwagens met een capaciteit van 27 ton nodig zijn om de levering van 68,4 ton te transporteren (= $68,4/27$). Indien de transportketen met 'weg klein' als voor- en natransport gebruikt zou worden, moeten de transportkosten (T_k) vermenigvuldigd worden met 46 (= $68,4/1,5$). Verder wordt er ook uitgegaan van een consolidatiegraad van 75 procent. Uiteindelijk wordt er een totale transportkost van 28818,068 euro verkregen.

Om de kapitaalkost van de goederen in-transit (Y) te berekenen worden de reistijden en de wachttijden van het weg- en spoortransport opgeteld. Deze som wordt vervolgens vermenigvuldigd met de waarde van de vervoerde goederen v (in euro/ton) en de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q (in ton). Vervolgens wordt er gedeeld door het aantal uren in één jaar (365 dagen in één jaar en 24 uren in één dag) aangezien de reis- en wachttijden in uren worden

ingevuld. Dit alles wordt tot slot verdisconteerd aan een discontovoet van vier procent. Er wordt in totaal een kost van 187,544 euro bekomen. Uit deze berekening en in vergelijking met de andere kosten blijkt dat deze kapitaalkosten geen grote invloed hebben op de totale logistieke kost. Onderstaande formule laat zien hoe de kapitaalkosten voor de transportketen 'weg groot - spoor - weg groot' berekend worden:

$$Y = d [[(R_{vt} + W_{\text{weg groot}} + R_{nt} + W_{\text{spoor}} + R_{nt} + W_{\text{weg groot}}) \cdot v \cdot Q] / (365 \cdot 24)]$$

$$Y = 0,04 [[(0,061138333 + 8,4 + 1,428911883 + 5,6 + 0,266224833 + 8,4) \cdot 672 \cdot 2530,161] / (365 \cdot 24)] = \text{€ } 187,544.$$

De voorraadkost (I) wordt berekend als volgt:

$$I = (q/2) \cdot w \cdot v$$

$$I = (68,4/2) \cdot 0,2 \cdot 672 = \text{€ } 4596,48$$

De kapitaalkost van de voorraad (K) wordt met de formule hieronder berekend:

$$K = (q/2) \cdot d \cdot v$$

$$K = (68,4/2) \cdot 0,04 \cdot 672 = \text{€ } 919,296$$

De totale logistieke kost voor de transportketen 'weg groot - spoor - weg groot' van de link HH1 'Kortrijk - Antwerpen' is bijgevolg gelijk aan 36556,388 euro.

$$\text{TLC} = O + T + Y + I + K = 2035 + 28818,068 + 187,544 + 4596,48 + 919,296 = \text{€ } 36556,388$$

Wanneer de totale logistieke kosten van de zes verschillende transportketens van de link HH1 'Kortrijk - Antwerpen' vergeleken worden, blijkt dat de transportketen 'weg groot' de laagste totale logistieke kosten oplevert gevolgd door de transportketen 'weg groot - spoor - weg groot' en vervolgens 'weg groot - binnenvaart - weg groot'. Dit wordt samengevat in tabel 8.

Tabel 8. Analyse link HH1 'Kortrijk - Antwerpen'

Transportmodus	Totale logistieke kost (in €)
Weg klein	102542,639
Weg groot	29473,339
Weg klein - spoor - weg klein	37879,410
Weg groot - spoor - weg groot	36556,388
Weg klein - binnenvaart - weg klein	44699,799
Weg groot - binnenvaart - weg groot	36718,007

4.6 Sensitiviteitsanalyse

In een sensitiviteitsanalyse wordt onderzocht in welke mate het resultaat van een onderzoek wordt beïnvloed door een verandering van methode, waarden, variabelen of uitgangspunten. Een aantal verschillende scenario's worden hierbij naast elkaar gelegd. Op deze manier kunnen de variabelen

die de resultaten het meest beïnvloeden geïdentificeerd worden. Verder kan er ook nagegaan worden wat nu juist het effect is van deze verandering in waarden op het resultaat van het onderzoek.

Zoals eerder aangehaald wordt vaak een kostenfunctie gekozen om een representatief beeld te geven van de toestand van het model. In deze praktijkstudie zal de totale logistieke kostenfunctie (TLC) gebruikt worden. Eerst wordt een bepaalde inputparameter in deze totale logistieke kostenfunctie gewijzigd. Vervolgens wordt het model herberekend met deze verandering en tot slot wordt er gekeken hoe het resultaat veranderd is. Op deze manier kan er geverifieerd worden of de optimale keuze wat betreft de transportmodus hetzelfde is gebleven als bij het basisscenario of niet.

In deze praktijkstudie wordt gekeken naar wat het effect is van een verandering van één van de inputparameters in de totale logistieke kostenfunctie, ceteris paribus, op de keuze van de transportmodus. Er worden negen inputparameters of scenario's onderzocht, namelijk de gemiddelde verzendingsgrootte (q), de transportkost van weg klein (T_k), de transportkost van weg groot (T_g), de transportkost van spoor (T_s), de transportkost van binnenvaart (T_b), de bestelkosten per verzending (o), de disconteringsvoet (d), de waarde van de vervoerde goederen (v) en de opslagkosten (w). Deze negen scenario's zullen hieronder besproken worden.

4.6.1 Scenario 1: inputparameter 'gemiddelde verzendingsgrootte'

In het eerste scenario wordt gekeken naar wat het effect is van een wijziging van de waarde van de gemiddelde verzendingsgrootte q , op de keuze van de transportmodus. Dit wordt gedaan door verschillende waarden voor q in te vullen in de totale logistieke kostenfunctie en vervolgens te kijken welke transportmodus of meer specifiek welke transportketen de laagste totale logistieke kosten geeft.

Dit proces wordt geïllustreerd in tabel 9. Hierbij zal de link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' gebruikt worden als voorbeeld.

Tabel 9. Sensitiviteitsanalyse inputparameter q - link HL1 'Antwerpen - Brugge_1'

Waarde voor q (in ton)	TLC weg klein (in €)	TLC weg groot (in €)	TLC weg klein-spoor-weg klein (in €)	TLC weg groot-spoor-weg groot (in €)	TLC weg klein-binnen-vaart-weg klein (in €)	TLC weg groot-binnen-vaart-weg groot (in €)	Optimale transportmodus
1	25 088,87	37 148,94	17 234,57	20 769,33	17 110,37	20 588,62	Weg klein-binnenvaart-weg klein

2	18 693,96	19 169,86	10 839,65	11 791,26	10 715,46	11 667,07	Weg klein- binnenvaart-weg klein
3	12 754,69	13 230,59	7900,72	8852,33	7795,37	8746,98	Weg klein- binnenvaart-weg klein
4	12 721,42	10 301,28	7117,37	7423,19	7007,31	7327,26	Weg klein- binnenvaart-weg klein
5	12 733,71	8575,94	6679,61	6597,96	6566,72	6507,67	Weg groot- binnenvaart-weg groot
:							
8	11 425,09	6108,91	5821,05	5481,07	5710,98	5399,27	Weg groot- binnenvaart-weg groot
:							
11	10 962,22	5119,48	5562,74	5105,35	5453,96	5027,40	Weg groot- binnenvaart-weg groot
12	10 242,68	4926,49	5388,71	5048,74	5283,36	4971,65	Weg groot
:							
68,4	13 968,60	7670,13	9062	8502,99	8956,31	8430,35	Weg groot
:							
235	27 217,68	20 841,66	22 350,95	21 774,65	22 245,51	21 702,64	Weg groot

Merk op dat er verondersteld wordt dat de maximale waarde die voor de gemiddelde verzendingsgrootte q kan worden ingevuld gelijk is aan de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q van de desbetreffende link. Zo kan voor de gemiddelde verzendingsgrootte q van de link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' maximaal 235,4746 ton (afgerond 235) worden ingevuld (terug te vinden in tabel 3).

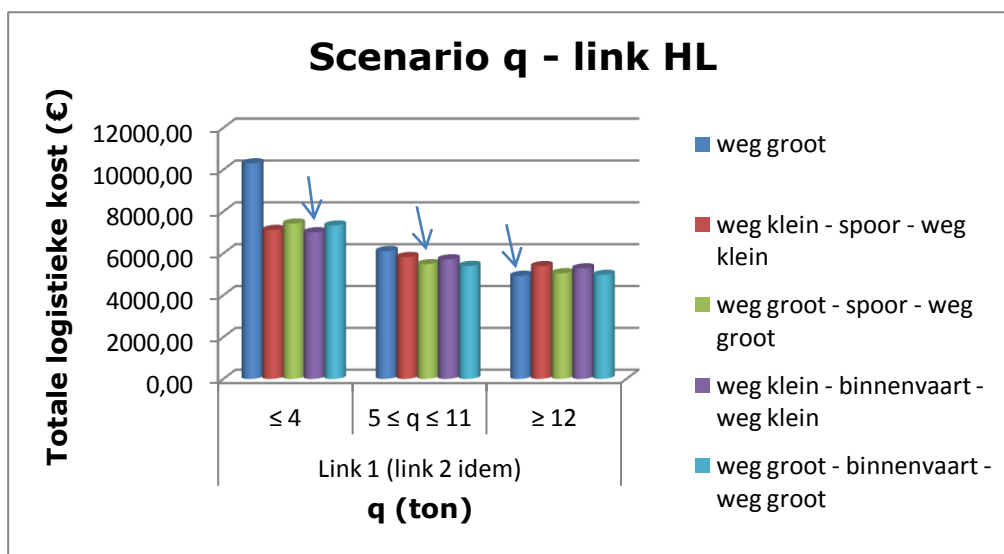
Er worden eerst heel kleine waarden ingevuld voor de gemiddelde verzendingsgrootte q . Hierbij wordt dan gekeken welke transportmodus de laagste totale logistieke kost geeft. Vervolgens wordt er op zoek gegaan naar die specifieke waarde voor de gemiddelde verzendingsgrootte q waarbij een andere transportmodus goedkoper wordt. Verder worden er steeds hogere waarden voor de gemiddelde verzendingsgrootte q ingevuld in de totale logistieke kostenfunctie zoals tabel 8 laat zien.

De tabel geeft duidelijk weer dat er drie grote intervallen onderscheiden kunnen worden. Voor het eerste interval, waar de gemiddelde verzendingsgrootte q waarden aanneemt van vier of kleiner, is de transportketen 'weg klein - binnenvaart - weg klein' het meest optimaal. Voor het tweede interval, waar de gemiddelde verzendingsgrootte q waarden aanneemt tussen vijf en elf, geeft de transportketen 'weg groot - binnenvaart - weg groot' de laagste totale logistieke kost. Voor het

derde interval, waar de gemiddelde verzendingsgrootte q waarden aanneemt van twaalf of groter (maximum 235), is de transportketen 'weg groot' het goedkoopst.

Deze analyse kan ook voorgesteld worden op een grafiek. Voor de illustrerende link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' en de inputparameter q werd echter gekozen om de transportketen 'weg klein' niet mee op te nemen in de grafiek aangezien de totale logistieke kosten van deze transportketen telkens een heel stuk hoger liggen dan de totale logistieke kosten van de andere vijf mogelijke transportketens. Op deze manier kan het verschil in de totale logistieke kosten tussen de vijf andere ketens duidelijker worden weergegeven. De pijlen duiden telkens de goedkoopste transportketen aan binnen de drie intervallen.

Op figuur 11 kan worden afgelezen dat de transportketen 'weg klein - binnenvaart - weg klein' (paars) het meest optimaal is wanneer de gemiddelde verzendingsgrootte q waarden aanneemt die kleiner dan of gelijk zijn aan vier. Voor een gemiddelde verzendingsgrootte q met waarden tussen vijf en elf heeft de transportketen 'weg groot - binnenvaart - weg groot' (lichtblauw) de laagste totale logistieke kost. Wanneer de gemiddelde verzendingsgrootte q waarden aanneemt van twaalf of groter (maximum 235), wordt de transportketen 'weg groot' (donkerblauw) het meest optimaal.



Figuur 11. Scenario inputparameter q - link HL

Merk op dat link HL2 'Brugge - Antwerpen_2' hier dezelfde waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q geeft voor de drie intervallen. Dit komt omdat er bij de twee links tussen dezelfde gemeenten getransporteerd wordt, namelijk Antwerpen en Brugge. De twee routes zijn niet helemaal hetzelfde maar de afstand voor de twee linken zijn zo goed als gelijk. Link HL1 van Antwerpen naar Brugge bedraagt 98,39 km en link HL2 van Brugge naar Antwerpen bedraagt 98,44 km (zie tabel 3). De kosten voor link HL2 'Brugge - Antwerpen_2' zijn daarom ook lichtjes verschillend maar het verloop en de conclusies wat betreft de keuze van de goedkoopste transportmodus blijven hetzelfde voor beide linken. De koppels voor de andere links vertonen

telkens andere waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q voor de verschillende intervallen en een lichtjes anders verloop ten opzichte van elkaar. Deze grafieken kunnen terug gevonden worden in bijlage 2 van deze masterproef.

Het verloop van de transportkeuze bij de verschillende intervallen zal verklaard worden aan de hand van tabel 10. Deze tabel geeft een overzicht van de verschillende kostencomponenten voor de drie intervallen van de gemiddelde verzendingsgrootte q die onderscheiden kunnen worden. We kijken alleen naar de transportketens 'weg groot', 'weg klein - binnenvaart - weg groot' en 'weg groot - binnenvaart - weg groot' aangezien enkel deze relevant zijn om het verschil te kunnen aantonen.

Tabel 10. Overzicht kostencomponenten inputparameter q

Waarden voor q (in ton)	Kosten (in €)	Weg groot	Weg klein - binnenvaart - weg klein	Weg groot - binnenvaart - weg groot
q = 2	O	6475,552	6475,552	6475,552
	T	12 526,071	4061,492	5003,390
	Y	6,960	17,142	26,853
	I	134,400	134,400	134,400
	K	26,880	26,880	26,880
	TLC	19 169,863	10 715,466	11 667,075
q = 8	O	1618,888	1618,888	1618,888
	T	3837,942	3429,831	3108,409
	Y	6,960	17,142	26,853
	I	537,600	537,600	537,600
	K	107,520	107,520	107,520
	TLC	6108,909	5710,981	5399,270
q = 68,4	O	189,344	189,344	189,344
	T	1958,054	3234,053	2698,383
	Y	6,960	17,142	26,853
	I	4596,480	4596,480	4596,480
	K	919,296	919,296	919,296
	TLC	7670,133	8956,315	8430,356

We zien dat de kapitaalkost van goederen in-transit (Y) steeds hetzelfde blijft aangezien deze niet afhankelijk is van de gemiddelde verzendingsgrootte q . Deze kostencomponent heeft hier dus geen enkele invloed op de transportkeuze. Verder zien we ook dat de bestelkost (O), de voorraadkost (I) en de kapitaalkost van goederen in voorraad (K) voor elke transportketen in gelijke mate stijgen of dalen wanneer de waarde van gemiddelde verzendingsgrootte q gewijzigd wordt. Deze

kostencomponenten beïnvloeden de optimale transportmodus ook niet aangezien ze de totale logistieke kost in dezelfde mate doen stijgen of dalen naarmate gemiddelde verzendingsgrootte q verandert. De verklaring moet dus gezocht worden bij de transportkost (T).

In de formule beschreven in paragraaf 4.5 zien we dat de transportkost (T) afhankelijk is van de frequentie ($= Q/q$). Dus hoe lager de gemiddelde verzendingsgrootte q , hoe hoger de frequentie en hoe hoger de transportkost (T). Dit zien we ook in de tabel. Verder geeft de tabel ook weer dat de transportkost (T) het minst hard stijgt voor de intermodale transportketens 'weg klein - binnenvaart - weg klein' en 'weg groot - binnenvaart - weg groot' wanneer we de gemiddelde verzendingsgrootte q laten dalen. Dit komt omdat er bij de intermodale transportketens wordt uitgegaan van een consolidatiegraad van 75 procent. Volgende algemene formules laten zien hoe consolidatie wordt opgenomen voor de transportketen 'weg groot - binnenvaart - weg groot' en hoe capaciteit wordt geïncorporeerd bij directe transportketens zoals 'weg groot':

- 'weg groot - binnenvaart - weg groot': $T = [d_{vt} \cdot T_g \cdot 3 + d_{ht} \cdot T_b \cdot [q / (0,75 \cdot Cap_{binnenvaart})] + d_{ht} \cdot T_g \cdot 3 + q \cdot (4 \cdot L_{weg\ groot} + 2 \cdot L_{binnenvaart})] \cdot Q / q$
- 'weg groot': $T = [d_{ht} \cdot T_g \cdot (q/Cap_{weg\ groot}) + q \cdot (2 \cdot L_{weg\ groot})] \cdot Q / q$

De gemiddelde verzendingsgrootte q wordt gedeeld door 75 procent van de capaciteit van binnenvaart waardoor de transportkost van het hoofdtransport (hier binnenvaart) vermenigvuldigd wordt met een veel lager getal ($8/0,75 \cdot 1000 = 0,0107$). Bij de directe transportketens wordt de gemiddelde verzendingsgrootte q gedeeld door de capaciteit van weg groot en dit wordt afgerond naar boven om steeds volledige voertuigen te hebben ($8/27 = 0,296$ wordt 1). Merk op dat de gemiddelde verzendingsgrootte q ook een invloed heeft op de laad- en loskosten. Bij intermodale transportketens dient er meer overslag te gebeuren als bij directe transportketens maar deze hogere overslagkosten wegen niet op tegen de consolidatiemogelijkheid bij intermodaal transport. Bijgevolg worden de intermodale transportketens 'weg klein - binnenvaart - weg klein' en 'weg groot - binnenvaart - weg groot' interessanter dan de directe transportketen 'weg groot' voor kleinere waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q .

Verder is het logisch dat voor zeer kleine waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q (2 ton) gekozen wordt voor 'weg klein' als voor- en natransport, en dat voor grotere waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q (8 ton) 'weg groot' als voor- en natransport gekozen wordt. Hier wordt een afweging gemaakt tussen de capaciteit (en dus hoeveel vrachtwagens op en af moeten rijden) en de transportkost van een bepaalde transportmodus. Wordt er gekozen voor een lage capaciteit (= hogere frequentie of meer vrachtwagens die op en af moeten) tegen een lagere transportkost of wordt er gekozen voor een hoge capaciteit (= lagere frequentie of minder vrachtwagens op en af moeten) tegen een hogere transportkost. Er moeten bijvoorbeeld minder vrachtwagens ingezet worden wanneer er gebruik wordt gemaakt van grote vrachtwagens met een grotere capaciteit, maar deze transportkost ligt dan wel hoger dan in het geval van kleine vrachtwagens met een lagere capaciteit.

Het proces dat beschreven staat in tabel 9 wordt ook toegepast op de zeven andere links die gebruikt worden in deze praktijkstudie. De intervallen met de waarden voor de gemiddelde verzendingsgrootte q , hun bijhorende optimale transportmodus en hun bijhorende totale logistieke kost worden samengevat in tabel 11. Om de totale logistieke kost te berekenen werd telkens de grenswaarde ingevuld. Indien de gemiddelde verzendingsgrootte q zich tussen twee waarden bevindt ($5 \leq q \leq 11$), wordt hier het getal dat zich in het midden van dat interval bevindt ($q=8$) gebruikt om in te vullen.

Tabel 11. Samenvattende tabel inputparameter q

Link	Waarde voor q (in ton)	Optimale transportmodus	Totale logistieke kost (in €)
HH1	$q \leq 12$	Weg klein – spoor – weg klein	42 777,915
	$q = 13$	Weg groot – spoor – weg groot	42 064,450
	$q \geq 14$	Weg groot	40 363,538
HH2	$q \leq 22$	Weg klein – spoor – weg klein	43 120,129
	$q \geq 23$	Weg groot	42 081,450
HL1	$q \leq 4$	Weg klein – binnenvaart – weg klein	7007,309
	$5 \leq q \leq 11$	Weg groot – binnenvaart – weg groot	5399,270 ($q=8$)
	$q \geq 12$	Weg groot	4926,492
HL2	$q \leq 4$	Weg klein – binnenvaart – weg klein	9237,870
	$5 \leq q \leq 11$	Weg groot – binnenvaart – weg groot	7009,829 ($q=8$)
	$q \geq 12$	Weg groot	6286,723
LH1	$q \leq 3$	Weg klein	51 458,418
	$q \geq 4$	Weg groot	42 894,002
LH2	$q \leq 4$	Weg klein – binnenvaart – weg klein	39 563,454
	$q \geq 5$	Weg groot	35 234,394
LL1	$q \leq 10$	Weg groot – spoor – weg groot	5307,283
	$q \geq 11$	Weg groot	5195,887
LL2	$q \leq 3$	Weg klein	11 342,733
	$q \geq 4$	Weg groot	9666,698

Wanneer we deze tabel analyseren zien we dat voor kleinere waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q bijna altijd gekozen wordt voor de transportketen 'weg klein' of voor een intermodale transportketen met 'weg klein' als voor- en natransport ('weg klein - spoor - weg klein' of 'weg klein - binnenvaart - weg klein'). Bij een lagere gemiddelde verzendingsgrootte q zijn er meer kleine vrachtwagens nodig die de goederen tegen een lagere transportkost kunnen vervoeren. Bij een grote vrachtwagen ligt de transportkost per kilometer en de laad- en loskost (in euro/ton) hoger maar de frequentie is lager dan bij kleine vrachtwagens. De afweging tussen capaciteit (en dus frequentie) en de transportkost van beide transportmodi is dus zeer belangrijk.

Verder zien we ook dat de totale logistieke kost algemeen lager ligt naarmate de gemiddelde verzendingsgrootte q hogere waarden aanneemt. Dit is voornamelijk te wijten aan de bestelkost (O) die aanzienlijk daalt wanneer de gemiddelde verzendingsgrootte q groter wordt (zie tabel 10). Wanneer de gemiddelde verzendingsgrootte q groter wordt, zal de frequentie ($f = Q/q$) dalen. Er zal dus minder frequent geleverd worden (minder leveringen) waardoor de totale bestelkost ($O = o \cdot f$) zal dalen. Naast de bestelkosten dalen ook de transportkosten (T). Zoals tabel 10 al aangaf wordt bij hogere waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q altijd gekozen wordt voor de transportketen 'weg groot' en voor kleinere waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q voor een intermodale transportketen met 'weg groot' als voor- en natransport ('weg groot - spoor - weg groot' of 'weg groot - binnenvaart - weg groot') of 'weg klein' als voor- en natransport ('weg klein - spoor - weg klein' of 'weg klein - binnenvaart - weg klein').

Tot slot gaan we kijken wat het effect is van de afstand tussen twee gemeenten en de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q op de keuze wat betreft de transportmodus. Wanneer we de links met een hoge afstand (HH1, HH2, HL1 en HL2) vergelijken met de links met een lage afstand (LH1, LH2, LL1 en LL2), merken we dat de links met een hoge afstand over het algemeen meer gebruik maken van intermodale transportketens. Bij intermodaal transport stijgen de variabele kosten echter niet zo sterk met de afstand als bij het wegvervoer (Macharis & Verbeke, 1999). In ons voorbeeld wordt er bij het hoofdtransport via binnenvaart of spoor uitgegaan van een consolidatiegraad van 75 procent waardoor er schaalvoordelen behaald kunnen worden.

Vervolgens vergelijken we de links met een hoge jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q (HH1, HH2, LH1 en LH2) met de links waarbij de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q laag is (HL1, HL2, LL1 en LL2). Als we HH1 en HH2 met HL1 en HL2 vergelijken zien we dat bij een hoge jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q gekozen wordt voor een intermodale transportketen met het spoor als hoofdtransport en bij een lage jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q voor een intermodale transportketen met binnenvaart als hoofdtransport. Dit is enkel het geval wanneer de afstand hoog is. Wanneer we de links LH1 en LH2 met LL1 en LL2 vergelijken (waarbij de afstand laag is) zien we juist het omgekeerde, namelijk binnenvaart als hoofdtransport bij een hoge jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q en spoor als hoofdtransport bij een lage jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q . Hieruit kunnen we besluiten dat de afstand wel een invloed heeft op de transportkeuze en dat de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q enkel een invloed heeft op de transportkeuze in interactie met de afstand.

4.6.2 Scenario 2: inputparameter 'transportkost van weg klein'

In het tweede scenario wordt gekeken naar wat het effect is van een wijziging van de waarde van de transportkost voor 'weg klein' (kleine vrachtwagens) T_k , op de keuze van de transportmodus. Welke transportketen geeft de laagste totale logistieke kosten bij verschillende waarden van T_k .

Dit proces wordt geïllustreerd in onderstaande tabel. Hierbij zal opnieuw de link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' gebruikt worden als voorbeeld.

Tabel 12. Sensitiviteitsanalyse inputparameter T_k - link HL1 'Antwerpen - Brugge_1'

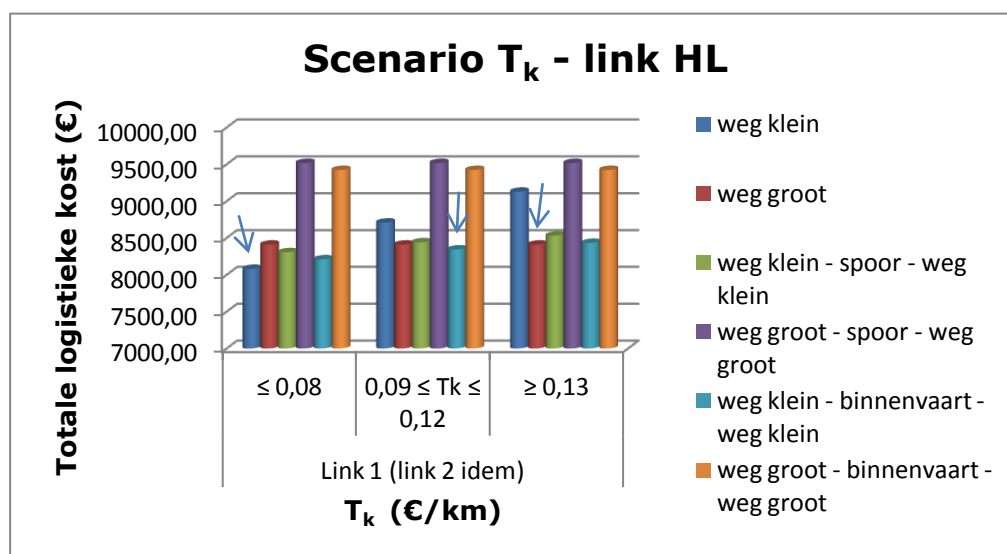
Waarde voor T_k (in €/km)	TLC weg klein (in €)	TLC weg groot (in €)	TLC weg klein-spoor-weg klein (in €)	TLC weg groot-spoor-weg groot (in €)	TLC weg klein-binnen vaart-weg klein (in €)	TLC weg groot-binnen vaart-weg groot (in €)	Optimale transportmodus
0,01	6333,88	7670,13	7359,53	8502,99	7291,09	8430,36	Weg klein
0,02	6489,69	7670,13	7394,278	8502,99	7325,08	8430,36	Weg klein
0,03	6645,51	7670,13	7429,02	8502,99	7359,06	8430,36	Weg klein
0,04	6801,32	7670,13	7463,76	8502,99	7393,05	8430,36	Weg klein
0,05	6957,13	7670,13	7498,51	8502,99	7427,03	8430,36	Weg klein
⋮							
0,08	7424,56	7670,13	7602,74	8502,99	7528,98	8430,36	Weg klein
0,09	7580,37	7670,13	7637,48	8502,99	7562,96	8430,36	Weg klein - binnenvaart - weg klein
0,10	7736,18	7670,13	7672,23	8502,99	7596,95	8430,36	Weg klein - binnenvaart - weg klein
0,11	7891,99	7670,13	7706,97	8502,99	7630,93	8430,36	Weg klein - binnenvaart - weg klein
0,12	8047,80	7670,13	7741,72	8502,99	7664,92	8430,36	Weg klein - binnenvaart - weg klein
0,13	8203,61	7670,13	7776,46	8502,99	7698,90	8430,36	Weg groot
0,14	8359,42	7670,13	7811,20	8502,99	7732,88	8430,36	Weg groot
⋮							
0,5	13 968,60	7670,13	9062	8502,99	8956,31	8430,36	Weg groot
⋮							
2	37 340,17	7670,13	14 273,63	8502,99	14 053,92	8430,36	Weg groot
⋮							
5	84 083,33	7670,13	24 696,89	8502,99	24 249,15	8430,36	Weg groot

Merk op dat de totale logistieke kosten voor de transportketens 'weg groot', 'weg groot - spoor - weg groot' en 'weg groot - binnenvaart - weg groot' niet veranderen aangezien enkel de transportkost van 'weg klein' (T_k) gewijzigd wordt in de totale logistieke kostenfunctie. Naarmate we telkens hogere waarden voor de transportkost van 'weg klein' invullen, zien we dat het op het einde geen zin meer heeft om nog hogere waarden in te vullen aangezien de transportketen 'weg groot' de goedkoopste is. Als we de analyse verder zouden zetten en de transportkost van 'weg

klein' (T_k) nog verder laten stijgen, zullen enkel de totale logistieke kosten van transportketens 'weg klein', 'weg klein - spoor - weg klein' en 'weg klein - binnenvaart - weg klein' ook verder stijgen. De transportketen 'weg groot' blijft dus verder de goedkoopste, ook voor hogere waarden voor de transportkost van 'weg klein' (T_k). In bovenstaande tabel werd dan ook besloten om te stoppen nadat de transportkost van 'weg klein' (T_k) een waarde van vijf aangenomen heeft.

Het proces dat in tabel 12 wordt weergegeven verloopt op een gelijkaardige manier als het proces in scenario 1 (inputparameter 'gemiddelde verzendingsgrootte'). Er kunnen opnieuw drie intervallen onderscheiden worden, namelijk de transportketen 'weg klein' voor zeer kleine waarden van de transportkost van 'weg klein' (T_k), de transportketen 'weg klein - binnenvaart - weg klein' voor waarden van 0,09 tot 0,12 en de transportketen 'weg groot' voor grotere waarden van de transportkost van 'weg klein' (T_k).

Deze analyse wordt voorgesteld in figuur 12. De totale logistieke kost voor de transportketen 'weg klein' wordt deze keer wel terug mee opgenomen in de grafiek aangezien deze geen problemen meer vormt wat betreft de weergave van de totale logistieke kosten van de vijf andere transportketens. De drie intervallen worden duidelijk weergegeven met de exacte waarden en de pijlen wijzen de goedkoopste keten aan.



Figuur 12. Scenario inputparameter T_k - link HL

Ook hier zijn de waarden van de transportkost van 'weg klein' (T_k) voor de drie intervallen van de link HL2 'Brugge - Antwerpen_2' dezelfde om dezelfde reden als in het eerste scenario. De koppels voor de andere links vertonen hier ook telkens andere waarden van de transportkost van 'weg klein' (T_k) voor de verschillende intervallen maar, in tegenstelling tot scenario 1, blijven hier het verloop en de conclusies wel hetzelfde voor deze koppels. De grafieken voor de overige linken zijn terug te vinden in bijlage 3. Aangezien het verloop hetzelfde is voor beide linken binnen één segment, wordt telkens maar één link getoond in de figuren van bijlage 3.

Voor dit scenario heeft het geen zin om de verschillende kostencomponenten van de transportketens voor de drie intervallen met elkaar te gaan vergelijken aangezien er zich enkel wijzigingen voor doen in de kostencomponent 'transportkost (T)'. De algemene formules van de transportkost (T) worden hieronder voor de drie transportketens (van de drie intervallen) weergegeven:

- 'weg klein': $T = [d_{ht} \cdot T_k \cdot 46 + q \cdot (2 \cdot L_{weg\ klein})] \cdot Q / q$
- 'weg klein - binnenvaart - weg klein': $T = [d_{vt} \cdot T_k \cdot 46 + d_{ht} \cdot T_b \cdot [q / (0,75 \cdot Cap_{binnenvaart})] + d_{nt} \cdot T_k \cdot 46 + q \cdot (4 \cdot L_{weg\ klein} + 2 \cdot L_{binnenvaart})] \cdot Q / q$
- 'weg groot': $T = [d_{ht} \cdot T_g \cdot 3 + q \cdot (2 \cdot L_{weg\ groot})] \cdot Q / q$

De formule voor de transportketen 'weg groot' is niet afhankelijk van de de transportkost van 'weg klein' (T_k). De totale logistieke kost van de transportketen 'weg groot' verandert dus niet wanneer de de transportkost van 'weg klein' (T_k) gewijzigd wordt. De andere twee transportketens zijn wel afhankelijk van de transportkost van 'weg klein' (T_k) en zullen de totale logistieke kost wel beïnvloeden. Voor zeer kleine waarden van de transportkost van 'weg klein' (T_k) gaat het transport via kleine vrachtwagens goedkoper worden waardoor het voordeliger wordt om meer kleine vrachtwagens (46 in plaats van 3) in te zetten om dezelfde hoeveelheid goederen (de gemiddelde verzendingsgrootte q - 68,4 ton) te transporteren. De intermodale transportketen 'weg klein - binnenvaart - weg klein' wordt voor iets grotere waarden van de transportkost van 'weg klein' (T_k) het goedkoopst aangezien hier enkel het voor- en natransport via 'weg klein' gaat. Enkel de afstanden van het voor- en natransport worden vermenigvuldigd met de transportkost van 'weg klein' (T_k), en deze zijn is veel kleiner dan de afstand van het hoofdtransport (in geval van direct transport).

Het proces dat wordt beschreven in tabel 12 werd ook toegepast op de overige links van deze praktijkstudie. Tabel 13 geeft een samenvatting hiervan.

Tabel 13. Samenvattende tabel inputparameter T_k

Link	waarde voor T_k (in €/km)	Optimale transportmodus	Totale logistieke kost (in €)
HH1	$T_k \leq 0,07$	Weg klein	25 219,202
	$0,08 \leq T_k \leq 0,18$	Weg klein – spoor – weg klein	28 051,651 ($T_k=0,13$)
	$T_k \geq 0,19$	Weg groot	29 473,339
HH2	$T_k \leq 0,05$	Weg klein	30 388,422
	$0,06 \leq T_k \leq 0,47$	Weg klein – spoor – weg klein	36 722,497 ($T_k=0,27$)
	$T_k \geq 0,48$	Weg groot	41 331,233

HL1	$T_k \leq 0,08$	Weg klein	7424,561
	$0,09 \leq T_k \leq 0,12$	Weg klein – binnenvaart – weg klein	7630,936 ($T_k=0,11$)
	$T_k \geq 0,13$	Weg groot	7670,133
HL2	$T_k \leq 0,08$	Weg klein	8080,627
	$0,09 \leq T_k \leq 0,12$	Weg klein – binnenvaart – weg klein	8344,344 ($T_k=0,11$)
	$T_k \geq 0,13$	Weg groot	8410,338
LH1	$T_k \leq 0,15$	Weg klein	15 499,783
	$T_k \geq 0,16$	Weg groot	15 808,045
LH2	$T_k \leq 0,12$	Weg klein	14 909,636
	$T_k \geq 0,13$	Weg groot	15 356,047
LL1	$T_k \leq 0,16$	Weg klein	7723,517
	$T_k \geq 0,17$	Weg groot	7769,445
LL2	$T_k \leq 0,20$	Weg klein	7815,542
	$T_k \geq 0,21$	Weg groot	7846,417

Als we de samenvattende tabel analyseren zien we dat wanneer de transportkost van 'weg klein' (T_k) kleinere waarden aanneemt er altijd gekozen wordt voor de transportketen 'weg klein' of voor een intermodale transportketen met 'weg klein' als voor- en natransport ('weg klein - spoor - weg klein' of 'weg klein - binnenvaart - weg klein'). De uitleg hiervoor werd al eerder besproken. Bij een lagere transportkost van 'weg klein' (T_k) wordt het vervoeren van dezelfde hoeveelheid goederen met kleine vrachtwagens goedkoper waardoor het gebruik van meer kleine vrachtwagens met een lage capaciteit tegen een relatief lagere transportkost (T_k) voordeliger wordt. Dit in tegenstelling tot het inzetten van een minder grote vrachtwagens met een grote capaciteit die dezelfde gemiddelde verzendingsgrootte q (68,4 ton) transporteren aan een relatief hogere transportkost (T_g). Verder moet bij de intermodale transportketens enkel het voor- en natransport via 'weg klein'.

Naarmate de transportkost van 'weg klein' (T_k) steeds hogere waarde aanneemt en dus duurder wordt, gaat het vervoeren van de goederen (68,4 ton) met grote vrachtwagens relatief goedkoper worden. Bijgevolg wordt er bij hogere waarden van de transportkost van 'weg klein' (T_k) gekozen voor de transportketen 'weg groot'.

Verder zien we ook dat de totale logistieke kost algemeen lager ligt naarmate de transportkost van 'weg klein' (T_k) kleinere waarden aanneemt. Dit is logisch aangezien er zich enkel veranderingen voordoen in de totale transportkosten (T). Alle andere kostencomponenten van de totale logistieke kostenfunctie blijven ongewijzigd. Hoe lager de transportkost van 'weg klein' (T_k), hoe lager de totale transportkost (T) en dus hoe lager de totale logistieke kost van desbetreffende link.

Wat betreft het effect van de afstand tussen twee gemeenten op de keuze van de transportmodus zien we opnieuw dat links met een hoge afstand gebruik maken van intermodale transportketens en dat links met een lage afstand enkel gebruik maken van direct transport. Wanneer de

transportkost van 'weg klein' (T_k) zeer kleine waarden aanneemt, wordt het transport via kleine vrachtwagens de goedkoopste oplossing (direct transport), ook voor links met een hoge afstand.

Wanneer we de links met een hoge en lage jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q vergelijken komen we tot dezelfde conclusie als in eerste scenario, namelijk dat bij een hoge jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q gekozen wordt voor een intermodale transportketen met het spoor als hoofdtransport en bij een lage jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q voor een intermodale transportketen met binnenvaart als hoofdtransport. Opnieuw is dit enkel het geval wanneer de afstand hoog is. Wanneer de afstand laag is, wordt er enkel voor direct transport gekozen en zien we geen verschil tussen een hoge of lage jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q .

4.6.3 Scenario 3: inputparameter 'transportkost van weg groot'

In het derde scenario wordt gekeken naar wat het effect is van een wijziging van de waarde van de transportkost voor 'weg groot' (grote vrachtwagens) T_g , op de keuze van de transportmodus. Er wordt gekeken welke transportketen de laagste totale logistieke kosten geeft wanneer er verschillende waarden voor T_g ingevuld worden in de totale logistieke kostenfunctie.

Dit proces wordt geïllustreerd in tabel 14. Hierbij wordt wederom de link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' gebruikt als voorbeeld.

Tabel 14. Sensitiviteitsanalyse inputparameter T_g - link HL1 'Antwerpen - Brugge_1'

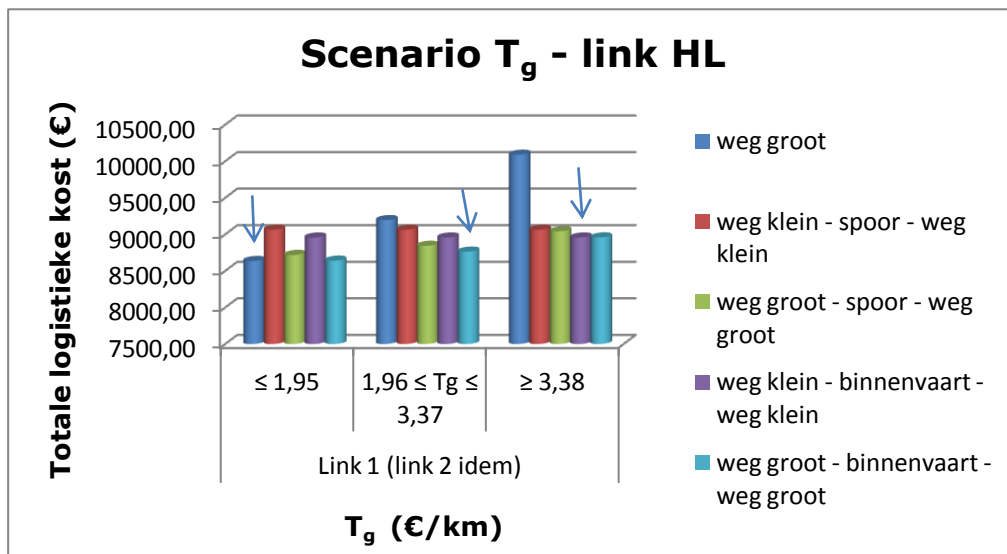
Waarde voor T_g (in €/km)	TLC weg klein (in €)	TLC weg groot (in €)	TLC weg klein-spoor-weg klein (in €)	TLC weg groot-spoor-weg groot (in €)	TLC weg klein-binnenvaart-weg klein (in €)	TLC weg groot-binnenvaart-weg groot (in €)	Optimale transportmodus
0,01	13 968,60	6664,13	9062	8278,66	8956,31	8194,23	Weg groot
0,02	13 968,60	6674,30	9062	8280,93	8956,31	8198	Weg groot
⋮							
0,10	13 968,60	6755,59	9062	8299,06	8956,31	8228,15	Weg groot
⋮							
0,50	13 968,60	7162,05	9062	8389,69	8956,31	8319,53	Weg groot
⋮							
1,00	13 968,60	7670,13	9062	8502,99	8956,31	8430,35	Weg groot
⋮							
1,50	13 968,60	8178,21	9062	8616,28	8956,31	8541,17	Weg groot
⋮							
1,95	13 968,60	8635,48	9062	8718,25	8956,31	8640,91	Weg groot

1,96	13 968,60	8645,64	9062	8720,52	8956,31	8643,12	Weg groot - binnenvaart - weg groot
⋮							
2,5	13 968,60	9194,36	9062	8842,88	8956,31	8762,81	Weg groot - binnenvaart - weg groot
⋮							
3,37	13 968,60	10 078,42	9062	9040,01	8956,31	8955,63	Weg groot - binnenvaart - weg groot
3,38	13 968,60	10 088,58	9062	9042,28	8956,31	8957,84	Weg klein - binnenvaart - weg klein
⋮							
5	13 968,60	11 734,75	9062	9409,36	8956,31	9316,89	Weg klein - binnenvaart - weg klein
⋮							
8	13 968,60	14 783,22	9062	10 089,14	8956,31	9981,80	Weg klein - binnenvaart - weg klein

Merk op dat er zich nu juist het omgekeerde voordoet als in het scenario voor de transportkost van 'weg klein' (T_k). Nu veranderen de totale logistieke kosten voor de transportketens 'weg klein', 'weg klein - spoor - weg klein' en 'weg klein - binnenvaart - weg klein' niet omdat enkel de transportkost van 'weg groot' (T_g) verandert in de totale logistieke kostenfunctie. De transportketen 'weg klein - binnenvaart - weg klein' blijft dus verder de goedkoopste, ook voor hogere waarden voor de transportkost van 'weg groot' (T_g). In tabel 14 werd besloten om te stoppen nadat de transportkost van 'weg groot' (T_g) een waarde van acht bereikt heeft.

Opnieuw kunnen drie intervallen onderscheiden worden. Voor zeer kleine waarden van de transportkost van 'weg groot' (T_g) geeft de transportketen 'weg groot' de meest optimale oplossing. Voor een transportkost van 'weg groot' (T_g) tussen 1,96 en 3,37 is de transportketen 'weg groot - binnenvaart - weg groot' het goedkoopst. De transportketen 'weg groot - binnenvaart - weg groot' wordt het voordeligst voor grotere waarden van de transportkost van 'weg groot' (T_g).

Figuur 13 geeft de exacte waarden voor de drie intervallen en de pijlen duiden telkens de goedkoopste transportketen binnen elk interval aan. Voor de illustrerende link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' en de inputparameter T_g werd opnieuw gekozen om de transportketen 'weg klein' niet mee op te nemen om zo een duidelijker beeld te krijgen van het verschil in de totale logistieke kosten tussen de vijf andere ketens.



Figuur 13. Scenario inputparameter T_g - link HL

Opnieuw zien we dat HL1 en HL2 dezelfde waarden van de transportkost van 'weg groot' (T_g) voor de drie intervallen vertonen. De koppels voor de andere links vertonen andere waarden van de transportkost van 'weg groot' (T_g) voor de verschillende intervallen en een lichtjes anders verloop ten opzichte van elkaar (zie samenvattende tabel 15). Deze andere figuren worden weergegeven in bijlage 4.

Het scenario voor de inputparameter 'transportkost van weg groot (T_g)' geeft juist de tegenovergestelde conclusie van het scenario voor inputparameter 'transportkost van weg klein (T_k)'. Hier zal de transportketen 'weg groot' de goedkoopste blijven wanneer de transportkost van 'weg groot' (T_g) zeer kleine waarden aanneemt. Het wordt dus nog goedkoper om grote vrachtwagens in te zetten om de gemiddelde verzendingsgrootte q te transporteren. De intermodale transportketen 'weg groot - binnenvaart - weg groot' wordt voor iets grotere waarden van de transportkost van 'weg groot' (T_g) de beste oplossing omdat hier enkel het voor- en natransport via 'weg groot' gaat. Wanneer de transportkost van 'weg groot' (T_g) hoge waarden aanneemt, wordt het voordeliger om het voor- en natransport via 'weg klein' te doen aangezien dit nu relatief goedkoper is geworden. De algemene formules van de transportkost (T) worden hieronder weergegeven voor de drie transportketens:

- 'weg groot': $T = [d_{ht} \cdot T_g \cdot 3 + q \cdot (2 \cdot L_{weg\ groot})] \cdot Q / q$
- 'weg groot - binnenvaart - weg groot': $T = [d_{vt} \cdot T_g \cdot 3 + d_{ht} \cdot T_b \cdot [q / (0,75 \cdot Cap_{binnenvaart})] + d_{nt} \cdot T_g \cdot 3 + q \cdot (4 \cdot L_{weg\ groot} + 2 \cdot L_{binnenvaart})] \cdot Q / q$
- 'weg klein - binnenvaart - weg klein': $T = [d_{vt} \cdot T_k \cdot 46 + d_{ht} \cdot T_b \cdot [q / (0,75 \cdot Cap_{binnenvaart})] + d_{nt} \cdot T_k \cdot 46 + q \cdot (4 \cdot L_{weg\ klein} + 2 \cdot L_{binnenvaart})] \cdot Q / q$

Het proces dat beschreven staat in tabel 14 werd ook toegepast op de zeven andere links die gebruikt worden in deze praktijkstudie en geeft onderstaande samenvattende tabel.

Tabel 15. Samenvattende tabel inputparameter T_g

Link	waarde voor T_g (in €/km)	Optimale transportmodus	Totale logistieke kost (in €)
HH1	$T_g \leq 1,70$	Weg groot	37 682,602
	$1,71 \leq T_g \leq 1,76$	Weg groot – spoor – weg groot	37 837,880 ($T_g=1,74$)
	$T_g \geq 1,77$	Weg klein – spoor – weg klein	37 879,410
HH2	$T_g \leq 1,02$	Weg groot	41 767,126
	$T_g \geq 1,03$	Weg klein – spoor – weg klein	41 793,457
HL1	$T_g \leq 1,95$	Weg groot	8635,481
	$1,96 \leq T_g \leq 3,37$	Weg groot – binnenvaart – weg groot	8762,809 ($T_g=2,5$)
	$T_g \geq 3,38$	Weg klein – binnenvaart – weg klein	8956,315
HL2	$T_g \leq 1,94$	Weg groot	9694,056
	$1,95 \leq T_g \leq 3,26$	Weg groot – binnenvaart – weg groot	9858,654 ($T_g=2,5$)
	$T_g \geq 3,27$	Weg klein – binnenvaart – weg klein	10 079,877
LH1	$T_g \leq 6,23$	Weg groot	27 972,568
	$T_g \geq 6,24$	Weg klein	27 982,181
LH2	$T_g \leq 4,31$	Weg groot	25 007,037
	$T_g \geq 4,32$	Weg klein – binnenvaart – weg klein	25 013,950
LL1	$T_g \leq 5,65$	Weg groot	9997,348
	$T_g \geq 5,66$	Weg klein – spoor – weg klein	9999,118
LL2	$T_g \leq 5,51$	Weg groot	9559,835
	$T_g \geq 5,52$	Weg klein	9563,152

De samenvattende tabel geeft ook duidelijk weer dat wanneer de transportkost van 'weg groot' (T_g) kleinere waarden aanneemt er altijd gekozen wordt voor de transportketen 'weg groot' of voor een intermodale transportketen met 'weg groot' als voor- en natransport ('weg groot - spoor - weg groot' of 'weg groot - binnenvaart - weg groot').

Naarmate de transportkost van 'weg groot' (T_g) steeds hogere waarde aanneemt en dus duurder wordt, gaat het vervoeren van de goederen (68,4 ton) met kleine vrachtwagens relatief goedkoper worden. Het is dan voordeliger om de goederen te transporteren met meer kleine vrachtwagens (lage capaciteit). Bijgevolg wordt er bij hogere waarden van de transportkost van 'weg groot' (T_g) gekozen voor de transportketen 'weg klein' of voor een intermodale transportketen met 'weg klein' als voor- en natransport ('weg klein - spoor - weg klein' of 'weg klein - binnenvaart - weg klein').

Verder zien we dat de totale logistieke kost algemeen lager ligt naarmate de transportkost van 'weg groot' (T_g) kleinere waarden aanneemt. Dit is, zoals eerder aangehaald, logisch aangezien enkel de transportkosten (T) wijzigen in totale logistieke kostenfunctie.

Wanneer we kijken naar het effect van de afstand tussen twee gemeenten op de keuze wat betreft de transportmodus zien we, zoals in het eerste en tweede scenario, dat de links met een hoge afstand meer gebruik maken van intermodale transportketens.

Wat betreft het effect van de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q op de keuze van de transportmodus krijgen we exact dezelfde conclusie als het eerste scenario. Wanneer de afstand hoog is, wordt bij een hoge jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q gekozen voor een intermodale transportketen met het spoor als hoofdtransport en bij een lage jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q voor een intermodale transportketen met binnenvaart als hoofdtransport. Als de afstand laag is geldt het omgekeerde. De jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q heeft dus enkel een invloed in interactie met de afstand.

4.6.4 Scenario's 4 en 5: inputparameters 'transportkost van spoor' en 'transportkost van binnenvaart'

In het vierde scenario wordt gekeken naar wat het effect is van een wijziging van de waarde van de transportkost van het spoor (T_s), op de keuze van de transportmodus. Het vijfde scenario kijkt naar het effect van een wijziging van de waarde van de transportkost van binnenvaart (T_b), op de keuze betreffende de transportmodus.

Ook hier werd er gekeken welke transportketen de laagste totale logistieke kosten geeft wanneer er verschillende waarden voor de transportkost van het spoor (T_s) of de transportkost van binnenvaart (T_b) worden ingevuld in de totale logistieke kostenfunctie. Maar al snel valt op dat de transportketen 'weg groot' altijd de goedkoopste transportketen blijft, zowel voor heel kleine waarden als heel grote waarden van beide inputparameters. Zelfs wanneer de transportkost van het spoor (T_s) of de transportkost van binnenvaart (T_b) een waarde van nul zou aannemen en dus gratis zou zijn, blijft de transportketen 'weg groot' de meest optimale keuze. Een transportkost van nul voor beide inputparameters is natuurlijk niet realistisch maar we gebruiken deze waarde in onderstaand voorbeeld om het effect duidelijk te kunnen weergeven.

Onderstaande tabel laat het effect zien van een wijziging van de waarde van de transportkost van het spoor (T_s) naar nul, op de keuze van de transportmodus. Hierbij wordt de link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' opnieuw gebruikt om het effect te illustreren.

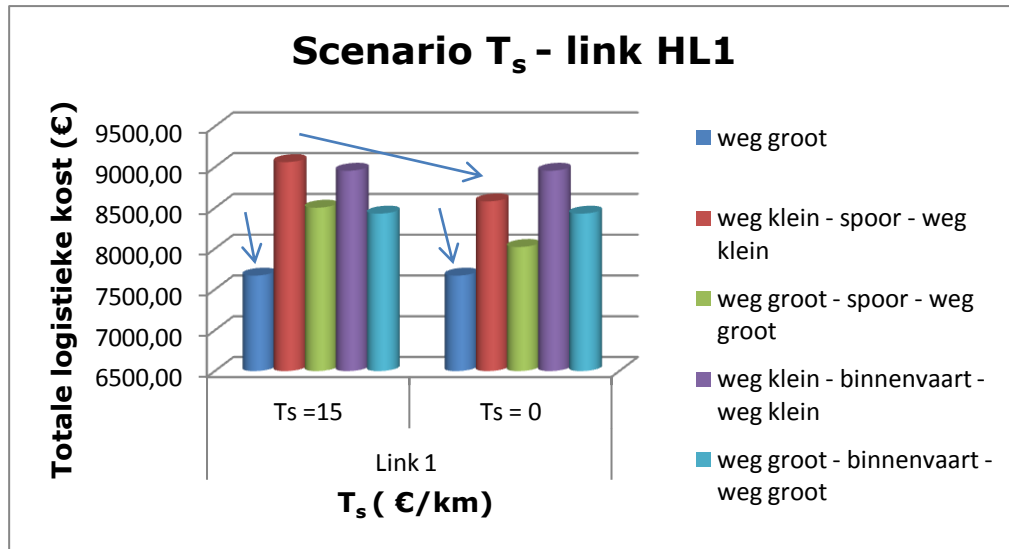
Tabel 16. Effect inputparameter T_s

Transportmodus	TLC bij $T_s = 15$	TLC bij $T_s = 0$	Verskil in kosten (in €)
weg klein	13 968,60	13 968,60	0,00
weg groot	7670,13	7670,13	0,00
weg klein - spoor - weg klein	9062,00	8580,55	481,46
weg groot - spoor - weg groot	8502,99	8021,54	481,46
weg klein - binnenvaart - weg klein	8956,32	8956,32	0,00
weg groot - binnenvaart - weg groot	8430,36	8430,36	0,00

Deze tabel geeft duidelijk weer dat de transportketen 'weg groot' de laagste totale logistieke kost heeft, zelfs wanneer de waarde van de transportkost van het spoor (T_s) nul wordt. Verder kunnen we ook zien dat deze wijziging enkel een effect heeft op de totale logistieke kosten van de intermodale transportketens 'weg klein - spoor - weg klein' en 'weg groot - spoor - weg groot'. Dit komt omdat er zich enkel veranderingen voordoen bij de kosten van het hoofdtransport in de transportkostencomponent (T), namelijk het spoor. De totale logistieke kosten van de andere transportketens veranderen dus niet.

De daling in de totale logistieke kosten van 481,46 euro die tot stand komt wanneer de waarde van de transportkost van het spoor (T_s) nul wordt, is niet significant of groot genoeg om de laagste totale logistieke kosten bij de transportketen 'weg groot' voorbij te steken. Dit is waarschijnlijk voor een deel te wijten aan het feit dat er meer overslagen moeten gebeuren bij de intermodale transportketens. Bij de transportketen 'weg groot' dient er slechts twee keer overslag te gebeuren terwijl bij de intermodale transportketens maar liefst zes keer overslag moet gebeuren (twee keer bij het voortransport, twee keer bij het hoofdtransport en twee keer bij het natransport).

Figuur 14 geeft deze analyse ook nog eens weer in een grafiek. Hierop is ook duidelijk te zien dat de totale logistieke kosten van de intermodale transportketens 'weg klein - spoor - weg klein' en 'weg groot - spoor - weg groot' wel dalen (aangegeven met de grote pijl) maar dat de transportketen 'weg groot' duidelijk de laagste totale logistieke kost blijft behouden. Ook hier werd ervoor gekozen om de transportketen 'weg klein' niet mee op te nemen in de grafiek om zo een duidelijker beeld te krijgen van het verschil in de totale logistieke kosten van de vijf andere ketens.



Figuur 14. Scenario inputparameter T_s - link HL1

Bovenstaande analyse verloopt volledig analoog voor inputparameter 'transportkost voor binnenvaart (T_b)' en geeft dezelfde conclusie voor het effect van een wijziging van de waarde van de transportkost van binnenvaart (T_b) naar nul. Hier zullen echter de totale logistieke kosten van de intermodale transportketens 'weg klein - binnenvaart - weg klein' en 'weg groot - binnenvaart - weg groot' dalen (zie bijlage 5).

Het wijzigen van de inputparameters 'transportkost van spoor' of 'transportkost van binnenvaart' heeft geen enkele invloed heeft op de keuze wat betreft de transportmodus. In paragraaf 4.7 wordt daarom gekeken naar wat het effect op de transportkeuze is als de gemiddelde verzendingsgrootte q samen met de transportkost van spoor (T_s) of de transportkost van binnenvaart (T_b) gewijzigd wordt. Deze analyse zal in paragraaf 4.7 nader besproken worden.

Bij het uitvoeren van de sensitiviteitsanalyse voor de volgende vier scenario's (constante bestelkost o , disconteringsvoet d , waarde van de vervoerde goederen v en opslagkost w) valt het op dat de transportketen 'weg groot' altijd de goedkoopste transportketen blijft, zowel voor heel kleine waarden als heel grote waarden voor de vier inputparameters. De totale logistieke kosten van de zes verschillende transportketens dalen of stijgen namelijk in dezelfde mate waardoor de transportketen 'weg groot' de meeste optimale keuze blijft. De vier inputparameters zullen verder in deze paragraaf besproken worden. Er wordt voor elke inputparameter afzonderlijk een verklaring gezocht voor het feit dat de transportkeuze niet beïnvloed wordt. De link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' zal gebruikt worden om het effect van een wijziging van de verschillende inputparameters te illustreren.

4.6.5 Scenario 6: inputparameters 'constante bestelkost'

Onderstaande tabel laat het effect zien van een wijziging van de waarde van de constante bestelkost (o) per verzending, op de keuze van de transportmodus.

Tabel 17. Effect inputparameter o

Transportmodus	TLC bij $o = 55$	TLC bij $o = 20$	Vershil in kosten (in €)
weg klein	13 968,6	13 848,11	120,49
weg groot	7670,13	7549,642	120,49
weg klein - spoor - weg klein	9062	8941,509	120,49
weg groot - spoor - weg groot	8502,99	8382,501	120,49
weg klein - binnenvaart - weg klein	8956,32	8835,824	120,50
weg groot - binnenvaart - weg groot	8430,36	8309,865	120,50

In tabel 17 is duidelijk te zien dat de transportketen 'weg groot' de laagste totale logistieke kost weergeeft voor beide waarden van de constante bestelkost (o) per verzending. Verder kunnen we ook zien dat deze wijziging hetzelfde effect heeft op de totale logistiek kost alle transportketens, namelijk een daling in de totale logistieke kosten van 120,5 euro. Dit komt omdat er zich enkel veranderingen voordoen in de bestelkostencomponent (O) van de totale logistieke kostenfunctie. Deze bestelkostencomponent (O) verandert bij elke transportketen in dezelfde mate waardoor de keuze van de transportmodus niet beïnvloed wordt en de transportketen 'weg groot' de goedkoopste blijft.

De totale bestelkosten (O) zijn afhankelijk van de frequentie ($f = Q/q$) die voor elk van zes transportketens binnen de link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' hetzelfde blijft. Om de frequentie te berekenen wordt de jaarlijkse 'bedrijf - naar - bedrijf' goederenstroom (Q), die specifiek hoort bij de link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' ($Q = 235,4746$ ton), gedeeld door de gemiddelde verzendingsgrootte (q) die voor alle links hetzelfde is ($q = 68,4$ ton).

Wanneer we de constante bestelkosten per verzending (o) laten dalen met 35 euro ($\Delta o = 50 - 20 = € 35$) dan zal de totale logistieke kost of meer specifiek de bestelkostencomponent (O) in de totale logistieke kostenfunctie dalen met 120,5 euro ($\Delta O = \Delta o \cdot f = 35 \cdot (235,4746/68,4) = € 120,491$). Hierdoor zal de totale logistieke kost van elke transportketen binnen eenzelfde link in gelijke mate stijgen of dalen wanneer de constante bestelkost (o) per verzending gewijzigd wordt. De transportketen 'weg groot' blijft de meest optimale transportkeuze.

4.6.6 Scenario 7: inputparameter 'disconteringsvoet'

Tabel 16 geeft het effect van een wijziging van de waarde van de disconteringsvoet (d) weer, op de keuze van de transportmodus.

Tabel 18. Effect inputparameter d

Transportmodus	TLC bij $d = 0,04$ (4%)	TLC bij $d = 0,01$ (1%)	Vershil in kosten (in €)
weg klein	13 968,6	13 277,62	690,97
weg groot	7670,13	6975,44	694,68
weg klein - spoor - weg klein	9062	8366,57	695,42
weg groot - spoor - weg groot	8502,99	7800,28	702,70
weg klein - binnenvaart - weg klein	8956,32	8253,98	702,33
weg groot - binnenvaart - weg groot	8430,36	7720,74	709,61

De transportketen 'weg groot' geeft opnieuw de laagste totale logistieke kost geeft, zelfs wanneer de waarde van de disconteringsvoet (d) gewijzigd wordt. Verder kunnen we ook zien dat deze wijziging een effect heeft op de totale logistieke kost alle transportketens. Dit effect is niet helemaal hetzelfde voor elke transportketen maar schommelt tussen de 690 euro en 709 euro, wat niet heel verschillend is van elkaar. Deze verschillen in de totale logistieke kosten zijn te wijten aan twee kostencomponenten van de totale logistieke kostenfunctie, namelijk de kapitaalkost van goederen in-transit (Y) en kapitaalkost van goederen in voorraad (K). Deze twee kostencomponenten veranderen ongeveer in dezelfde mate bij elke transportketen waardoor de keuze van de transportmodus niet beïnvloed wordt en de transportketen 'weg groot' de goedkoopste keuze blijft.

We zien in de formule voor de kapitaalkost van goederen in-transit (Y) dat de disconteringsvoet (d) vermenigvuldigd wordt met onder andere de som van de reistijden (R) en de wachttijden (W) die specifiek tot een bepaalde transportketen behoren en die dus verschillend zijn voor elk van de zes transportketens binnen een link. Om deze reden wijken de verschillen in de totale logistieke kost voor de zes verschillende transportketens lichtjes af van elkaar, zoals we kunnen zien in bovenstaande tabel. De andere parameters (waarde van de vervoerde goederen v en de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q) zijn hetzelfde voor de zes transportketens binnen een link. Ter illustratie de formule die eerder ook gebruikt werd in paragraaf 4.5 om de kapitaalkost van goederen in-transit voor de transportketen 'weg groot - spoor - weg groot' te berekenen: $Y = d [[(R_{vt} + W_{weg\ groot} + R_{ht} + W_{spoor} + R_{nt} + W_{weg\ groot}) \cdot v \cdot Q] / (365 \cdot 24)]$

Verder is de kapitaalkost van goederen in voorraad (K) afhankelijk van het gemiddeld aantal goederen dat in voorraad wordt gehouden ($q/2$) en de waarde van vervoerde goederen (v). De waarden van deze twee parameters zijn voor alle links die in deze praktijkstudie gebruikt worden

hetzelfde. De gemiddelde voorraad is namelijk gelijk aan de gemiddelde verzendingsgrootte ($q = 68,4$ ton) gedeeld door twee en de waarde van de vervoerde goederen is gelijk aan 672 euro per ton. Als de disconteringsvoet (d) daalt met 0,03 ($\Delta d = 0,04 - 0,01 = 0,03$) dan zal de kapitaalkost van goederen in voorraad dalen met 689,472 euro ($\Delta K = (q/2) \cdot \Delta d \cdot v = (68,4/2) \cdot 0,03 \cdot 672 = \text{€ } 689,472$).

Het verschil in de totale logistieke kost als gevolg van een wijziging van de waarde van de disconteringsvoet (d) wordt dus bijna volledig verklaard door de kostencomponent 'kapitaalkost van goederen in voorraad (K)'. De wijziging die zich voordoet in de kapitaalkost van goederen in-transit (Y) is zo goed als verwaarloosbaar.

4.6.7 Scenario 8: inputparameter 'waarde van de vervoerde goederen'

In tabel 17 wordt het effect van een wijziging van de waarde van de vervoerde goederen (v) op de keuze van de transportmodus weergegeven.

Tabel 19. Effect inputparameter v

Transportmodus	TLC bij $v = 672$	TLC bij $v = 300$	Vershil in kosten (in €)
weg klein	13 968,6	10 914,11	3054,49
weg groot	7670,13	4612,91	3057,23
weg klein - spoor - weg klein	9062	6004,23	3057,77
weg groot - spoor - weg groot	8502,99	5439,85	3063,14
weg klein - binnenvaart - weg klein	8956,32	5893,45	3062,87
weg groot - binnenvaart - weg groot	8430,36	5362,12	3068,25

Tabel 19 geeft aan dat de transportketen 'weg groot' de laagste totale logistieke kost heeft in beide gevallen voor de waarde van de vervoerde goederen (v). Verder kunnen we ook zien dat deze wijziging een effect heeft op de totale logistieke kost van alle transportketens. Dit effect op de totale logistieke kost is opnieuw niet helemaal hetzelfde voor elke transportketen en schommelt tussen de 3054 euro en 3068 euro, wat niet heel ver uit elkaar ligt. Deze verschillen in de totale logistieke kosten zijn te wijten aan drie kostencomponenten van de totale logistieke kostenfunctie, namelijk de kapitaalkost van goederen in-transit (Y), de voorraadkost (I) en kapitaalkost van goederen in voorraad (K). Deze drie kostencomponenten veranderen ongeveer in dezelfde mate bij elke transportketen waardoor de keuze van de transportmodus niet beïnvloed wordt en de transportketen 'weg groot' de meest optimale keuze blijft.

In de formule voor de kapitaalkost van goederen in-transit (Y) zien we dat de waarde van de vervoerde goederen (v) vermenigvuldigd wordt met de som van de reistijden (R) en de wachttijden (W) die tot een specifieke transportketen behoren en die dus verschillend zijn voor elk van de zes

transportketens binnen een link. Om deze reden wijken de verschillen in de totale logistieke kost voor de zes verschillende transportketens lichtjes af van elkaar, zoals we kunnen zien in tabel 17. Ter illustratie opnieuw de formule die gebruikt wordt om de kapitaalkost van goederen in-transit voor de transportketen 'weg groot - spoor - weg groot' te berekenen:

$$Y = d [[(R_{vt} + W_{\text{weg groot}} + R_{ht} + W_{\text{spoor}} + R_{nt} + W_{\text{weg groot}}) \cdot v \cdot Q] / (365 \cdot 24)]$$

De voorraadkost (I) is afhankelijk van de het gemiddeld aantal goederen dat in voorraad wordt gehouden ($q/2$) en opslagkosten (w). De waarden van deze parameters zijn voor alle links hetzelfde. Zoals eerder aangehaald is de gemiddelde voorraad gelijk aan 68,4 ton gedeeld door twee en de opslagkosten zijn gelijk aan 20 procent van de waarde van de vervoerde goederen. Als de waarde van de vervoerde goederen (v) dus daalt met 372 euro ($\Delta v = 672 - 300 = \text{€ } 372$) dan zal de voorraadkost dalen met 2544,48 euro ($\Delta I = (q/2) \cdot w \cdot \Delta v = (68,4/2) \cdot 0,20 \cdot 372 = \text{€ } 2544,48$).

De kapitaalkost van goederen in voorraad (K) tot slot is ook afhankelijk van het gemiddeld aantal goederen dat in voorraad wordt gehouden ($q/2$) en de disconteringsvoet (d). De waarden van deze twee parameters zijn wederom hetzelfde voor alle links die in deze praktijkstudie gebruikt worden. Als de waarde van de vervoerde goederen (v) daalt met 372 euro ($\Delta v = 672 - 300 = \text{€ } 372$) dan zal de kapitaalkost van goederen in voorraad dalen met 508,896 euro ($\Delta K = (q/2) \cdot d \cdot \Delta v = (68,4/2) \cdot 0,04 \cdot 372 = \text{€ } 508,896$).

Het verschil in de totale logistieke kost als gevolg van een wijziging van de waarde van de vervoerde goederen (v) wordt dus bijna volledig verklaard door de kostencomponenten 'voorraadkost (I)' en 'kapitaalkost van goederen in voorraad (K)' ($\text{€ } 2544,48 + \text{€ } 508,896 = \text{€ } 3053,376$). Opnieuw is de verandering die zich voordoet in de kapitaalkost van goederen in-transit (Y), door een wijziging van de waarde van de vervoerde goederen (v), zo goed als verwaarloosbaar.

4.6.8 Scenario 9: inputparameter 'opslagkost'

Tot slot geeft tabel 18 het effect van een wijziging van de waarde van de opslagkost (w) op de keuze van de transportmodus weer.

Tabel 20. Effect inputparameter w

Transportmodus	TLC bij $w = 0,20$ (20% van v)	TLC bij $w = 0,07$ (7% van v)	Vershil in kosten (in €)
weg klein	13 968,6	10 980,89	2987,71
weg groot	7670,13	4682,42	2987,71
weg klein - spoor - weg klein	9062	6074,29	2987,71
weg groot - spoor - weg groot	8502,99	5515,28	2987,71
weg klein - binnenvaart - weg klein	8956,32	5968,60	2987,72
weg groot - binnenvaart - weg groot	8430,36	5442,64	2987,72

Ook hier is de transportketen 'weg groot' het goedkoopste voor beide waarden van de opslagkost (w) die wordt ingevuld. De verandering heeft hier exact hetzelfde effect heeft op de totale logistieke kost van alle transportketens, namelijk een daling in de totale logistieke kost van 2987,71 euro. Dit komt omdat er zich enkel veranderingen voordoen in de kosten van de voorraadkostencomponent (I) van de totale logistieke kostenfunctie. De keuze van de transportmodus wordt niet beïnvloed en de transportketen 'weg groot' de laagste totale logistieke kost blijft behouden.

De voorraadkost (I) is afhankelijk van de het gemiddeld aantal goederen dat in voorraad wordt gehouden ($q/2$) en de waarde van de vervoerde goederen (v). De waarden van deze parameters zijn voor alle links hetzelfde ($q/2 = 34,2$ ton en $v = 672$ euro). Als de waarde van de opslagkost (w) daalt met euro 0,13 ($\Delta w = 0,20 - 0,07 = 0,13$) dan zal de totale logistieke kost en meer specifiek de voorraadkost in de totale logistieke kostenfunctie dalen met 2987,71 euro ($\Delta I = (q/2) \cdot \Delta w \cdot v = (68,4/2) \cdot 0,13 \cdot 672 = € 2987,712$). De totale logistieke kost van elke transportketen binnen eenzelfde link zal dus in gelijke mate stijgen of dalen wanneer de opslagkost (w) gewijzigd wordt. De transportketen 'weg groot' blijft de meest optimale transportkeuze.

4.7 Interactie 'gemiddelde verzendingsgrootte' en 'transportkost van spoor/binnenvaart'

Zoals eerder in deze praktijkstudie aangetoond (zie sectie 4.6.4), heeft een wijziging van de waarde van de inputparameters 'transportkost van spoor (T_s)' of 'transportkost van binnenvaart (T_b)' geen effect op keuze van de transportmodus. In het verdere verloop van deze paragraaf wordt gekeken of er wel een effect op de transportkeuze is wanneer deze inputparameters samen met de gemiddelde verzendingsgrootte q veranderen.

Voor de twee scenario's die hieronder zullen volgen werd hetzelfde proces toegepast om een sensitiviteitsanalyse uit te voeren. Eerst werd een heel grote waarde voor de gemiddelde verzendingsgrootte q ingevuld. Hier nemen we telkens de maximale waarde die de gemiddelde

verzendingsgrootte q kan aannemen, namelijk de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q van de desbetreffende link (zie tabel 3). Bij deze maximale waarde voor de gemiddelde verzendingsgrootte q gaan we verschillende waarden voor de transportkost van spoor (T_s) of de transportkost van binnenvaart (T_b) invullen en kijken of de keuze wat betreft de transportmodus verandert.

Vervolgens gaan we op zoek naar een tweede waarde voor de gemiddelde verzendingsgrootte q waarbij het verloop van transportmodi voor de verschillende waarden van de transportkost van spoor (T_s) of de transportkost van binnenvaart (T_b) anders is dan het verloop van transportmodi dat we bij de maximale gemiddelde verzendingsgrootte q verkregen. Merk op dat we uit de analyse van de scenario's vier en vijf weten dat de transportketen 'weg groot' altijd de goedkoopste blijft voor elke waarde van de transportkost van spoor (T_s) of de transportkost van binnenvaart (T_b) en dat de gemiddelde verzendingsgrootte q hier een waarde van 68,4 ton aanneemt. Op deze manier weten we dus dat we de tweede waarde voor gemiddelde verzendingsgrootte q moeten gaan zoeken lager dan 68,4 ton.

Indien nodig wordt er verder gezocht naar een derde waarde voor de gemiddelde verzendingsgrootte q , die nog een ander verloop van transportmodi vertoont voor de verschillende waarden van de transportkost van spoor (T_s) of de transportkost van binnenvaart (T_b) dan bij de vorige waarden voor de gemiddelde verzendingsgrootte q .

De twee scenario's zullen hieronder afzonderlijk besproken worden aan de hand van hun samenvattende tabel. Voor elk scenario wordt telkens maar één link per segment bekeken om teveel rekenwerk te vermijden. In totaal worden er dus voor elk scenario vier links geanalyseerd.

4.7.1 Scenario 1: interactie 'gemiddelde verzendingsgrootte' en 'transportkost van spoor'

In het eerste scenario wordt gekeken wat het effect op de transportkeuze is als zowel de gemiddelde verzendingsgrootte q als de transportkost van spoor (T_s) gewijzigd worden. Tabel 21 werd verkregen door middel van het proces dat hierboven beschreven staat. De tabel geeft een overzicht van welke transportmodus gekozen wordt bij welke waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q en de transportkost van spoor (T_s). De gebruikte links zijn HH1 'Kortrijk - Antwerpen', HL1 'Antwerpen - Brugge_1', LH2 'Gent - Brugge_2' en LL1 'Mechelen - Antwerpen_2'. Er wordt verondersteld dat de waarde van de transportkost van spoor (T_s) maximum een waarde van 30 euro per kilometer kan aannemen.

Tabel 21. Samenvattende tabel interactie q en T_s

Link	Waarde voor q (in ton)	Waarde voor T_s (in €/km)	Optimale transportmodus	Totale logistieke kost (in €)
HH1	$q=2530$	$0 \leq T_s \leq 30$	Weg groot	224 204,315 ($T_s=15$)
	$q=16$	$T_s \leq 6,17$	Weg groot – spoor – weg groot	36 891,951
		$T_s \geq 6,18$	Weg groot	36 894,941
	$q=5$	$0 \leq T_s \leq 30$	Weg klein – spoor – weg klein	61 081,689 ($T_s=15$)
HL1	$q=235$	$0 \leq T_s \leq 30$	Weg groot	20 841,668 ($T_s=15$)
	$q=12$	$T_s \leq 11,19$	Weg groot – spoor – weg groot	4925,171
		$T_s \geq 11,20$	Weg groot	4926,492
	$q=4$	$T_s \leq 11,57$	Weg klein – spoor – weg klein	6796,403
		$T_s \geq 11,58$	Weg klein – binnenvaart– weg klein	7007,309
	LH2	$q=1433$	$0 \leq T_s \leq 30$	Weg groot
$q=5$		$T_s \leq 1,68$	Weg groot – spoor – weg groot	35 234,340
		$T_s \geq 1,69$	Weg groot	35 234,394
$q=2$ (4)		$T_s \leq 8,89$	Weg klein – spoor – weg klein	62 948,439
		$T_s \geq 8,90$	Weg klein – binnenvaart– weg klein	62 948,596
LL1	$q=367$	$0 \leq T_s \leq 30$	Weg groot	31 545,839 ($T_s=15$)
	$q=11$	$T_s \leq 4,49$	Weg groot – spoor – weg groot	5178,534
		$T_s \geq 4,50$	Weg groot	5195,887
	$q=4$ (9)	$0 \leq T_s \leq 30$	Weg groot – spoor – weg groot	5983,236 ($T_s=15$)

Link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' zal ter illustratie geanalyseerd worden. Tabel 22 geeft een overzicht van de van de kostencomponenten en totale logistieke kost bij de verschillende waarden voor de gemiddelde verzendingsgrootte q en de transportkost van spoor (T_s). Hierbij wordt enkel gekeken naar de transportketens 'weg groot', 'weg groot - spoor - weg groot', 'weg klein - spoor - weg klein' en 'weg klein - binnenvaart - weg klein', aangezien enkel deze ketens nuttig zijn om het verschil aan te tonen.

Tabel 22. Overzicht kostencomponenten interactie q en T_s

Waarden voor q (in ton) en T_s (in €/km)	Kosten (in €)	weg groot	Weg groot - spoor - weg groot	Weg klein - spoor - weg klein	Weg klein - binnenvaart - weg klein
q=235 $T_s=15$	O	55,111	55,111	55,111	55,111
	T	1829,197	2751,491	3337,502	3222,862
	Y	6,960	17,648	7,937	17,142
	I	15 792,000	15 792,000	15 792,000	15 792,000
	K	3158,400	3158,400	3158,400	3158,400
	TLC	20 841,668	21 774,650	22 350,950	22 245,515
q=12 $T_s=11,19$	O	1079,259	1079,259	1079,259	1079,259
	T	2872,594	2861,869	3211,548	3219,278
	Y	6,960	17,648	7,937	17,142
	I	806,400	806,400	806,400	806,400
	K	161,280	161,280	161,280	161,280
	TLC	4926,492	4926,455	5266,423	5283,359
q=12 $T_s=11,20$	O	1079,259	1079,259	1079,259	1079,259
	T	2872,594	2862,189	3211,869	3219,278
	Y	6,960	17,648	7,937	17,142
	I	806,400	806,400	806,400	806,400
	K	161,280	161,280	161,280	161,280
	TLC	4926,492	4926,776	5266,744	5283,359
q=4 $T_s=11,57$	O	3237,776	3237,776	3237,776	3237,776
	T	6733,985	3735,118	3439,008	3429,831
	Y	6,960	17,648	7,937	17,142
	I	268,800	268,800	268,800	268,800
	K	53,760	53,760	53,760	53,760
	TLC	10 301,280	7313,101	7007,281	7007,309
q=4 $T_s=11,58$	O	3237,776	3237,776	3237,776	3237,776
	T	6733,985	3735,438	3439,329	3429,831
	Y	6,960	17,648	7,937	17,142
	I	268,800	268,800	268,800	268,800
	K	53,760	53,760	53,760	53,760
	TLC	10301,280	7313,422	7007,602	7007,309

Wanneer de gemiddelde verzendingsgrootte q maximaal is (235 ton voor link HL1), heeft de transportketen 'weg groot' de laagste totale logistieke kost voor elke waarde van de transportkost

van spoor (T_s). We weten, zoals eerder aangehaald, dat dit verloop ook verkregen wordt wanneer de gemiddelde verzendingsgrootte q gelijk is aan 68,4 ton. Om deze reden zoeken voor de tweede gemiddelde verzendingsgrootte q een waarde die lager ligt dan 68,4 ton en die een ander verloop van transportmodi geeft bij verschillende waarden van de transportkost van spoor (T_s).

De eerstvolgende gemiddelde verzendingsgrootte q die een ander verloop van transportmodi vertoont, heeft een waarde van twaalf ton. De gemiddelde verzendingsgrootte q is gedaald waardoor de kost van goederen in-transit (Y) en de voorraadkost (I) aanzienlijk dalen. De frequentie (O/q) is nu echter hoger waardoor de bestelkost (O) zal stijgen. Bij kleinere waarden van de transportkost van spoor (T_s) wordt nu de transportketen 'weg groot - spoor - weg groot' het goedkoopste. Het hoofdtransport via spoor wordt goedkoper. Het voor- en natransport gebeuren via 'weg groot' aangezien er slechts één (=12/27) grote vrachtwagen nodig is om 12 ton te kunnen vervoeren. Voor hogere waarden van de transportkost van spoor (T_s) geeft de transportketen 'weg groot' terug de laagste totale logistieke kost. We zien in de tabel dat enkel de transportkost (T) van de transportketen 'weg groot - spoor - weg groot' stijgt aangezien het hoofdtransport via spoor duurder wordt. Het is voordeliger om de gemiddelde verzendingsgrootte q via direct transport met één grote vrachtwagen te transporteren.

Vervolgens kijken we of er nog een derde waarde voor de gemiddelde verzendingsgrootte q gevonden kan worden waarbij het verloop van transportmodi anders is dan bij de vorige twee waarden voor de gemiddelde verzendingsgrootte q . Hier vinden we een gemiddelde verzendingsgrootte q van 4 ton. De kost van goederen in-transit (Y) en de voorraadkost (I) dalen verder aangezien de gemiddelde verzendingsgrootte q nog kleiner is geworden. Ook de bestelkost (O) stijgt opnieuw omwille van de hogere frequentie. Voor kleinere waarden van de transportkost van spoor (T_s) wordt de transportketen 'weg klein - spoor - weg klein' de meeste optimale keuze. Het voor- en natransport gebeuren nu via kleine vrachtwagens omwille van de lage gemiddelde verzendingsgrootte q . Voor 4 ton zijn er echter maar drie (= 4/1,5) kleine vrachtwagens nodig. Het hoofdtransport gaat via het spoor aangezien deze goedkoper is geworden. Wanneer de transportkost van spoor (T_s) hogere waarden aanneemt wordt de transportketen 'weg klein - binnenvaart - weg klein' de goedkoopste keuze. Het hoofdtransport via binnenvaart wordt relatief goedkoper ten opzichte van het hoofdtransport via spoor. Het voor- en natransport gebeuren om dezelfde reden als hierboven via 'weg klein'.

4.7.2 Scenario 2: interactie 'gemiddelde verzendingsgrootte' en 'transportkost van binnenvaart'

Het tweede scenario kijkt naar het effect op keuze van de transportmodus als zowel de gemiddelde verzendingsgrootte q als de transportkost van binnenvaart (T_b) veranderd worden. Tabel 23 geeft een samenvatting van welke transportmodus gekozen wordt bij de verschillende waarden die de gemiddelde verzendingsgrootte q en de transportkost van binnenvaart (T_b) kunnen aannemen. Deze tabel werd opgesteld aan de hand van het proces dat hierboven beschreven staat en gebruikt

dezelfde links als in het eerste scenario. Merk op dat er verondersteld wordt dat de waarde van de transportkost van binnenvaart (T_b) maximum tot 20 euro per kilometer kan gaan.

Tabel 23. Samenvattende tabel interactie q en T_b

Link	Waarde voor q (in ton)	Waarde voor T_b (in €/km)	Optimale transportmodus	Totale logistieke kost (in €)
HH1	$q=2530$	$0 \leq T_b \leq 20$	Weg groot	224 204,315 ($T_b=10$)
	$q=16$	$T_b \leq 1,09$	Weg groot – binnenvaart – weg groot	36 854,725
		$T_b \geq 1,10$	Weg groot	36 894,941
	$q=7$	$0 \leq T_b \leq 20$	Weg klein – spoor – weg klein	51 598,356 ($T_b=10$)
HL1	$q= 235$	$0 \leq T_b \leq 20$	Weg groot	20 841,668 ($T_b=10$)
	$q= 15$	$T_b \leq 1,27$	Weg groot – binnenvaart – weg groot	4553,875
		$T_b \geq 1,28$	Weg groot	4566,421
	$q=4$	$T_b \leq 11,44$	Weg klein – binnenvaart – weg klein	7052,261
		$T_b \geq 11,45$	Weg klein – spoor – weg klein	7117,373
LH2	$q= 1648$	$0 \leq T_b \leq 20$	Weg groot	141 215,819 ($T_b=10$)
	$q= 5$	$T_b \leq 1,54$	Weg groot – binnenvaart – weg groot	35 170,213
		$T_b \geq 1,55$	Weg groot	35 234,394
	$q=2 (4)$	$T_b \leq 15, 31$	Weg klein – binnenvaart – weg klein	63 066,728
		$T_b \geq 15,32$	Weg klein – spoor – weg klein	63 694,835
LL1	$q= 367$	$0 \leq T_b \leq 20$	Weg groot	31 545,839 ($T_b=10$)
	$q=10$	$0 \leq T_b \leq 20$	Weg groot – spoor – weg groot	5307,283 ($T_b=10$)

Wanneer we kijken naar het verloop van transportmodi voor de link HL1 'Antwerpen - Brugge_1' in de samenvattende tabel zien we dat dit verloop dezelfde conclusies geeft als in het eerste scenario (met transportkost van spoor T_s). Het enige verschil doet zich voor bij het hoofdtransport van de intermodale transportketens. Bij kleinere waarden van de transportkost van binnenvaart (T_b) hebben de intermodale transportketens met binnenvaart als hoofdtransport de laagste totale logistieke kost in plaats van de intermodale transportketens met spoor als hoofdtransport. Dit is logisch aangezien de transportkost van binnenvaart (T_b) nu gewijzigd wordt en het hoofdtransport via binnenvaart dus goedkoper wordt. Verder gebeuren het voor- en natransport via 'weg groot' voor hogere waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q en via 'weg klein' voor lagere waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q (afweging tussen capaciteit en transportkosten van beide transportmodi).

Voor hogere waarden van de transportkost van binnenvaart (T_b) en een gemiddelde verzendingsgrootte q van 15 ton, wordt de transportketen 'weg groot' gekozen. Het hoofdtransport via binnenvaart wordt duurder en het is voordeliger om de gemiddelde verzendingsgrootte q te vervoeren via 'weg groot'. Er is namelijk maar één grote vrachtwagen nodig om de 15 ton te kunnen vervoeren. Wanneer de gemiddelde verzendingsgrootte q echter maar 4 ton bedraagt bij hogere waarden van de transportkost van binnenvaart (T_b), dan wordt de intermodale transportketen 'weg klein - spoor - weg klein' de meest optimale keuze. Het hoofdtransport via spoor wordt relatief goedkoper ten opzichte van het hoofdtransport via binnenvaart. Hier wordt het voor- en natransport via 'weg klein' gedaan aangezien de gemiddelde verzendingsgrootte q veel kleiner is en er maar 3 kleine vrachtwagens nodig zijn.

Een overzicht van de kostencomponenten en totale logistieke kost bij de verschillende waarden voor de gemiddelde verzendingsgrootte q en de transportkost van binnenvaart (T_b) is terug te vinden in bijlage 6.

Algemeen kunnen we voor de twee scenario's concluderen dat de waarde van gemiddelde verzendingsgrootte q wel degelijk een rol bij het onderzoeken van het effect op de transportkeuze van een wijziging in de waarde van de transportkost van spoor (T_s) of de transportkost van binnenvaart (T_b).

4.8 Besluit

Uit de sensitiviteitsanalyses van de verschillende inputparameters kunnen we besluiten dat de gemiddelde verzendingsgrootte q het meeste invloed heeft de keuze wat betreft de transportmodus. Wanneer deze gemiddelde verzendingsgrootte q kleine waarden aanneemt wordt over het algemeen voor intermodale transportketens gekozen, ook al dient hier meer overslag te gebeuren. Dit is te verklaren aan de hand van de transportkostencomponent (T) waarbij voor intermodaal transport een consolidatiegraad van 75 procent werd ingebouwd. Verder valt op dat de keuze voor intermodale transportketens bij een lage gemiddelde verzendingsgrootte q vooral voorkomt wanneer de afstand tussen de twee gemeenten hoog is. Een langere afstand maakt intermodaal transport immers interessanter. Wanneer de afstand tussen twee gemeenten laag is wordt bij kleine waarden van gemiddelde verzendingsgrootte q soms ook gekozen voor de transportketen 'weg klein'. Bij een lage gemiddelde verzendingsgrootte q zijn er echter maar weinig kleine vrachtwagens nodig die de goederen tegen een lage transportkost kunnen vervoeren.

Naast de gemiddelde verzendingsgrootte q hebben ook wijzigingen in de transportkost van 'weg klein' (T_k) en de transportkost van 'weg groot' (T_g) een invloed op de transportkeuze. Het is logisch dat voor zeer kleine waarden van deze twee inputparameters gekozen wordt voor de directe transportketens ('weg klein' respectievelijk 'weg groot'). Naarmate de waarden van de inputparameters stijgen, wordt het voordeliger om het hoofdtransport via spoor of binnenvaart te doen. Opnieuw speelt het feit dat er geconsolideerd kan worden bij de intermodale transportketens

een rol. Ook voor deze twee scenario's komen de intermodale transportketens eerder voor wanneer de afstand tussen twee gemeenten hoog is.

Vervolgens kunnen we ook besluiten dat de transportkost van spoor (T_s) en binnenvaart (T_b) enkel een invloed hebben op de keuze van de transportmodus als de gemiddelde verzendingsgrootte q ook gewijzigd wordt. Opnieuw wordt bij kleine waarden van de gemiddelde verzendingsgrootte q gekozen voor de intermodale transportketens. Aangezien hier de transportkost (T_s of T_b) van het hoofdtransport (spoor of binnenvaart) van de intermodale ketens gewijzigd worden, wordt zowel voor een hoge als een lage afstand tussen twee gemeenten bijna altijd voor een intermodale transportketen gekozen. Het verloop van de transportmodi bij een hoge of lage jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q blijft hetzelfde en beïnvloed de transportkeuze, net als de afstand, dus niet.

De bestelkost (o), de disconteringsvoet (d), de waarde van de vervoerde goederen (v) en de opslagkost (w) hebben geen significante invloed op de transportkeuze. De totale logistieke kosten veranderen wel maar dit gebeurt voor elke transportketen in dezelfde mate.

Algemeen kan dus besloten worden dat de keuze wat betreft de transportmodus wel degelijk beïnvloed wordt door het wijzigen van logistieke aspecten. Het is dus belangrijk dat juiste en nauwkeurige gedesaggeerde data (op bedrijfsniveau) beschikbaar worden gesteld om zo een optimale transportkeuze te kunnen maken. Uit de analyses blijkt dat vooral nauwkeurige gegevens betreffende de gemiddelde verzendingsgrootte q (lotgrootte) en de transportkosten van de verschillende transportmodi belangrijk zijn om een juiste transportbeslissing te kunnen nemen. Wijzigingen in deze gegevens (of onjuiste gegevens) hebben echter een grote invloed op de keuze van een transportmodus.

5. Conclusie

Het eerste hoofdstuk van deze masterproef geeft een situering van het praktijkprobleem. Ook werd hier een centrale onderzoeksvraag en drie deelvragen opgesteld. In de hoofdstukken die volgen op het eerste hoofdstuk werd gezocht naar een antwoord op deze vragen.

5.1 Opnemen van logistieke beslissingen in goederenvervoermodellen en transportkeuze

De literatuurstudie toont aan dat het opnemen van logistieke beslissingen in vele goederenvervoermodellen ontbreekt. Verschillende goederenvervoermodellen werden geanalyseerd om na te gaan hoe al dan niet rekening gehouden wordt met logistieke beslissingen en om te kijken op welke manier de keuze betreffende de transportmodus tot stand komt.

In het traditionele vierstapsmodel worden alle stappen een geaggregeerd niveau toegepast. Buiten het transportaspect worden er geen gedragsaspecten van individuele actoren (bedrijfsniveau) opgenomen. Het vierstapsmodel noemt wel enkele factoren die een invloed hebben op de transportkeuze, maar logistieke beslissingen worden er niet in opgenomen.

Het simulatiemodel van Liedtke (2009) houdt wel rekening met logistieke beslissingen. Zo worden er virtueel transportcontracten gesimuleerd waarbij verschillende actoren onderhandelen over beslissingen betreffende de gemiddelde verzendingsgrootte en routegeneratie. Deze logistieke beslissingen zijn gebaseerd op het "minimale totale logistieke kost" principe. Een nadeel van het model is dat het enkel betrekking heeft op het wegtransport.

Het ADA-model van Ben-Akiva en De Jong (2008) bevat een relatief complete logistieke module. Voor deze logistieke module vindt een desaggregatiestap plaats die ervoor zorgt dat de logistieke beslissingen op een bedrijfsniveau (meer gedetailleerd) kunnen worden geanalyseerd en opgenomen. Deze module maakt gebruik van het "totale logistieke kosten" principe om logistieke beslissingen zoals lotgrootte, transportmodus en voorraadbeleid te nemen.

Het model van Roorda (2010) is een gedragsgericht goederenvervoermodel. Dit model houdt rekening met de verschillende rollen die actoren in goederenvervoermodellen spelen, de interacties tussen deze actoren en eventuele economische veranderingen die zich voordoen in de bedrijfsomgeving. Daarnaast wordt ook het belang van contracten aangegeven en de manier waarop deze contracten bijdragen aan de ontwikkeling van zowel korte als lange termijn interacties tussen bedrijfsvestigingen.

5.2 Bespreking van de logistieke module

Er bestaan verschillende logistieke elementen waar rekening mee gehouden kan worden bij het maken van een keuze betreffende de transportmodus.

Naast de directe transportkosten moeten logistieke beslissingen betreffende de frequentie, de gemiddelde verzendingsgrootte, het voorraadbeleid et cetera grondig geanalyseerd worden. Het voorraadbeleid hangt immers samen met zowel de leverfrequentie als de gemiddelde verzendingsgrootte. Een geïntegreerde logistieke module zoekt naar het minimum van zowel voorraad- als transportkosten. Enerzijds kunnen de transportkosten geminimaliseerd worden door te kiezen voor een langzame transportmodus met een hoge capaciteit. Hierdoor worden grote hoeveelheden (hoge gemiddelde verzendingsgrootte) minder frequent geleverd en zullen de voorraadkosten stijgen. Anderzijds kunnen ook de voorraadkosten zo laag mogelijk gehouden worden (JIT-beleid) door erg frequent kleine hoeveelheden (lage gemiddelde verzendingsgrootte) te leveren. Dit brengt echter hogere transportkosten met zich mee.

5.3 Toelichting praktijkgedeelte

In het praktijkgedeelte wordt door middel van een sensitiviteitsanalyse nagegaan welke logistieke elementen een invloed hebben op de keuze betreffende de transportmodus en welke de transportkeuze dan het meest beïnvloeden.

Vlaanderen omvat 308 gemeenten die als zones beschouwd worden. Hieruit werden tien gemeenten geselecteerd om teveel rekenwerk te vermijden. Tussen deze tien gemeenten konden in totaal 934 links gerealiseerd worden. Dit aantal werd vervolgens proportioneel herleid tot 53 links. De productie-consumptiestromen, die betrekking hebben op de goederencategorie NSTR 1, werden omgezet naar gedesaggregeerde 'bedrijf-naar-bedrijf' stromen. Om het praktijkgedeelte te kunnen starten worden de 53 reeds gegenereerde links herleid tot acht links. Dit wordt gedaan aan de hand van een 2² factorieel design waarbij de afstand tussen twee gemeenten wordt beschouwd als de eerste factor en de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q als de tweede factor. Op deze manier kan gekeken worden of deze twee factoren een invloed hebben op de sensitiviteitsanalyse.

Voor elk van de acht links worden zes transportketens (twee directe ketens en vier intermodale ketens) beschouwd, namelijk 'weg klein', 'weg groot', 'weg klein - spoor - weg klein', 'weg groot - spoor - weg groot', 'weg klein - binnenvaart - weg klein', 'weg groot - binnenvaart - weg groot'. Vervolgens wordt de totale logistieke kost berekend voor elke transportketen. Deze berekening is gebaseerd op de totale logistieke kostenfunctie van het ADA-model van Ben-Akiva en De Jong (2008). Er wordt rekening gehouden met vijf kostencomponenten, namelijk bestelkost, transportkost, kapitaalkost van goederen in-transit, voorraadkost en kapitaalkost van goederen in voorraad. In de sensitiviteitsanalyse wordt op basis van deze totale logistieke kostenfunctie gekeken welke transportketen voor elke link het goedkoopste is.

Vervolgens wordt de sensitiviteitsanalyse uitgevoerd. Hierin wordt onderzocht welke invloed een wijziging van één van de inputparameters in de totale logistieke kostenfunctie heeft, ceteris paribus, op de keuze van de transportmodus. De negen inputparameters die geanalyseerd worden zijn gemiddelde verzendingsgrootte, de transportkost van 'weg klein', de transportkost van 'weg

groot', de transportkost van spoor, de transportkost van binnenvaart, de bestelkosten per verzending, de disconteringsvoet, de waarde van de vervoerde goederen en de opslagkosten.

Uit de analyse blijkt dat de gemiddelde verzendingsgrootte, de transportkost van 'weg klein' en de transportkost van 'weg groot' het meeste invloed hebben op de keuze betreffende de transportmodus. De intermodale transportketens worden interessanter naarmate de transport via 'weg klein' of 'weg groot' duurder wordt en naarmate de gemiddelde verzendingsgrootte kleiner wordt. Verder toont de analyse dat de transportkost van spoor en de transportkost van binnenvaart enkel een effect hebben wanneer de gemiddelde verzendingsgrootte ook wijzigt. Opnieuw worden de intermodale transportketens interessanter bij een lage gemiddelde verzendingsgrootte. Er dient echter opgemerkt te worden dat de intermodale transportketens een consolidatiegraad van 75 procent beschouwen. Wijzigingen in de overige vier inputparameters hebben wel een effect op de totale logistieke kost maar de transportmodus 'weg groot' blijft het goedkoopste aangezien elke transportketen ongeveer dezelfde wijziging ondergaat. Wat het factorieel design betreft kan geconcludeerd worden dat afstand tussen twee gemeenten wel een invloed heeft op de transportkeuze. Wanneer de afstand hoog is, wordt er algemeen meer gebruik gemaakt van intermodale transportketens. De grootte van de jaarlijkse 'bedrijf-naar-bedrijf' goederenstroom Q beïnvloed op de keuze wat betreft de transportmodus over het algemeen niet.

De praktijkstudie toont uiteindelijk aan dat wijzigingen in logistieke elementen wel degelijk een effect hebben op transportkeuze. Nauwkeurige data betreffende deze logistieke aspecten is dus zeer noodzakelijk om de invloed van beleidsmaatregelen van overheden beter te kunnen voorspellen aan de hand van goederenvervoermodellen.

In deze praktijkstudie werd het concept consolidatie enkel opgenomen bij de intermodale transportketens. Hierdoor werden deze transportketens in de sensitiviteitsanalyse dan ook zeer vaak als het goedkoopste transport beschouwd. Het is daarom nuttig te onderzoeken of er ook consolidatiemogelijkheden zijn voor de directe transportketens. Voor deze transportketens kan dan bijvoorbeeld ook een bepaalde graad van consolidatie ingebouwd worden in het goederenvervoermodel. Verder beperkt deze praktijkstudie zich tot de regio Vlaanderen waardoor er relatief gezien niet over heel grote afstanden gesproken kan worden. Om deze reden is het interessant om verder te onderzoeken wat de invloed op transportkeuze is wanneer grotere regio's (langere afstanden) bekeken worden.

6. Lijst van geraadpleegde werken

- Andersson, H., Hoff, A., Christiansen, M., Hasle, G., & Lokketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing. [Review]. *Computers & Operations Research*, 37(9), 1515-1536.
- Ballou, R. H. (1999). *Business Logistics Management: Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
- Ben-Akiva, M., & De Jong, G. (2007). A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(9), 950-965.
- Ben-Akiva, M., & De Jong, G. (2008). The Aggregate-Disaggregate-Aggregate (ADA) Freight Model System. *Recent Developments in Transport Modelling: Lessons for the Freight Sector*, 17p.
- Berghmans, M. (2006). Bepaling van optimale verzendingsstrategieën bij verschillende transportalternatieven.
- Blauwens, G., De Baere, P., & Van de Voorde, E. (2008). *Transport economics*. Antwerpen: De Boeck.
- Boerkamps, J. H., van Binsbergen, A. J., & Bovy, P. H. (2007). Modeling Behavioral Aspects of Urban Freight Movement in Supply Chains. *Transportation Research Record*(1725), 17-25.
- Caenen, H. (2012). Opnemen van consolidatiemogelijkheden in goederentransportmodellen.
- Carter, JR., & Ferrin, BG. (1996). Transportation costs and inventory management: Why transportation costs matter. *Production and Inventory Management Journal*, 37:58-62.
- De Jong, G., Vierth, I., Tavasszy, L., & Ben-Akiva, M. (2010). Recent developments in national and international freight transport models within Europe. *Transportation*, 25p.
- De Jong, G., Gunn, H., & Walker, W. (2004). National and international freight transport models: overview and ideas for future development. *Transport Reviews*, 24(1), 103-124.
- De Maeyer, J., & Pauwels, T. (2003). Mode choice modelling. A literature review on the role of Quality of Service attributes and their monetary valuation in freight demand models. *University of Antwerp, Faculty of Applied Economics*.
- Griffiths, R., Richardson, A. J., & Lee-Gosseling, M. E. (2000). Travel Surveys. *Transportation in the New Millenium*.

- Hier-Majumder, C. A., Travis, B. J., Bélanger, E., Richard, G., Vincent, A. P., & Yuen, D. A. (2006). Efficient sensitivity analysis for flow and transport in the Earth's crust and mantle. *Geophysical Journal International*, 166(2), 907-922.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). Network Optimization Models. In F. S. Hillier, & G. J. Lieberman, *Introduction to operations research* (9th ed., pp. 358-423). New York, USA: The McGraw-Hill Company.
- Holguín-Veras, J., & Thorson, E. (2003). Modeling commercial vehicle empty trips with first order trip chain model. *Transportation Research Part B* (37), 129-148.
- Immers, L. H., & Stada, J. E. (2004). *Cursus H111; Verkeersmodellen*. KULeuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde/Afdeling Verkeer en Infrastructuur, Leuven.
- Kochan, B., Bellemans, T., Janssens, D., & Wets, G. (2006). Dynamic activity-travel diary data collection using a GPS-enabled personal digital assistant. *Innovations in Traveling Modelling Conference*. Austin, USA
- Law, A. (2007). *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill Series in Industrial Engineering and Management Science. (4th ed., pp. 619-668).
- Liedtke, G. (2009). Principles of micro-behavior commodity transport modeling. *Transportation Research Part E*, 45 (5), 795-809.
- Macharis, C., & Verbeke, A. (1999). *Intermodaal vervoer - Economische en strategische aspecten van het intermodaal vervoer in Vlaanderen*. Leuven-Apeldoorn: Garant.
- Maes, T., Ramaekers, K., Caris, A., Janssens, G. K., & Bellemans, T. (2011). Simulation of logistic decision within freight transportation model. *In Proceedings of the Industrial Simulation Conference*. Venice.
- McNally, M. G. (2000). The Four Step Model. In H. a. Button, *Handbook of Transport Modeling* (2th ed., pp. 35-52). Pergamon.
- Meixell, M.J. & Norbis, M. (2008). A review of the transportation mode choice and carrier selection literature. *The International Journal of Logistics Management*, 19 (2), 183-211.
- Ortúzar, J. d. D., & Willumsen, L. G. (1995). *Modelling transport* (2 ed. ed.). Chichester: Wiley.
- Roorda, M. J., Cavalcante, R., McCabe, S., & Kwan, H. (2010). A conceptual framework for agent-based modelling of logistics services. *Transportation Research: Part E*, 46(1), 18-31.

- Samimi, A., Mohammadian, A., & Kawamura, K. (2009). Behavioral freight movement modeling. *12th International Conference on Travel Behaviour Research*. Jaipur, Rajasthan, India.
- Swenseth, SR., Godfrey, MR. (2002). Incorporating transportation costs into inventory replenishment decision. *International Journal of Production Economics*, 77, 113-30.
- Tavasszy, L., Ruijgrok, K., & Davydenko, I. (2010). Incorporating logistics in freight transportation models: state of the art and research opportunities. *12th WCTR*, 27p.
- Vannieuwenhuysse, B., & Misschaert, M. (2006). Totale logistieke kost - beslissingsondersteunend bij de bepaling van de optimale modal split. (VILi, Samensteller) Antwerpen.
- Vernimmen, B., & Witlox, F. (2003). The Inventory-Theoretic Approach to Modal Choice in Freight Transport: Literature Review and Case Study. *Brussels Economic Review/Cahiers Economiques de Bruxelles*, 46(2), 5-29.
- Wisetjindawat, W., Matsumoto, S., & Raathanachonkun, P. (2007). Micro-simulation Model for Modeling Freight Agents Interactions in Urban Freight Movement. *86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington D.C.

7. Bijlagen

7.1 Bijlage 1: Zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2004)

Het zwaartekrachtmodel vertrekt steeds vanuit een HB-matrix waar de randen zijn ingevuld met producties en attracties die voorspeld werden in de productie-attractiemodule. Deze HB-matrix moet zodanig ingevuld worden met verplaatsingen dat er aan de randvoorwaarden voldaan wordt.

Randvoorwaarden					
	1	2	3	4	voorspelde O_i
1					400
2					460
3					400
4					702
voorspelde D_j	260	400	500	802	1962

Figuur 15. Randvoorwaarden zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2004)

De verdeling van D_j en O_i moet steeds aan bepaalde beperkingen of weerstanden (kosten, minuten, et cetera) voldoen. De weerstanden c_{ij} tussen alle verschillende zones wordt weergegeven in onderstaande tabel (bijvoorbeeld uitgedrukt in minuten gegeneraliseerde tijd). De cel c_{34} wil bijvoorbeeld zeggen dat er een reistijd van 7 minuten zit tussen herkomstzone 3 en bestemmingszone 4.

Weerstanden c_{ij} (minuten)				
	1	2	3	4
1	3	11	18	22
2	12	3	13	19
3	15.5	13	5	7
4	24	18	8	5

Figuur 16. Weerstanden zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2004)

Op basis van een vooraf gedefinieerde distributiefunctie, hier $F(c_{ij}) = \exp(-0.1 c_{ij})$, kan een startmatrix opgesteld worden. Deze matrix geeft de verhoudingen tussen het aantal verplaatsingen in elke cel van de te schatten HB-matrix.

Startmatrix $F(c_{ij}) = \exp(-0.1 c_{ij})$						
	1	2	3	4	\sum_j	voorspelde O_i
1	0.74	0.33	0.17	0.11	1.35	400
2	0.30	0.74	0.27	0.15	1.49	460
3	0.21	0.27	0.61	0.50	1.59	400
4	0.09	0.17	0.45	0.61	1.32	702
\sum_i	1.34	1.51	1.53	1.37	5.75	
voorspelde D_j	260	400	500	802		1962

Figuur 17. Waarden distributiefunctie voor zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2004)

Om vervolgens een HB-matrix te verkrijgen die voldoet aan de randvoorwaarden, wordt het Furness iteratieproces toegepast op de startmatrix. Dit Furness proces houdt in dat er iteratief volgende bewerking wordt uitgevoerd:

Voor rijen

Vermenigvuldig iedere coëfficiënt met de groeifactor $g_i = \left(\frac{\text{Voorspelde } O_i}{\sum_j}\right)$.

Voor rij 1 is de groeifactor $400 / 1,35 = 296,30$. Alle waarden van rij 1 worden met deze factor vermenigvuldigd.

Voor kolommen

Vermenigvuldig iedere coëfficiënt met de groeifactor $G_j = \left(\frac{\text{Voorspelde } D_j}{\sum_i}\right)$.

Voor kolom 1 is de groeifactor 260 gedeeld door de zonet gewijzigde \sum_i
Alle waarden van kolom 1 worden met deze factor vermenigvuldigd.

Iteratie

Hierna dienen nieuwe groeifactoren voor de rij berekend te worden, gevolgd door dezelfde uitwerking voor kolommen. Dit wordt herhaald totdat de groeifactoren niet meer dan 1,0 verschillen.

Het uiteindelijke resultaat wordt in onderstaande figuur weergegeven.

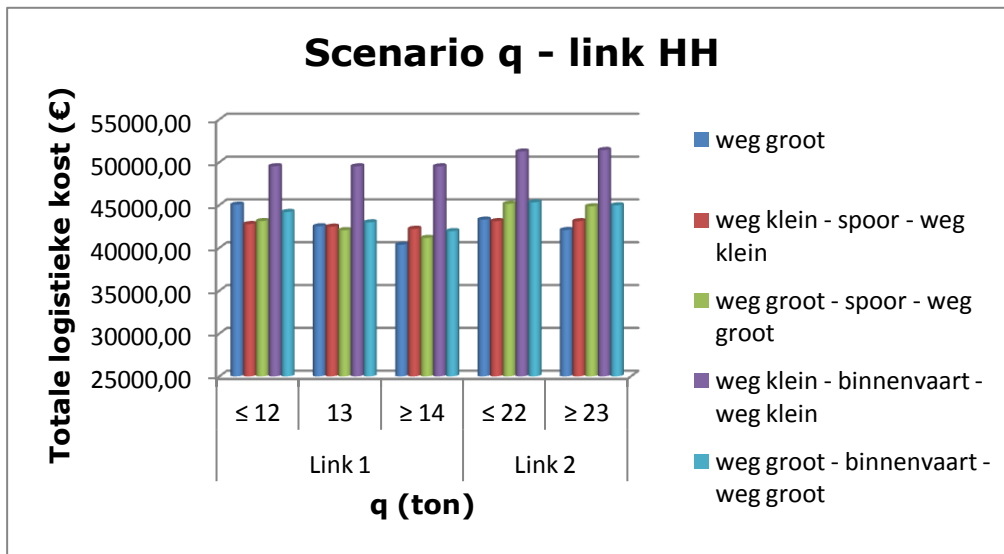
Verplaatsingen T_{ij} berekend met het zwaartekrachtmodel						
	1	2	3	4	\sum_j	a_i
1	157	98	69	76	400	410.0
2	59	204	101	96	460	379.5
3	25	45	138	192	400	229.0
4	19	53	192	438	702	428.7
\sum_i	260	400	500	802	1962	
b_j	0.52	0.73	0.99	1.68		

Figuur 18. Resultaat zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2004)

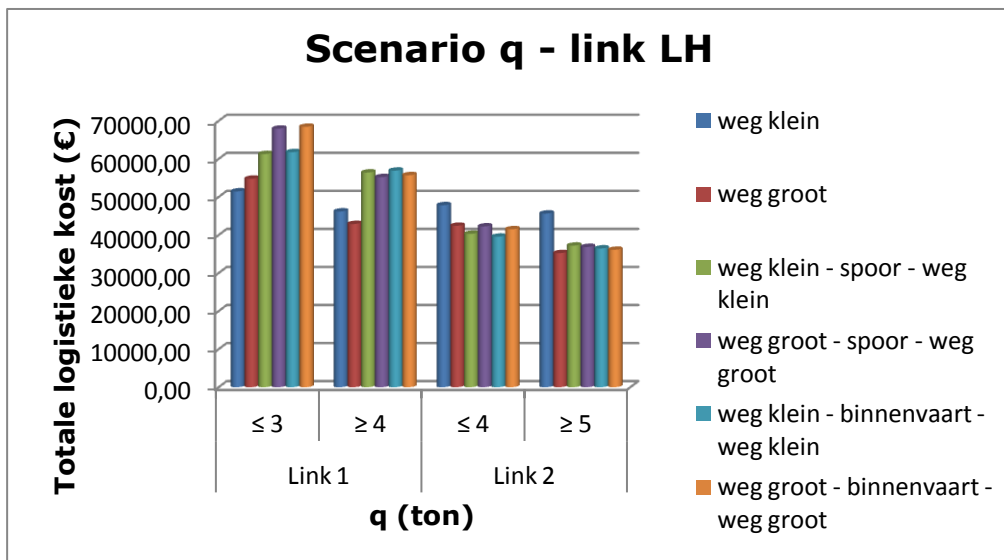
Wanneer alle opeenvolgende vermenigvuldigingsfactoren van het Furness proces samenvatten in de factor $a_i = g_{i1} * g_{i2} * \dots$ voor rijen en de factor $b_j = G_{j1} * G_{j2} * \dots$ voor kolommen,, kunnen we het resultaat van het iteratieproces noteren als $T_{ij} = a_i b_j F(c_{ij})$. Hierbij zijn a_i en b_j de evenwichtsfactoren voor het proces en $F(c_{ij})$ is de distributiefunctie (verkregen door calibratie van gegevens uit een basismatrix).

Het nadeel van dit Furness iteratieproces is dat het afhankelijk is van de beginstap. Wanneer er gestart wordt met het berekenen van de groeifactor voor kolommen, zal het uiteindelijke resultaat enigszins verschillen.

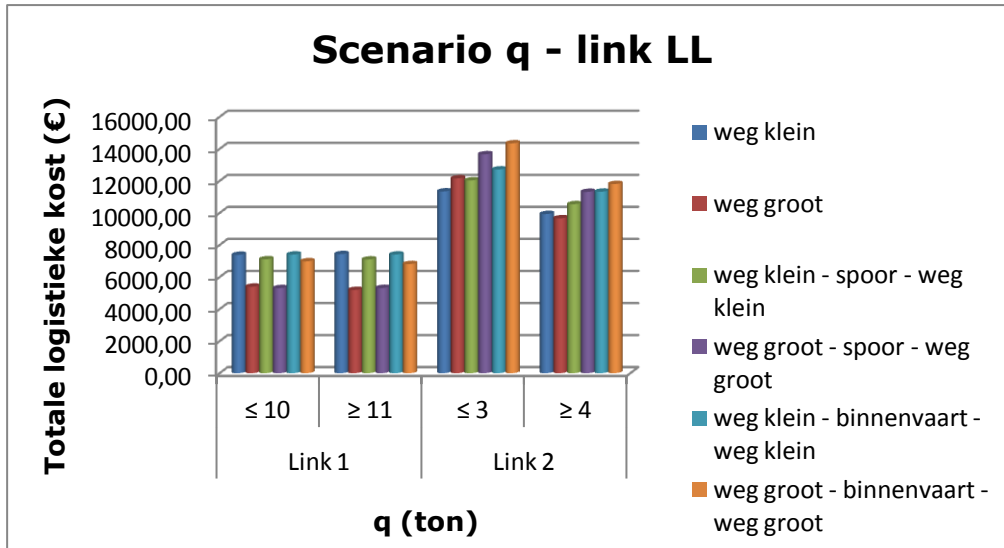
7.2 Bijlage 2: Grafieken scenario 'gemiddelde verzendingsgrootte'



Figuur 19. Scenario inputparameter q – link HH

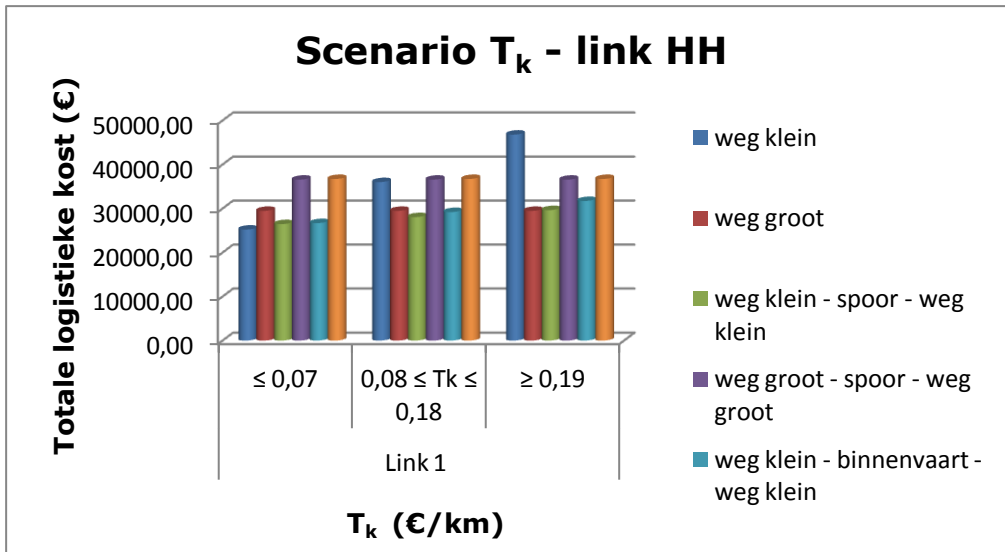


Figuur 20. Scenario inputparameter q – link LH

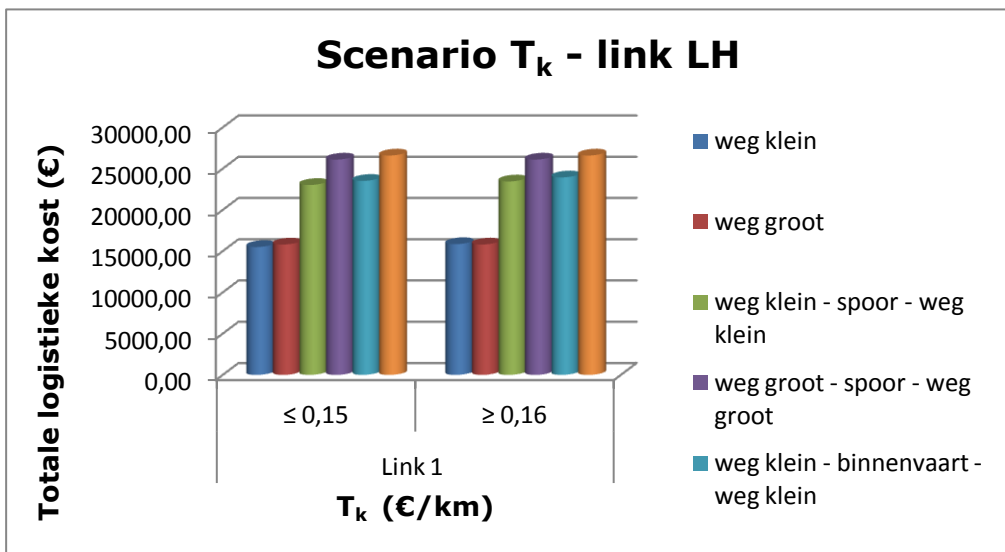


Figuur 21. Scenario inputparameter q – link LL

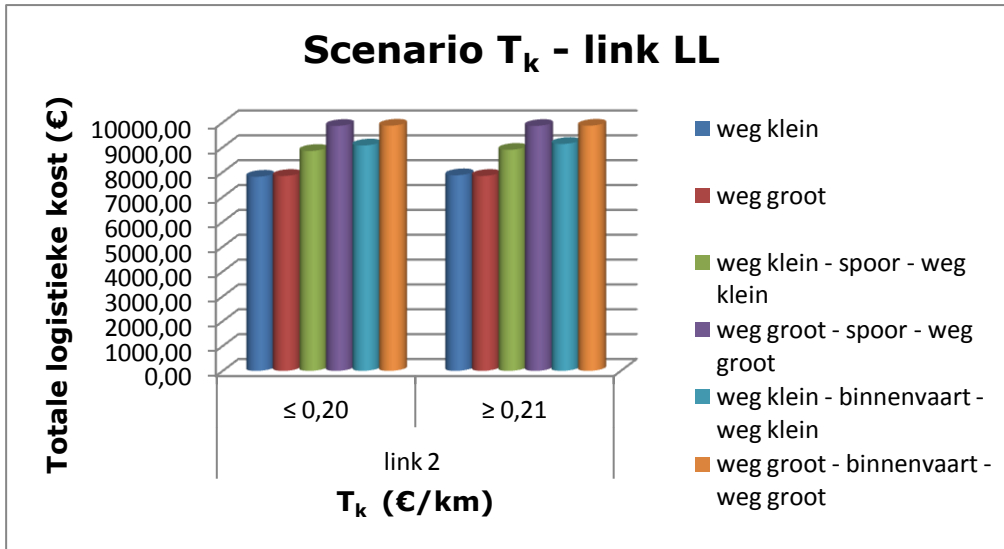
7.3 Bijlage 3: Grafieken scenario 'transportkost van weg klein'



Figuur 22. Scenario inputparameter T_k - link HH

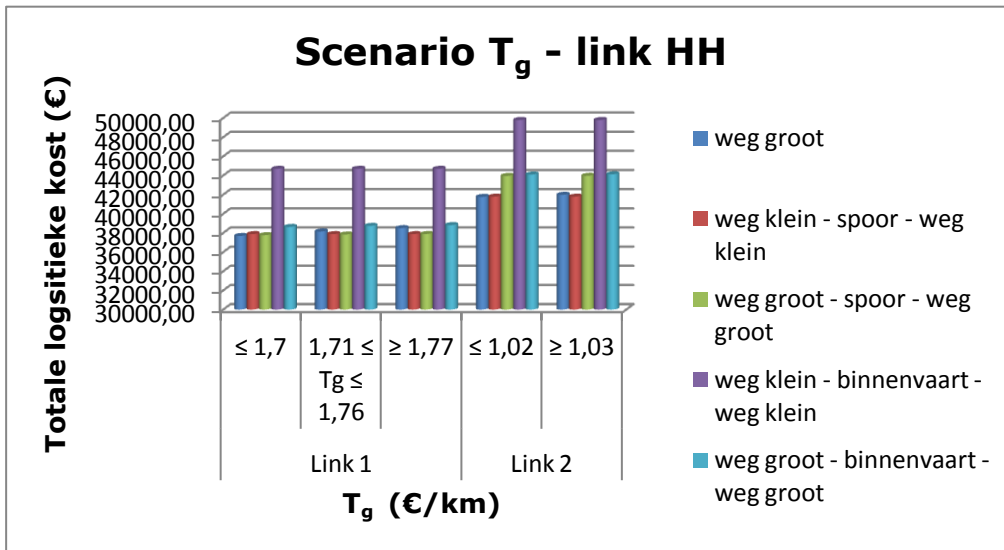


Figuur 23. Scenario inputparameter T_k - link LH

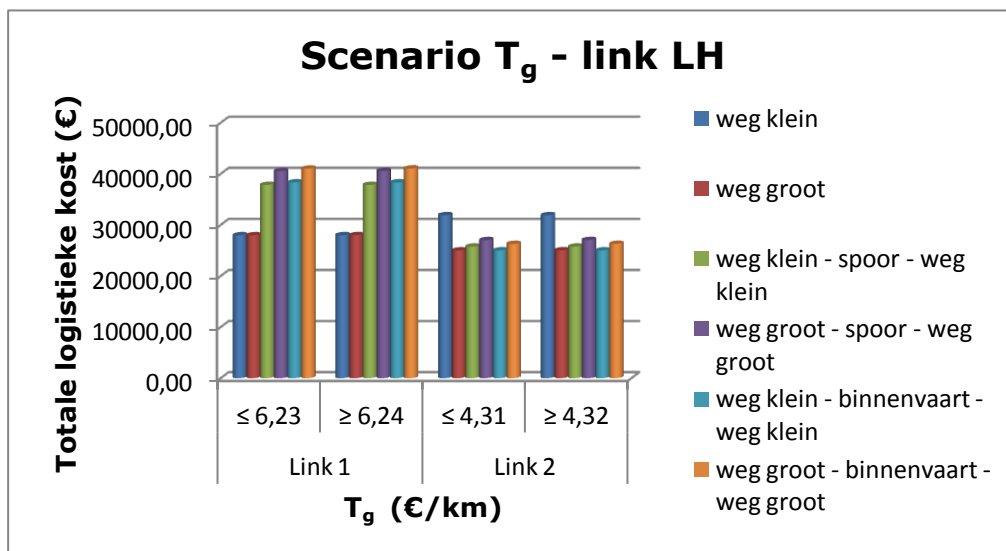


Figuur 24. Scenario inputparameter T_k - link LL

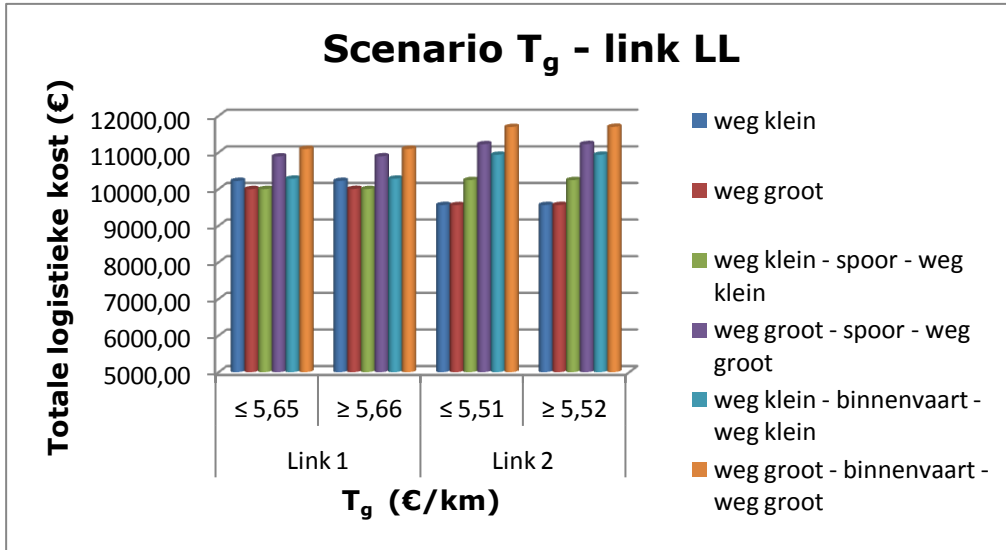
7.4 Bijlage 4: Grafieken scenario 'transportkost van weg groot'



Figuur 25. Scenario inputparameter T_g - link HH



Figuur 26. Scenario inputparameter T_g - link LH



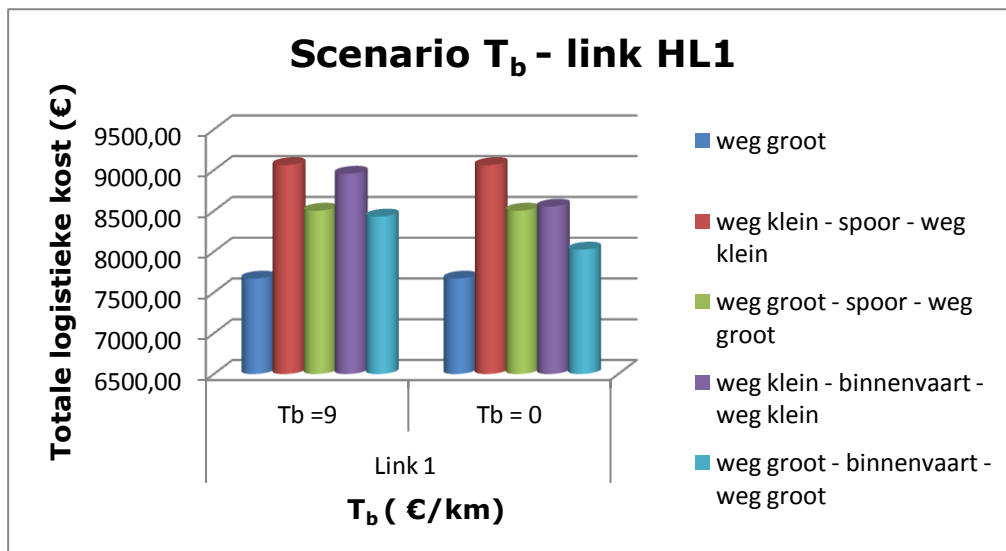
Figuur 27. Scenario inputparameter T_g - link LL

7.5 Bijlage 5: Scenario inputparameter 'transportkost van binnenvaart'

Tabel 24. Effect inputparameter T_b

Transportmodus	TLC bij $T_b = 9$	TLC bij $T_b = 0$	Vershil in kosten (in €)
Weg klein	13968,60	13968,60	0,00
weg groot	7670,13	7670,13	0,00
weg klein - spoor - weg klein	9062,00	9062,00	0,00
weg groot - spoor - weg groot	8502,99	8502,99	0,00
weg klein - binnenvaart - weg klein	8956,32	8551,74	404,57
weg groot - binnenvaart - weg groot	8430,36	8025,78	404,57

De transportketen 'weg groot' blijft de goedkoopste optie, zelfs bij een waarde van nul voor de transportkost van binnenvaart (T_b). Op de grafiek in figuur 28 is te zien dat enkel de totale logistieke kost van de intermodale transportketens 'weg klein - binnenvaart - weg klein' en 'weg groot - binnenvaart - weg groot' dalen (paars en lichtblauw). De transportketen 'weg groot' blijft echter de laagste totale logistieke kost behouden (donkerblauw).



Figuur 28. Scenario inputparameter T_b - link HL1

7.6 Bijlage 6: Scenario interactie 'gemiddelde verzendingsgrootte' en 'transportkost van binnenvaart'

Tabel 25. Overzicht kostencomponenten interactie q en T_b

Waarden voor q (in ton) en T_b (in €/km)	kosten (in €)	Weg groot	Weg groot - binnenvaart - weg groot	Weg klein - binnenvaart - weg klein	Weg klein - spoor - weg klein
q=235 T_b=10	O	55,111	55,111	55,111	55,111
	T	1829,197	2715,230	3267,814	3337,502
	Y	6,960	26,853	17,142	7,937
	I	15 792,000	15 792,000	15 792,000	15 792,000
	K	3158,400	3158,400	3158,400	3158,400
	TLC	20 841,668	21 747,595	22 290,467	22 350,950
q=15 T_b=1,27	O	863,407	863,407	863,407	863,407
	T	2486,455	2466,152	2871,796	3333,838
	Y	6,960	26,853	17,142	7,937
	I	1008,000	1008,000	1008,000	1008,000
	K	201,600	201,600	201,600	201,600
	TLC	4566,421	4566,012	4961,945	5414,782
q=15 T_b=1,28	O	863,407	863,407	863,407	863,407
	T	2486,455	2872,245	2466,601	3333,838
	Y	6,960	17,142	26,853	7,937
	I	1008,000	1008,000	1008,000	1008,000
	K	201,600	201,600	201,600	201,600
	TLC	4566,421	4962,395	4566,461	5414,782
q=4 T_b=11,44	O	3237,776	3237,776	3237,776	3237,776
	T	6733,985	3849,753	3539,515	3549,101
	Y	6,960	26,853	17,142	7,937
	I	268,800	268,800	268,800	268,800
	K	53,760	53,760	53,760	53,760
	TLC	10 301,280	7436,942	7116,993	7117,373
q=4 T_b=11,45	O	3237,776	3237,776	3237,776	3237,776
	T	6733,985	3850,202	3539,965	3549,101
	Y	6,960	26,853	17,142	7,937
	I	268,800	268,800	268,800	268,800
	K	53,760	53,760	53,760	53,760
	TLC	10 301,280	7437,392	7117,443	7117,373

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Opnemen van logistieke beslissingen in transportkeuze

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

Jaar: **2013**

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,

Vaes, Carmen

Datum: **4/06/2013**