

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

Masterproef

*Opnemen van consolidatiemogelijkheden in
goederentransportmodellen*

Promotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Copromotor :
Prof. dr. An CARIS

Hanne Caenen

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

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

Masterproef

*Opnemen van consolidatiemogelijkheden in
goederentransportmodellen*

Promotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Copromotor :
Prof. dr. An CARIS

Hanne Caenen

*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 opleiding tot Handelsingenieur aan de Universiteit Hasselt. Gedurende de laatste twee jaren van mijn opleiding volgde ik de major Operationeel Management en Logistiek. Voor deze masterproef heb ik gekozen voor het onderwerp 'Opnemen van consolidatiemogelijkheden in goederentransportmodellen' aangezien dit door de huidige vervoersproblematiek een actueel domein is. Met deze eindverhandeling hoop ik dan ook nuttige inzichten te verschaffen die in het bedrijfsleven van toepassing kunnen zijn.

Deze masterproef zou niet tot stand gekomen zijn zonder de hulp en steun van een aantal mensen, die ik, alvorens deze masterproef aan te vatten, hier even een woord van dank wil toespreken.

In de eerste plaats wil ik mijn promotor dr. Katrien Ramaekers uitdrukkelijk bedanken voor haar professionele steun gedurende de looptijd van dit project. Ze stond mij steeds met raad en daad bij en volgde mijn werk op de voet zodat ik deze masterproef tot een goed einde heb kunnen brengen. Verder wens ik mijn dank te betuigen aan mijn copromotor dr. An Caris voor de kritische beoordeling bij de tussentijdse evaluatie. Bijzondere dank gaat eveneens uit naar mevrouw Tabitha Maes voor haar hulp en ondersteuning en het ter beschikking stellen van diverse documenten. Zonder haar expertise in dit onderwerp was het vervullen van deze opdracht zeer moeilijk geweest.

Ten slotte, maar daarom niet minder belangrijk, wil ik mijn ouders bedanken voor hun morele en financiële steun gedurende de voorbije vijf jaar. Ik ben hen veel dank verschuldigd voor de kans die ze mij gegeven hebben om deze studies aan te vatten. Eveneens wens ik mijn familie, medestudenten en vrienden te bedanken voor hun hulp, steun en fijne momenten die we samen hebben mogen meemaken tijdens de afgelopen jaren.

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

Hanne Caenen
Diepenbeek, mei 2012

Samenvatting

In de huidige consumptie-economie is goederentransport onmisbaar geworden. Het is een essentieel element in de economische welvaart van een land. Een brede variëteit aan producten moet getransporteerd worden in en tussen consumentenmarkten, industriesectoren en internationale handelsnetwerken. Tegelijkertijd moet eveneens rekening worden gehouden met de nadelige impact van het transport, zoals onder andere congestie, milieupollutie, veiligheid en cetera (Samimi et al., 2009).

Overheden trachten de negatieve effecten van het transport tegen te gaan door middel van verschillende beleidsmaatregelen, zoals onder andere het promoten van intermodaal transport, verlenen van subsidies en het heffen van tol. Om de gevolgen van dergelijke beleidsmaatregelen te kunnen inschatten is er nood aan goederentransportmodellen die goederenstromen en voertuigstromen kunnen voorspellen, zowel in huidige als in toekomstige situaties (Boerkamps et al., 2007).

Hoewel er de laatste decennia significante logistieke veranderingen zijn doorgevoerd, zoals onder andere Just-In-Time leveringen, ontbreken er in de meeste transportmodellen nog steeds logistieke elementen (de Jong & Ben-Akiva, 2007). Het is dan ook belangrijk om logistieke elementen, en meer bepaald consolidatie, te incorporeren in de modellen zodat deze een nauwkeurigere voorspelling kunnen maken van de effecten van beleidsmaatregelen.

Vervolgens wordt in de **literatuurstudie** onderzocht welke goederentransportmodellen er reeds bestaan. De literatuur toont aan dat er nog veel transportmodellen bestaan die weinig of geen rekening houden met logistieke elementen.

Het Aggregate-Disaggregate-Aggregate (ADA) model bevat een relatief complete logistieke module. Door middel van de desaggregatie die plaatsvindt in de logistieke module kunnen er meer gedetailleerde beleidsrelevante variabelen opgenomen worden. In deze module wordt gebruik gemaakt van het concept totale logistieke kosten om logistieke beslissingen te nemen zoals onder andere lotgrootte, consolidatieopties, voorraadbeleid, et cetera.

Hierna wordt de **logistieke module** van het goederentransportmodel onderzocht. De mogelijke directe transportmodi worden kort besproken en vergeleken met het intermodaal transport. Hieruit blijkt dat vanaf een bepaalde kritische drempelafstand het intermodaal transport concurrentieel wordt met het unimodaal transport. Om logistieke beslissingen te nemen wordt gekeken naar de totale logistieke kosten van een bepaalde transportoptie. Deze kosten bestaan volgens Vernimmen en Witlox (2003) uit transportkosten en voorraadkosten. Deze voorraadkosten kunnen nog verder

opgesplitst worden in bestel- en voorraadkosten, voorraadkosten voor goederen in transit en kosten voor het aanhouden van een veiligheidsvoorraad. Enkele andere kosten die door Blauwens et al. (2008) verder worden aangehaald zijn overslagkosten, verpakkingskosten en de kosten die ontstaan voor het onderhouden van een bepaald serviceniveau aan de klant.

Verder levert de literatuur verschillende mogelijke definities voor het concept **consolidatie**. Volgens Woxenius (2007) bestaan er een aantal transportnetwerken die vaak gebruikt worden bij consolidatie van goederen. Hall (1987) definieert drie verschillende manieren om te consolideren, namelijk consolidatie van voorraad, consolidatie van goederen in verschillende voertuigen en consolidatie in terminals. In deze masterproef zal er gewerkt worden met 'consolidatie in terminals'. Door middel van terminals worden goederen van verschillende oorsprongen samengebracht op een bepaalde locatie. Hier worden de goederen geordend, overgeladen op nieuwe voertuigen en vervoerd naar andere bestemmingen.

In het **praktijkgedeelte** wordt nagegaan hoe het begrip consolidatie kan worden opgenomen in goederentransportmodellen. Het praktijkgedeelte is gebaseerd op het eerder besproken ADA-model. Voor 53 links tussen tien Vlaamse gemeenten worden gedesaggregeerde productie-consumptiestromen gecreëerd. Vervolgens wordt voor elke link zes transportketens gebouwd, de totale logistieke kost berekend en onderzocht welke transportketen de goedkoopste optie is. De berekening van de totale logistieke kost bevat vijf kosten. Deze zijn bestel-, transport-, en de voorraadkosten en de kapitaalkost van zowel de goederen in transit als van de goederen in voorraad.

Vervolgens wordt het concept consolidatie verder uitgewerkt. Naar analogie met het ADA-model wordt er in de initiële berekening van de totale logistieke kost gewerkt met een consolidatiegraad van 75 procent. Om te kijken welke invloed consolidatie uitoefent op de totale logistieke kost wordt onderzocht hoe deze kost wijzigt als de mogelijkheid tot verdere consolidatie mee wordt opgenomen. Verschillende links worden met elkaar geconsolideerd op diverse manieren. Eerst worden links geconsolideerd die gebruik maken van hetzelfde hoofdtransport. Vervolgens worden links geconsolideerd waarvan het transport vertrekt van dezelfde beginterminal of aankomt in dezelfde eindterminal. Uit deze analyse moet blijken of de mogelijkheid tot consolidatie ervoor kan zorgen dat intermodaal vervoer geprefereerd wordt boven het unimodaal transport.

Uiteindelijk toont het praktijkgedeelte aan dat het nuttig is om het concept consolidatie mee op te nemen in goederentransportmodellen. Consolidatie kan er namelijk voor zorgen – tenminste indien de afstand voldoende groot is – dat bedrijven een andere transportketen kiezen dan het directe transport. Wanneer overheden de effecten van beleidsmaatregelen willen voorspellen op basis van goederentransportmodellen zal het model nauwkeurigere voorspellingen weergeven als de mogelijkheid tot consolidatie mee is opgenomen.

Inhoudsopgave

Woord vooraf.....	i
Samenvatting	iii
Inhoudsopgave.....	v
Lijst van afbeeldingen	ix
Lijst met tabellen	xi
Hoofdstuk 1 - Inleiding.....	- 1 -
1.1. Praktijkprobleem – omschrijving en situering.....	- 1 -
1.2. Probleemstelling.....	- 3 -
1.2.1. Centrale onderzoeksvraag.....	- 3 -
1.2.2. Deelvragen	- 3 -
1.3. Methodologie	- 4 -
1.3.1. Kwalitatief onderzoek	- 4 -
1.3.2. Kwantitatief onderzoek	- 5 -
Hoofdstuk 2 – Literatuurstudie goederentransportmodellen	- 7 -
2.1. Vierstapsmodel	- 9 -
2.1.1. Productie en attractie.....	- 10 -
2.1.2. Distributie	- 11 -
2.1.3. Modal split / Vervoerswijzekeuze.....	- 14 -
2.1.4. Toewijzing	- 15 -
2.1.5. Conclusie	- 16 -
2.2. Strategic model for integrated logistic evaluations (SMILE)	- 16 -
2.2.1. Productieniveau	- 17 -
2.2.2. Voorraadniveau.....	- 17 -
2.2.3. Transportniveau	- 18 -
2.3. Simulatiemodel van Liedtke	- 18 -
2.3.1. Generatiemodule.....	- 19 -
2.3.2. Sourcing module	- 20 -
2.3.3. Interactieve transportmarktsimulatie	- 20 -
2.4. EUNET2.0	- 21 -

2.5. ADA-model	- 22 -
Hoofdstuk 3 - Logistieke module	- 27 -
3.1. Types transportmodi	- 28 -
3.1.1. Wegverkeer	- 28 -
3.1.2. Spoor	- 28 -
3.1.3. Water	- 29 -
3.1.4. Luchttransport	- 30 -
3.1.5. Pijpleiding	- 31 -
3.2. Intermodaal transport	- 31 -
3.3. Totale logistieke kost.....	- 34 -
3.3.1. Andere kosten	- 35 -
Hoofdstuk 4 – Literatuurstudie Consolidatie.....	- 37 -
4.1. Algemene inleiding	- 37 -
4.1.1. Directe link.....	- 38 -
4.1.2. Corridor	- 38 -
4.1.3. Hub-and-spoke	- 39 -
4.1.4. Connected hubs	- 39 -
4.1.5. Statische route	- 39 -
4.1.6. Dynamische route	- 40 -
4.2. Types consolidatie.....	- 40 -
4.3. Wanneer consolideren?	- 42 -
4.3.1. Model van Mutlu, Çetinkaya en Bookbinder.....	- 44 -
4.3.2. Uitwerking Model van Mutlu, Çetinkaya en Bookbinder.....	- 45 -
4.4. Voor- en nadelen van consolidatie.....	- 46 -
Hoofdstuk 5 – Praktijkgedeelte	- 49 -
5.1. Situering.....	- 49 -
5.2. Inleiding	- 49 -
5.3. Desaggregatiestap	- 52 -
5.4. Definitie van de transportmogelijkheden	- 54 -
5.5. Berekening Totale Logistieke Kost.....	- 56 -
5.6. Consolidatiemogelijkheden	- 60 -

5.6.1. Consolidatie op basis van hoofdtransport	- 60 -
5.6.2. Initiële consolidatiegraad van 50 procent	- 64 -
5.6.3. Bepaling van de kritische drempelafstand.....	- 67 -
5.6.4. Consolidatie op basis van gemeenschappelijke beginterminal.....	- 69 -
5.6.5. Consolidatie op basis van gemeenschappelijke eindterminal	- 75 -
5.7. Besluit.....	- 76 -
5.7.1. Resultaten.....	- 76 -
5.7.2. Goederentransportmodellen.....	- 78 -
Hoofdstuk 6 – Conclusie	- 79 -
6.1. Logistieke beslissingen in goederentransportmodellen	- 79 -
6.2. Definitie van consolidatie	- 80 -
6.3. Toelichting praktijkgedeelte	- 80 -
Hoofdstuk 7 – Lijst van geraadpleegde werken	- 83 -
Hoofdstuk 8 – Bijlagen	- 87 -
8.1. Bijlage A – Berekening Totale Logistieke Kost ‘Antwerpen – Mechelen’.....	- 87 -
8.1.1. Transportketen: Weg klein	- 87 -
8.1.2. Transportketen: Weg groot.....	- 88 -
8.1.3. Transportketen: weg klein – spoor – weg klein	- 89 -
8.1.4. Transportketen: weg groot – spoor – weg groot.....	- 91 -
8.1.5. Transportketen: weg klein – binnenvaart – weg klein	- 93 -
8.1.6. Transportketen: weg groot – binnenvaart – weg groot.....	- 95 -
8.2. Bijlage B – Hoofdtransport SPOOR	- 97 -
8.3. Bijlage C – Berekening TLK met consolidatie: ‘Antwerpen – Mechelen 1’ .	- 100 -
8.3.1. Consolidatie weg groot – SPOOR – weg groot	- 100 -
8.3.2. Consolidatie weg groot – BINNENVAART – weg groot.....	- 102 -
8.4. Bijlage D – Berekening TLK direct transport en intermodaal transport voor de link ‘Antwerpen – Mechelen 1’.....	- 104 -

Lijst van afbeeldingen

Figuur 1 - Vierstapstransportmodel (Ortúzar & Willumsen, 1994)	10 -
Figuur 2 - Randvoorwaarden in een Herkomst-Bestemmingsmatrix (Immers & Stada, 2011) ..	12 -
Figuur 3 - Weerstand zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2011)	12 -
Figuur 4 - Startmatrix opgevuld met waarden van distributiefunctie (Immers & Stada, 2011) .	13 -
Figuur 5 - Uitkomst HD-matrix (Immers & Stada, 2011)	14 -
Figuur 6 - Simulatiemodellering (Tavasszy et al., 1998)	17 -
Figuur 7 - INTERLOG simulatiemodules (Liedtke, 2009)	19 -
Figuur 8 - ADA-structuur (de Jong & Ben-Akiva, 2008)	23 -
Figuur 9 - Verschillende bedrijfs-naar-bedrijfsstromen die éénzelfde traject tussen verschillende overslaglocaties gebruiken (de Jong & Ben-Akiva, 2008)	24 -
Figuur 10 - Piggyback transport (Berktoold, E., <i>Piggyback Transport</i> , internet, 02-02-2012, http://www.panoramio.com/photo/7290962).....	29 -
Figuur 11 - Roll on/Roll off principe (Jurong Port, <i>Roll on, Roll off (Ro-Ro) Facilities</i> , internet, 02- 02-2012, http://www.jp.com.sg/JurongPort/roll-on-roll-off-ro-ro-facilities).....	30 -
Figuur 12 - Intermodale keten (Macharis & Verbeke, 1999)	32 -
Figuur 13 - Kostenstructuur diverse transportmodi (Höltgen, 1995, in Macharis et al., 1999) ..	32 -
Figuur 14 - Kostenstructuur intermodaal transport (Macharis & Verbeke, 1999)	33 -
Figuur 15 - Opties om verzendingen te transporteren van een oorsprong (O) naar een bestemming (D) (Woxenius, 2007)	38 -
Figuur 16 - Consolidatie van de voorraad (Hall, 1987).....	40 -
Figuur 17 - Consolidatie van voertuigen (Hall, 1987)	41 -
Figuur 18 - Consolidatie in terminals (Hall, 1987).....	41 -
Figuur 19 - Beslissing wanneer verzenden? (Higginson & Bookbinder, 1994).....	42 -
Figuur 20 - Terminals in België.....	55 -
Figuur 21 - Link Brugge - Sint-Truiden (via GoogleMaps).....	71 -
Figuur 22 - Afstand tussen De Panne en Dilsen-Stokkem (via GoogleMaps)	77 -

Lijst met tabellen

Tabel 1 - SWOT-analyse van de verschillende transportmodi (Vannieuwenhuyse, 2003, in Berghmans, 2006).....	- 31 -
Tabel 2 - Aantal gerealiseerde links	- 50 -
Tabel 3 - Aantal gebruikte links.....	- 51 -
Tabel 4 - Geaggregeerde PC-stromen NSTR1 (in ton)	- 51 -
Tabel 5 - Berekening jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijfsstroom.....	- 53 -
Tabel 6 - Gegevens kleine vrachtwagen	- 54 -
Tabel 7 - Gegevens grote vrachtwagen	- 54 -
Tabel 8 - Gegevens trein	- 54 -
Tabel 9 - Gegevens binnenvaart.....	- 55 -
Tabel 10 - Symbolen (gebaseerd op Maes et al., 2011)	- 57 -
Tabel 11 - Specifieke data	- 57 -
Tabel 12 - Overzicht goedkoopste transportketens	- 59 -
Tabel 13 - Hoofdtransport 'Gent – Antwerpen'	- 62 -
Tabel 14 - Aantal verzendingen per jaar.....	- 63 -
Tabel 15 - Consolidatieprocedure	- 63 -
Tabel 16 - Initiële consolidatiegraad = 75%.....	- 65 -
Tabel 17 - Initiële consolidatiegraad = 50%.....	- 66 -
Tabel 18 - Vergelijking consolidatie met vijf of zes links	- 67 -
Tabel 19 - Berekening directe afstand	- 68 -
Tabel 20 - Overzicht geconsolideerde links	- 70 -
Tabel 21 - Transportkost Zeebrugge - Gent	- 72 -
Tabel 22 - Transportkost Gent - Willebroek.....	- 72 -
Tabel 23 - Transportkost Willebroek - Genk	- 72 -
Tabel 24 - Vergelijking link 'Brugge - Sint-Truiden' voor en na consolidatie.....	- 74 -
Tabel 25 - Overzicht overige links.....	- 75 -
Tabel 26 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg klein	- 87 -

Tabel 27 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg groot.....	- 88 -
Tabel 28 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg klein - spoor - weg klein	- 89 -
Tabel 29 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg klein - spoor - weg klein	- 90 -
Tabel 30 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg groot - spoor - weg groot	- 91 -
Tabel 31 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg groot - spoor - weg groot	- 92 -
Tabel 32 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg klein - binnenvaart - weg klein	- 93 -
Tabel 33 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg klein - binnenvaart - weg klein	- 94 -
Tabel 34 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg groot - binnenvaart - weg groot.....	- 95 -
Tabel 35 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg groot - binnenvaart - weg groot.....	- 96 -
Tabel 36 - Hoofdtransport spoor.....	- 97 -
Tabel 37 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - spoor - weg groot.....	- 100 -
Tabel 38 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - spoor - weg groot.....	- 101 -
Tabel 39 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - binnenvaart - weg groot.....	- 102 -
Tabel 40 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - binnenvaart - weg groot.....	- 103 -
Tabel 41 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot.....	- 104 -
Tabel 42 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - spoor - weg groot.....	- 105 -
Tabel 43 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - spoor - weg groot.....	- 106 -

Hoofdstuk 1 - Inleiding

1.1. Praktijkprobleem – omschrijving en situering

In de huidige consumptie-economie is goederentransport onmisbaar geworden. Het is een essentieel element in de economische welvaart van een land. Een brede variëteit aan producten moeten getransporteerd worden in en tussen consumentenmarkten, industriesectoren en internationale handelsnetwerken. Tegelijkertijd moet eveneens rekening worden gehouden met de nadelige impact van het transport, zoals onder andere congestie, milieupollutie, veiligheid et cetera (Samimi et al., 2009).

Door onder meer de toegenomen globalisering, de economische groei en het openstellen van de landsgrenzen is het goederenvervoer de afgelopen jaren sterk toegenomen (Liedtke, 2009). Bedrijven breiden hun logistieke activiteiten zelfs over de landsgrenzen uit. Dit wordt eveneens aangehaald door Hensher en Figliozzi (2007). Zij zeggen dat verbeteringen in technologie en logistieke praktijken een radicale verandering van de distributieketens teweeg hebben gebracht. Efficiënter en goedkoper transport, communicatie- en informatiesystemen hebben geleid tot de uitbreiding van de supply chains en de globalisatie van de wereldeconomie.

Eveneens de bevolkingsstijging, de snelle ontwikkeling van e-commerce en de grotere afhankelijkheid van het productieproces van transport veroorzaken in veel landen goederenbewegingen. Een groot deel van die bewegingen vinden plaats over een lange afstand of zijn zelfs internationale verzendingen (Samimi et al., 2009). Indien de vraag naar goederentransport toeneemt, zal dit nadelig zijn voor de mobiliteit van goederen en personen wanneer de capaciteit geen gelijkaardige toename kent (Chow et al., 2010).

Bedrijven worden steeds meer customer-driven en dergelijke klantgedreven productie- en distributiesystemen hebben geleid tot een hogere vraag naar kortere levertijden, betere betrouwbaarheid, kleinere verzendinggroottes en een verhoogde onzekerheid omtrent de vraag (Hensher & Figliozzi, 2007). Mede om deze redenen en omwille van de verspreide industriestructuur en de hoge dichtheid aan getransporteerde goederen worden vrachtwagens vaak geprefereerd als transportmiddel. Deze stijging in goederenvervoer over de weg leidt niet enkel tot ecologische externaliteiten, zoals een stijging in het energieverbruik, emissies van schadelijke stoffen, verkeerscongestie, lawaai en verkeersonveiligheid, maar het leidt eveneens tot onvoldoende capaciteit en infrastructuur (Liedtke, 2009).

De maatschappij accepteert steeds minder de negatieve effecten van de forse proliferatie in het goederenvervoer. Ironisch genoeg is het net deze maatschappij die de steeds veeleisendere consumenten vertegenwoordigt die het goederentransport doet toenemen (Boerkamps & van Binsbergen, 1999). Het gevaar bestaat nu dat er tijdelijke situaties van totale saturatie zullen optreden die ernstige economische gevolgen kunnen hebben (Macharis & Verbeke, 1999).

Overheden trachten al deze negatieve effecten tegen te gaan door middel van verschillende beleidsmaatregelen, zoals onder andere het promoten van intermodaal transport, verlenen van subsidies en het heffen van tol. Volgens Macharis et al. (2002) kan een modale shift zorgen voor een reductie van de milieuverontreiniging en verkeerscongestie.

Om de gevolgen van dergelijke beleidsmaatregelen te kunnen inschatten is er nood aan goederentransportmodellen die goederenstromen en voertuigstromen kunnen voorspellen, zowel in huidige als in toekomstige situaties (Boerkamps et al., 2007). Wanneer we namelijk de drijfveren van goederenstromen begrijpen, kunnen we toekomstige goederenstromen voorspellen en de impact van diverse beleidsmaatregelen op het goederenvervoer berekenen. Op die manier krijgen beleidsmakers een beter zicht op de manier waarop het goederentransport tot stand komt (Maes et al., 2010).

Dergelijke voorspellingsmodellen worden vaak gebruikt om de transportstromen en -voorwaarden in te schatten die het resultaat zijn van de interactie tussen de vraag naar transport door gebruikers van het transportsysteem en de transportopties die het transportsysteem voorziet voor haar gebruikers (Ben-Akiva et al., 2007).

Volgens de Jong en Ben-Akiva (2008) worden goederentransportmodellen eveneens gebruikt voor het voorspellen van de vraag naar transport op middellange en lange termijn onder verschillende scenario's. Via deze manier kunnen eveneens de verkeersemissies en de verkeersveiligheid voorspeld worden. Het testen van transportbeleidsmaatregelen en het voorspellen van de impact op het transport van de aanleg van nieuw infrastructuur behoren eveneens tot de mogelijkheden.

Bij het bekijken van het goederentransportsysteem merken we op dat veranderingen in productie, handel, voorraad en transport veroorzaakt worden door logistieke principes. Nochtans zijn de goederentransportmodellen nog niet in staat om de effecten van grote veranderingen in logistieke systemen te voorspellen (Tavasszy et al., 2010). Hoewel het belang van een geïntegreerde aanpak van logistiek en transport algemeen erkend wordt in de literatuur maken de meeste huidige goederentransportmodellen een duidelijk onderscheid tussen transport en logistiek (Liedtke, 2009). Logistieke aspecten zoals voorraadbeleid, verzendingsgrootte, consolidatiemogelijkheden en transportmoduskeuze worden in de meeste goederentransportmodellen niet in rekening gebracht. Deze aspecten zijn nochtans gelinkt aan de creatie van goederenstromen (Maes et al., 2011). De

gangbare goederentransportmodellen vertrouwen op geaggregeerde benaderingen die kijken naar de stromen tussen zones en die ongevoelig zijn voor het economisch gedrag op bedrijfsniveau (Chow et al., 2010). Omwille van deze redenen is het beter dat goederentransportmodellen zich focussen op individuele partijen en gebruik maken van een gedesaggregeerde benadering, waarbij er gekeken wordt naar trips en beslissingen op microscopisch niveau. De modellen zijn dan beter in staat om de individuele operationele beslissingen en de interacties van alle partijen met betrekking tot transport en logistiek te modelleren. Op die manier kunnen logistieke beslissingen beter gemodelleerd worden.

1.2. Probleemstelling

1.2.1. CENTRALE ONDERZOEKSVRAAG

Hoewel er de laatste decennia significante logistieke veranderingen zijn doorgevoerd, zoals onder andere Just-In-Time leveringen, ontbreken er in de meeste transportmodellen nog steeds logistieke elementen (de Jong & Ben-Akiva, 2007). Het is dan ook de bedoeling om in deze masterproef te onderzoeken welke logistieke elementen nog kunnen worden opgenomen en in welke mate zij een invloed hebben op de transportmoduskeuze. Meer specifiek zal er gekeken worden naar de invloed die consolidatie heeft op de totale logistieke kosten van een bedrijf. Om dit te onderzoeken zullen we ons baseren op volgende centrale onderzoeksvraag:

“Hoe kan het concept ‘consolidatie van goederen’ worden opgenomen in logistieke goederentransportmodellen?”

Het doel van deze masterproef is dan ook om het concept consolidatie mee in rekening te brengen in de transportmodellen. Dit zal worden uitgevoerd in het praktijkgedeelte van deze masterproef.

1.2.2. DEELVRAGEN

Op basis van bovenstaande centrale onderzoeksvraag zal er eerst en vooral een literatuurstudie worden uitgevoerd en vervolgens een praktijkstudie.

De literatuur die over multimodaal goederenvervoer en totale logistieke kosten handelt, zal grondig onderzocht worden om zo te komen tot een algemeen raamwerk van het probleem. Het is de bedoeling na te gaan wat de literatuur vertelt over dit onderwerp en of er reeds transportmodellen bestaan die rekening houden met de ruimere logistieke context. Zo komen we dan ook tot onze eerste deelvraag:

Welke modellen met betrekking tot het opnemen van logistieke beslissingen en meer specifiek consolidatie zijn reeds beschikbaar in de literatuur?

Vervolgens zullen we in de literatuur op zoek gaan naar een duidelijke omschrijving van wat er nu precies bedoeld wordt met consolidatie en hoe dit concept kan worden opgenomen in goederentransportmodellen. De volgende deelvraag zal dan ook leiden tot een grondige uitwerking van het concept consolidatie:

Wat wordt er precies bedoeld met consolidatie en welke verschillende definities bestaan er?

Uit bovenstaande literatuurstudie zal er uiteindelijk een keuze uit de verschillende definities worden gemaakt. We kiezen een bepaalde omschrijving van consolidatie waar we dan ook de rest van de masterproef mee zullen werken. De literatuurstudie zal voorts uitwijzen welke aspecten onvoldoende onderzocht zijn en welke theoretische modellen er nog ruimte bieden voor verbetering.

Na inzicht te hebben verworven in de literatuur is het tijd om de verworven kennis toe te passen en te onderzoeken in de praktijk. Het is de bedoeling om zelf een conceptueel model uit te werken op basis van gevonden en/of fictieve data. Via een simulatiemodel gaan we na hoe consolidatie kan worden opgenomen in logistieke modellen en of consolidatie een effect heeft op de transportmoduskeuze. Dit gebeurt aan de hand van de derde en laatste deelvraag:

Heeft de mate van consolidatie van goederen een invloed op de transportmoduskeuze?

1.3. Methodologie

Het uiteindelijke doel van deze masterproef is onderzoeken hoe consolidatie kan worden opgenomen in een goederentransportmodel. Om hiertoe te komen zal er zowel een kwalitatief als een kwantitatief onderzoek gevoerd worden.

1.3.1. KWALITATIEF ONDERZOEK

In het eerste deel van de literatuurstudie zullen bestaande goederentransportmodellen onderzocht worden. De focus ligt hierbij voornamelijk op agent-based micromodellen, waarbij de verschillende actoren in de transportmarkt als individuele besluitvormers worden beschouwd. Volgens Liedtke en Schepperle (2004) verklaart de activiteitengebaseerde modellering van goederentransport - waarvan agent-based modellen een onderdeel zijn - hoe individuele operationele beslissingen omtrent logistiek en transport worden genomen. Het doel hierbij is om zo aanwijzingen te verschaffen hoe het gehele transportsysteem zal reageren op transnationale en federale

transportbeleidsmaatregelen. Transportmodellen die logistieke beslissingen en meer bepaald het begrip 'consolidatie' mee opnemen, zullen grondig onderzocht worden. Indien blijkt dat het concept consolidatie wordt opgenomen in bepaalde modellen, zal er gekeken worden op welke manier het wordt opgenomen.

Enkele modellen die van naderbij bekeken zullen worden zijn onder andere het vierstapsmodel, het SMILE-model, het simulatiemodel van Liedtke, het EUNET2.0 model en het Aggregate-Disaggregate-Aggregate (ADA) model. Hoewel het vierstapsmodel niet echt rekening houdt met de integratie van transport- en logistieke beslissingen wordt het wel besproken omdat het de basis vormt voor vele andere transportmodellen, waaronder het ADA-model.

In het tweede gedeelte van de literatuurstudie wordt de logistieke module van het goederentransportmodel onderzocht. Verschillende transportmodi worden besproken en vergeleken met het intermodaal transport. Eveneens het concept van totale logistieke kosten wordt hier verder toegelicht.

Het laatste gedeelte van de literatuurstudie zal het concept 'consolidatie' verder onderzoeken. Verschillende definities en types van consolidatie worden besproken. Verder worden diverse transportnetwerken besproken die gebruikt kunnen worden bij consolidatie van goederen.

1.3.2. KWANTITATIEF ONDERZOEK

Na de literatuurstudie volgt het praktijkgedeelte, waarin er getracht zal worden een logistieke module te ontwikkelen die consolidatie mee opneemt. In deze logistieke module wordt er een gedesaggregeerde benadering toegepast. Dit wil zeggen dat logistieke beslissingen worden gemodelleerd op het niveau van de werkelijke besluitvormer, van één verzender naar één ontvanger (Chow et al., 2010). Om tot de logistieke module te komen worden de geaggregeerde productiestromen getransformeerd naar gedesaggregeerde, jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijfsstromen. De rol die iedere speler in het goederentransportsysteem speelt, wordt zo duidelijk, evenals de interacties tussen de verschillende spelers (Maes et al., 2011).

Het praktijkgedeelte wordt gebaseerd op de logistieke module van het ADA-model. Op basis van deze module zullen we overgaan tot de simulatie van de consolidatiebeslissing van bedrijven. Indien de simulatie van consolidatiebeslissingen wordt toegepast op de 308 gemeenten van Vlaanderen zou dit te veel rekenwerk met zich meebrengen. Daarom zal er een selectie worden gemaakt van enkele gemeenten in de regio Vlaanderen.

In de logistieke beslissingsmodule worden er verschillende transportketens gecreëerd, vooraleer er logistieke beslissingen kunnen worden genomen (Maes et al., 2011). Voor elke transportketen

wordt er een totale logistieke kost berekend waarbij de volgende logistieke elementen zijn opgenomen:

- ▶ bestelkost;
- ▶ voorraadkost;
- ▶ kapitaalkost van de goederen in transit;
- ▶ kapitaalkost van de goederen in voorraad;
- ▶ transportkost.

Op basis van voorgaande totale logistieke kostenfunctie worden de optimale overslaglocaties bepaald binnen elke transportketen. Een probleem waarmee in het praktische gedeelte echter wel rekening moet worden gehouden is dat er voor elke transportketen enkel die overslaglocaties worden behouden die de laagste totale logistieke kost opleveren. Wanneer we echter consolidatie in rekening willen brengen kan het zijn dat deze overslagplaatsen niet langer optimaal zijn (Maes et al., 2011).

Om consolidatiebeslissingen in het model in te voeren zal er gekeken worden of verschillende bedrijven gemeenschappelijke trajecten in een transportketen hebben. Indien dit het geval is, kan er gekeken worden of de ladingen samengevoegd kunnen worden zodat er schaalvoordelen behaald kunnen worden voor beide bedrijven. Het uiteindelijke doel van deze masterproef is niet om tot een finaal model te komen waarbij het logistieke component 'consolidatie' is opgenomen en in alle omstandigheden geldig is. Het is de bedoeling om te kijken of consolidatie een invloed heeft op de keuze van een bepaalde transportketen. Indien dit het geval is, is het nuttig om consolidatie op te nemen in goederentransportmodellen zodat deze nauwkeurigere voorspellingen geven van het effect van bepaalde beleidsmaatregelen.

Hoofdstuk 2 – Literatuurstudie goederentransportmodellen

Transportmodellen zijn een hulpmiddel om de verwachte impact van beleidsmaatregelen van de overheid op de gebruikers van het transportsysteem te schatten (Liedtke & Schepperle, 2004). Al naargelang de gebruikers van het transportsysteem kunnen de transportmodellen worden opgesplitst in twee grote subcategorieën, namelijk modellen voor personenvervoer en goederentransportmodellen.

Deze masterproef handelt voornamelijk over goederentransportmodellen. Het is een feit dat deze modellen gebaseerd zijn op methodes die oorspronkelijk ontwikkeld zijn voor het personenvervoer. Het is zo dat de transportmodellen van het goederenvervoer nog steeds niet zo geavanceerd zijn als de transportmodellen voor personenvervoer (Maes et al., 2010). De goederentransportmodellen zijn in grote mate gebaseerd op methoden die ontwikkeld zijn voor het voorspellen van de vervoersvraag van personen. Nochtans bestaan er grote verschillen tussen personenvervoer en goederenvervoer (Roorda et al., 2010).

Een belangrijk verschil tussen het modelleren van goederentransport en personenvervoer is dat er in een goederentransportsysteem veel meer actoren betrokken zijn (Maes et al., 2010). Bijgevolg moet er met het gedrag van deze individuele besluitvormers rekening worden gehouden. De actoren die het meest voorkomen zijn:

- ▶ verzenders;
- ▶ ontvangers/klanten;
- ▶ carriers/transporteurs;
- ▶ forwarders.

Traditionele goederentransportmodellen hanteren een geaggregeerde, functionele benadering. Dit wil zeggen dat het model zich focust op regio's/zones en hun bruto binnenlands product in plaats van op de individuele logistieke beslissingen (Liedtke & Schepperle, 2004). Het probleem hierbij is echter dat er geen logistieke beslissingen mee worden opgenomen, aangezien deze zich op het gedesaggregeerde niveau bevinden (Maes et al., 2010).

Transportmodellen kunnen gebruik maken van twee verschillende soorten data, namelijk geaggregeerde of gedesaggregeerde data. Geaggregeerde data betekent data die betrekking hebben op een volledige zone/regio. De goederenstromen tussen verschillende zones zijn hier een voorbeeld van. Individuele stromen van bedrijven worden gesommeerd.

Gedesaggregeerde data houdt in dat er voor elk bedrijf afzonderlijk data is verzameld en de analyse op een gedetailleerd niveau kan worden uitgevoerd. Hierbij moet echter wel worden

opgemerkt dat het verzamelen van gedesaggregeerde data veel tijdsintensiever en duurder is dan het verzamelen van geaggregeerde data. Ook het werken met gedesaggregeerde data is veel complexer dan werken met geaggregeerde data (Ortúzar & Willumsen, 1994).

Een continue demografische groei en stijgende economische activiteiten hebben geleid tot een enorme groei van het goederentransport (Chow et al., 2010). Hierbij komt nog dat bedrijven hun activiteiten uitbreiden over de landsgrenzen heen en bedrijven hun activiteiten baseren op klantenbestellingen (pull-logistiek). Deze klantgedreven productie en distributie hebben ervoor gezorgd dat er meer vraag is naar kleinere verzendingen met kortere levertijden, waardoor er een grotere voorkeur is ontstaan voor snelle transportmodi. Dit leidde eveneens tot een grotere onzekerheid omtrent de vraag (Hensher & Figliozzi, 2007). Al deze zaken zorgen ervoor dat er in de transportmodellen ook rekening moet worden gehouden met logistieke elementen zoals onder andere het bepalen van de lotgrootte, welke voorraadpolitiek men moet aanhouden, bestelkosten, levertijden, consolidatiemogelijkheden, et cetera.

Er is bijgevolg een grote behoefte aan modellen die rekening houden met de verschillende relaties in de supply chain, de dynamische aard van het goederenvervoer en logistieke beperkingen om zo goederenstromen op een nauwkeurige manier te kunnen voorspellen (Hensher & Figliozzi, 2007).

Modellen die aan deze behoefte tegemoet komen zijn onder andere agent-based modellen, die een onderdeel zijn van activiteitengebaseerde modellen. Deze modellen focussen zich op elke besluitvormer in het goederentransportsysteem afzonderlijk en dit op een gedesaggregeerd niveau. Zo zijn ze in staat om de individuele operationele beslissingen en hun interacties omtrent logistiek en transport beter te modelleren (Maes et al., 2010). Liedtke en Schepperle (2004) definiëren de activiteitengebaseerde modelleringsbenadering als volgt: *'De activiteitengebaseerde modelleringsbenadering van goederentransport verklaart hoe individuele, operationele beslissingen omtrent logistiek en transport genomen worden, om zo aanwijzingen te geven over hoe het gehele transportsysteem zal reageren op transnationale en federale transportbeleidsmaatregelen.'* Deze modellen geven de link met de economie, de interacties tussen de verschillende actoren en de logistieke elementen, die onlosmakelijk verbonden zijn met het goederenvervoer, beter weer. Zo kunnen er meer realistische en beleidsverantwoorde voorspellingen gemaakt worden.

Het voordeel van modelleren op microniveau is dat het mogelijk is om naar individuele stromen te kijken, van één verzender naar één ontvanger, in plaats van naar geaggregeerde stromen. Op deze manier is men in staat om meer informatie over individuele bedrijfskenmerken en een gedetailleerde weergave van een goederencategorie mee op te nemen in het model dan wanneer geaggregeerde modellen gebruikt zouden worden.

In volgende paragrafen volgt er een bespreking van enkele belangrijke transportmodellen, namelijk het vierstapsmodel, het SMILE model, het simulatiemodel van Liedtke (2009), het EUNET2.0-model en het ADA-model van de Jong en Ben-Akiva (2008).

2.1. Vierstapsmodel

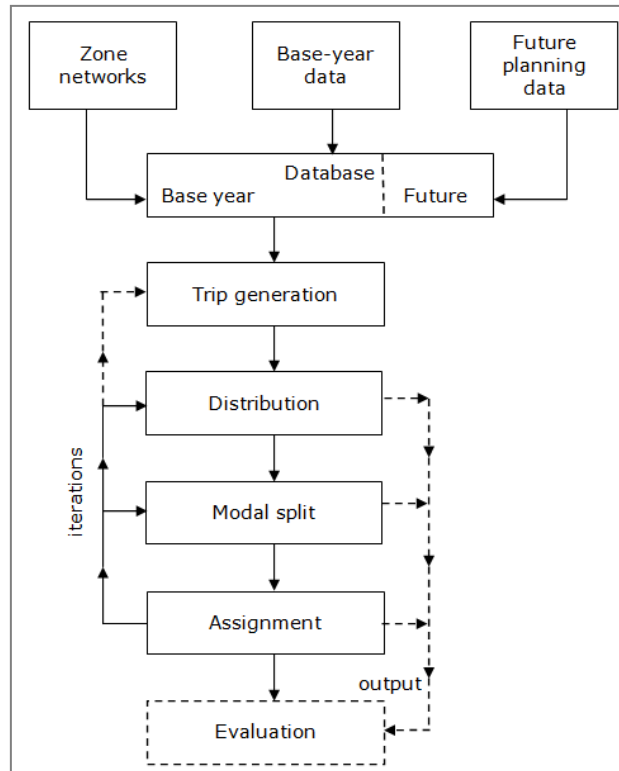
Een transportmodel dat vaak gebruikt wordt voor goederenvervoer is het vierstapsmodel dat haar oorsprong vindt in het personenvervoer. Het doel van dergelijk model is het zo goed mogelijk simuleren van het effect van beleidsmaatregelen op het verplaatsingsgedrag. Het is echter wel zo dat elk van de vier stappen een andere invulling heeft gekregen in vergelijking met het model voor personenvervoer. Dit is niet onverwacht aangezien er grote verschillen bestaan tussen de markten voor goederenvervoer en personenvervoer, zoals reeds werd aangehaald.

De vier stappen van het model zijn:

- ▶ productie en attractie;
- ▶ distributie;
- ▶ modal split / vervoerswijzekeuze;
- ▶ toewijzing.

Een nadeel van dit model is dat deze stappen meestal op het geaggregeerde niveau worden toegepast, waardoor er buiten het transportaspect geen gedragsaspecten worden opgenomen. Hierdoor worden er geen logistieke elementen mee opgenomen bij de keuze van de geschikte transportmodus.

Zoals vermeld in de Jong et al. (2004) wordt dit vierstapsmodel vaak als basis gebruikt voor vele andere verschillende modellen. Daarbij is het zo dat er in de loop der jaren voor elke stap afzonderlijke modellen zijn ontworpen. Vervolgens zullen de vier stappen afzonderlijk besproken worden.



Figuur 1 - Vierstapstransportmodel (Ortúzar & Willumsen, 1994)

2.1.1. PRODUCTIE EN ATTRACTIE

Een vierstapsmodel begint met het identificeren van het totaal aantal goederen dat getransporteerd moet worden van de verschillende herkomstplaatsen naar de verschillende bestemmingen oftewel het aantal trips dat gegenereerd en aangetrokken wordt door elke zone. Deze stap wordt door Ortúzar en Willumsen (1994) 'trip generation' genoemd. Hierbij moet er data verzameld worden omtrent de verschillende types populatie in elke zone alsook data omtrent de economische activiteit in een bepaalde zone en de aanwezige faciliteiten zoals onder andere winkelcentra, scholen, bedrijven, et cetera. De output van deze stap wordt geleverd in termen van aantal ton goederen. Het is echter wel mogelijk dat in een tussenstadium handelsstromen uitgedrukt in monetaire eenheden worden gebruikt. De omzetting van deze stromen naar fysieke stromen in aantal ton kan gebeuren door een bepaalde waarde toe te kennen aan de verschillende goederencategorieën, bijvoorbeeld gewichtsratio's (de Jong et al., 2004).

Volgens Ortúzar en Willumsen (1994) zijn belangrijke variabelen in deze stap het aantal verkopen, het aantal werknemers en de totale oppervlakte van het bedrijf. De auteurs komen tot het besluit dat verschillende soorten producten geen andere transportbehoeften vereisen, aangezien noch de toegankelijkheid, noch de sector van het bedrijf een verklarende variabele is.

2.1.2. DISTRIBUTIE

In de eerste stap wordt het totaal aantal trips geschat van en naar verschillende zones. De uitkomst van de eerste stap geeft een algemeen beeld, maar is onvoldoende voor het modelleren en nemen van beslissingen omtrent transportkeuzes. Daarom is een patroon van de verschillende trips vereist (Ortúzar & Willumsen, 1994). In deze stap worden de goederenstromen (in aantal ton) tussen afzonderlijke herkomstzones en bestemmingszones bepaald. Het resultaat van deze stap is een herkomst-bestemmingsmatrix (origin – destination matrix (OD)), eveneens uitgedrukt in aantal ton. Deze matrix geeft het aantal ton goederen weer dat getransporteerd wordt tussen twee verschillende zones.

Een model dat hier vaak voor gebruikt wordt is het zwaartekrachtmodel. Een zwaartekrachtmodel tracht om het goederenvervoer tussen verschillende knooppunten in een transportnetwerk te voorspellen en te verklaren. De simpelste vorm van het zwaartekrachtmodel is weergegeven in de volgende vergelijking:

$$T_{ij} = \frac{K \cdot P_i \cdot P_j}{d_{ij}^n}$$

met:

- T_{ij} = een maatstaf voor het verkeer tussen zone i en j
- P_i en P_j = de populaties van de twee knooppunten
- d_{ij} = de afstand tussen de twee knooppunten
- K = proportionele factor
- n = constante

Aangezien het effect van afstand beter gemodelleerd kan worden door een dalende functie van de afstand of reiskost tussen de zones, werd het model verder veralgemeend tot volgende vergelijking: $T_{ij} = \alpha \cdot O_i \cdot D_j \cdot f(c_{ij})$, met $f(c_{ij})$ als een algemene functie van de reiskosten. Deze functie geeft weer dat men ontmoedigt wordt verder te reizen als de afstand (tijd) of kosten stijgen. Een populaire versie van deze functie is de exponentiële functie $f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij})$ (Ortúzar & Willumsen, 1994).

Een voorbeeld van een zwaartekrachtmodel wordt gegeven door Immers en Stada (2011). De herkomst-bestemmingsmatrix (HB) vertrekt steeds van de totale goederenstromen vertrekkend van of aankomend in een bepaalde zone. Dit worden de randvoorwaarden genoemd, aangezien de randen van de matrix de producties en attracties bevatten die voorspeld zijn aan de hand van een productie en attractiemodel. Het doel is nu de tabel verder aan te vullen zodat 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 2 - Randvoorwaarden in een Herkomst-Bestemmingsmatrix (Immers & Stada, 2011)

Vervolgens hangen de verplaatsingen tussen herkomsten O_i en bestemmingen D_j af van bepaalde weerstanden of beperkingen. Dit kunnen kosten, gereisde tijd, afstand, et cetera. zijn.

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 3 - Weerstanden zwaartekrachtmodel (Immers & Stada, 2011)

In dit voorbeeld gebruikt men het aantal minuten dat er gereisd mag worden tussen herkomst i en bestemming j . Een voorbeeld is dat er tussen herkomstplaats 2 en bestemming 2 (c_{22}) drie minuten gereisd wordt.

Vervolgens wordt er een distributiefunctie volgens het type $T_{ij} = a_i \cdot b_j \cdot \exp(-\beta \cdot c_{ij})$ gekalibreerd uit een basismatrix. In dit voorbeeld is dit: $F(c_{ij}) = e^{-0.1c_{ij}}$. Hierna kan er een startmatrix worden opgesteld die de verhoudingen weergeeft tussen het aantal verplaatsingen in elke cel van de te schatten HB-matrix.

Startmatrix $F(c_{ij}) = \exp(-0.1 \cdot c_{ij})$						
	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 4 - Startmatrix opgevuld met waarden van distributiefunctie (Immers & Stada, 2011)

Om de uiteindelijke HB-matrix te verkrijgen, wordt er op deze startmatrix het Furness iteratieproces toegepast. Dit iteratieproces werkt volgens het volgende principe:

In de eerste stap wordt elke coëfficiënt in een rij vermenigvuldigd met een groeifactor $\frac{O_i}{\sum_j}$. Voor rij 1 bijvoorbeeld, is de groeifactor gelijk aan $\frac{400}{1,35} = 296,30$. Vervolgens worden alle waarden in deze rij vermenigvuldigd met deze factor.

Na de eerste stap zal blijken dat de kolomtotalen niet meer overeenstemmen met de verwachte attracties. Daarom wordt elke coëfficiënt in een kolom vermenigvuldigd met een groeifactor $\frac{D_j}{\sum_i}$. Bijvoorbeeld voor kolom 1 is de groeifactor gelijk aan $\frac{260}{1,34} = 194,03$. Vervolgens worden alle waarden in deze kolom vermenigvuldigd met deze factor.

Na deze stap zal duidelijk worden dat er nieuwe groeifactoren voor de rijen berekend zullen moeten worden. Dit proces zal herhaald worden totdat de groeifactoren voor rijen en kolommen gelijk zijn aan 1,0.

Het resultaat van dit proces wordt in volgende matrix getoond:

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 5 - Uitkomst HD-matrix (Immers & Stada, 2011)

2.1.3. MODAL SPLIT / VERVOERSWIJZEKEUZE

In deze stap krijgen de goederenstromen een bepaalde transportmodus toegekend. Dit resulteert in een modal split, waarbij de afzonderlijke trips tussen zones verschillende transportmodi krijgen toegekend. Vaak is het ook afhankelijk van het transportmodel welke transportmodi beschikbaar zijn. Het model van Liedtke bijvoorbeeld neemt enkel vrachtwagens mee op in zijn model.

De transformatie van goederenstromen naar voertuigstromen hangt af van vele logistieke beslissingen zoals onder andere de verzendingsgrootte, verzendingsfrequentie, ladingen die terugkomen en de gebruikspercentages van de voertuigen (de Jong et al., 2004). Deze transformaties kunnen gebeuren in afzonderlijke logistieke modules, zoals bijvoorbeeld in het SMILE model dat later nog besproken zal worden. Vaak worden ook vaste conversiefactoren gebruikt.

De transportmoduskeuze is volgens Ortúzar en Willumsen (1994) het belangrijkste element in de planning en het beleid van transport. De transportmoduskeuze heeft een invloed op de algemene efficiëntie waarmee er gereisd kan worden, zoals bijvoorbeeld het al dan niet bestaan van congestie op een bepaald traject.

Het is belangrijk om modellen te ontwikkelen en te gebruiken die rekening houden met transportvariabelen die de individuele transportmoduskeuze beïnvloeden. De factoren die de keuze omtrent een transportmiddel beïnvloeden kunnen worden ingedeeld in drie groepen. Ten eerste betreft dit de kenmerken van de persoon die het traject uitvoert, vervolgens wordt de transportkeuze sterk beïnvloed door kenmerken van de trip. De laatste groep bevat de kenmerken van de transportfaciliteit, dewelke nog verder kan worden opgesplitst in kwantitatieve of kwalitatieve factoren. Voorbeelden van kwantitatieve factoren zijn onder andere de relatieve

reistijd of relatieve kost. Voorbeelden van kwalitatieve factoren zijn betrouwbaarheid, veiligheid, bescherming en regelmaat (Ortúzar & Willumsen, 1994).

de Jong et al. (2004) geeft aan dat er voor deze stap zowel geaggregeerde als gedesaggregeerde modellen gevonden kunnen worden.

2.1.4. TOEWIJZING

Tussen een herkomst en een bestemming zijn er vaak verschillende routes mogelijk. In de toewijzingsstap worden de verplaatsingen tussen de herkomsten en bestemmingen, zoals weergegeven in de HB-matrix, toegewezen aan mogelijke routes op het netwerk. Deze toewijzing gebeurt per transportmodus afzonderlijk. Het finale resultaat van deze stap geeft de vervoersstromen weer op de schakels (tussen twee knooppunten) van de verschillende netwerken (Immers & Stada, 2011). Momenteel zijn er algoritmes en GIS-software beschikbaar om complexe netwerk optimalisatieproblemen op te lossen zodat routes worden toegewezen aan de diverse transportmodi (Hillier & Lieberman, 2010).

Elk toewijzingsmodel bevat een aantal stappen. Eerst moeten er routes gevonden worden die aantrekkelijk zijn voor verkeersdeelnemers. Vervolgens moeten geschikte porties van de HB-matrix worden toegewezen aan deze routes en tenslotte moet er naar convergentie gezocht worden. Toewijzingsmodellen die vaak gebruikt worden zijn de evenwichtstoedeling en het *alles of niets* toedelingsmodel (Ortúzar & Willumsen, 1994).

De *alles of niets* methode wijst alle verplaatsingen toe aan één route. Deze methode houdt geen rekening met congestie-effecten en gaat ervan uit dat elke verkeersdeelnemer elke weerstand van elke mogelijke route kent en deze eveneens op dezelfde manier beoordeeld. Hierdoor worden alle verkeersdeelnemers toegewezen aan één enkele route. De verplaatsingen in de HB-matrix worden per relatie (herkomst-bestemming) toegewezen aan de kortste route voor die relatie. De belangrijkste functie van deze methode is dat ze gebruikt kan worden als een bouwsteen in meer geavanceerde toewijzingsmethodes (Immers & Stada, 2011).

Een reden waarom het verkeer tussen een bepaald herkomst-bestemmingspaar zich opsplitst over meerdere routes is dat de reistijd, en bijgevolg de weerstand van een aanvankelijk kortste route, groter wordt van zodra er verkeer op komt. Dit fenomeen wordt mee in beschouwing genomen in de evenwichtstoedeling. Als de weerstand langs een route toeneemt tot het punt waar die route niet meer de snelste route zou zijn, zullen sommige verkeersdeelnemers een alternatieve route kiezen. Uiteindelijk ontstaat er een evenwicht dat door Wardrop geformuleerd werd als het eerste principe van Wardrop: *"Het verkeer verdeelt zich zodanig over de schakels van een netwerk dat een evenwicht ontstaat waarin geen individuele verkeersdeelnemer zijn reisweerstand kan*

verminderen door het kiezen van een andere route". Dit wil dus zeggen dat in de evenwichtssituatie alle gebruikte routes tussen een bepaalde herkomst en bestemming dezelfde weerstand hebben en niet gebruikte routes een hogere weerstand hebben (Immers & Stada, 2011). Dit principe beschrijft de verkeersstromen die ontstaan als iedere gebruiker op individuele basis streeft naar minimalisering van zijn reisweerstand. Er bestaat evenwel een tweede principe van Wardrop waarbij de totale systeemweerstand geminimaliseerd wordt. Dit principe is bedoeld voor transportplanners en ingenieurs die proberen het verkeer zo te regelen dat de reiskosten geminimaliseerd worden en er een optimaal sociaal evenwicht bereikt wordt (Ortúzar & Willumsen, 1994).

2.1.5. CONCLUSIE

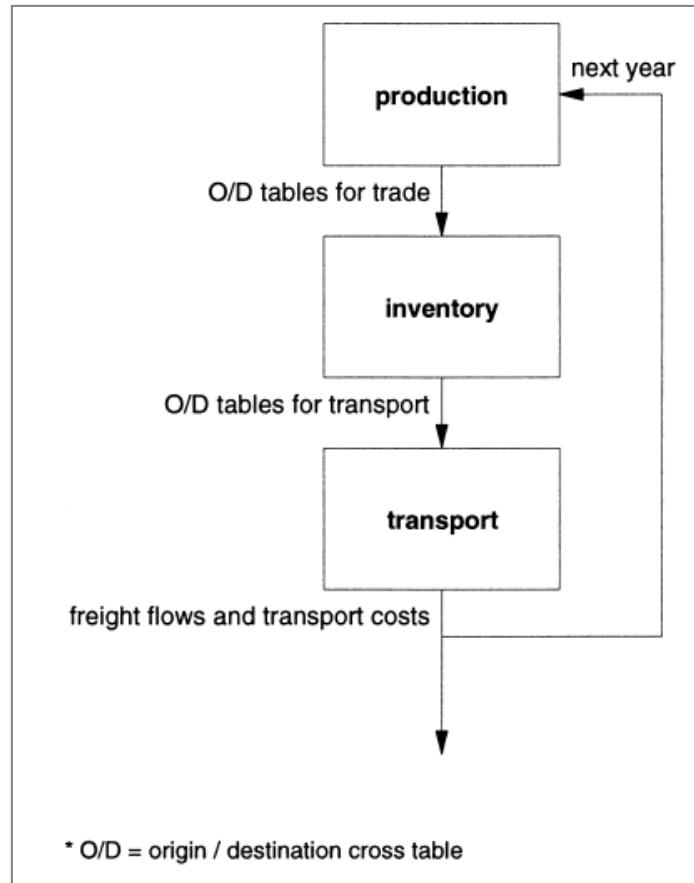
Het nadeel met geaggregeerde modellen zoals het vierstapsmodel is dat ze ongevoelig zijn voor het economisch gedrag op het niveau van bedrijven die handelen als individuele besluitvormers (Chow et al., 2010). Het vierstapsmodel is niet in staat om op een realistische manier rekening te houden met voertuigactiviteiten. Daardoor zijn er activiteitengebaseerde transportmodellen ontstaan waarbij er meer rekening wordt gehouden met de individuele beslissingen van de actoren in de goederentransportmarkt. Hierdoor ontwikkelen er zich modellen die logistieke beslissingen mee opnemen zodat ze beter rekening houden met het effect van beleidsmaatregelen.

Volgende modellen zijn activiteitengebaseerde modellen die rekening houden met de individuele besluitvormers en die logistieke beslissingen mee opnemen.

2.2. Strategic model for integrated logistic evaluations (SMILE)

Tavasszy et al. (1998) ontwikkelden het SMILE model om te begrijpen hoe socio-economische trends invloed hebben op de prestatie van transport- en logistieke systemen en eveneens om manieren te vinden om de prestatie van de systemen te meten zodat ze beleidsmaatregelen kunnen analyseren. Het SMILE model is een model op nationaal niveau dat voorspellingen van goederenstromen genereert voor een groot aantal producten en transportmodi. Het oorspronkelijk doel van dit model was een beter zicht te krijgen op toekomstige ontwikkelingen in goederenstromen die gebruik maken van de Nederlandse vervoersinfrastructuren (Tavasszy et al., 1998). Een nadeel van dit model is dat het een geaggregeerd model is, waardoor logistieke keuzes enkel worden opgenomen voor geaggregeerde goederenstromen (Friedrich & Liedtke, 2010).

Het model omvat logistieke ketens op drie niveaus, namelijk productie, voorraad en (multimodaal) transport. De drie niveaus vormen drie stappen die herhaald worden in een cyclisch simulatieproces, zoals aangetoond in figuur 6. Elke cyclus omvat een tijdsspanne van één jaar.



Figuur 6 - Simulatiemodellering (Tavasszy et al., 1998)

2.2.1. PRODUCTIENIVEAU

Het eerste niveau behandelt de link tussen productieactiviteiten binnen productketens. Hier worden make/use tabellen gebruikt die een productiefunctie voor elke sector creëren. Deze tabellen zorgen ervoor dat het duidelijk is welke productiefactoren verbonden worden met welke activiteit van elke sector evenals de goederen die geproduceerd en geconsumeerd worden. Deze tabellen geven eveneens het locatiepatroon van zowel productie als consumptie weer (Tavasszy et al., 1998).

2.2.2. VOORRAADNIVEAU

In dit niveau gebeurt de modellering van voorraad in de distributieketens. Distributieketens worden beschreven door een logistiek keuzemodel waarbij er keuze is tussen een aantal verschillende configuraties die gekenmerkt worden door het aantal en de locatie van distributiecentra. De berekening van de voorraadketens gebeurt in twee stappen. Eerst wordt er voor elk herkomst/bestemmingspaar de optimale locatie bepaald voor mogelijke distributiecentra, rekening houdend met de mogelijke kanalen. Deze toewijzing gebeurt aan de hand van de criteria lead time,

nabijheid van de hoofdactiviteit, beschikbare transportmodi en logistieke kosten zoals voorraad en behandeling van goederen en transport. Vervolgens worden stromen toegekend aan de verschillende kanalen op basis van het totale logistieke kostenconcept (Tavasszy et al., 1998).

Of er al dan niet voorraden zullen zijn (opgeslagen in een distributiecentrum) hangt af van de mogelijkheden om goederenstromen te combineren van een herkomst naar meerdere bestemmingen (de Jong et al., 2004).

2.2.3. TRANSPORTNIVEAU

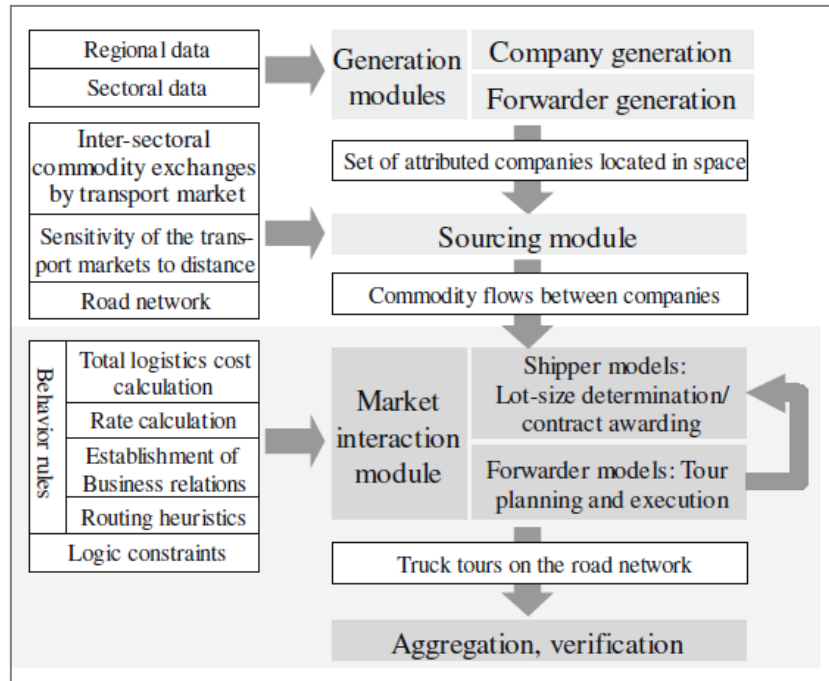
Het derde niveau omvat de beweging en overslag van goederen binnen (multimodale) transportketens. Een multimodaal netwerk met zes transportmodi is beschikbaar. Er zal een optimale route gezocht worden voor elk type product en voor elk element in de logistieke keten. De keuze omtrent transportmodus en leverroute vindt hier simultaan plaats (de Jong et al., 2004).

2.3. Simulatiemodel van Liedtke

In het simulatiemodel van Liedtke (2009) worden logistieke structuren gecreëerd door middel van simulatie, in plaats van geaggregeerde data te gebruiken. Dit model werd ontwikkeld om het lange-afstandstransport in Duitsland te modelleren. Het simulatiemodel maakt hierbij gebruik van het INTERLOG-systeem, dat een veiling van transportcontracten simuleert om zo tot beslissingen omtrent verzendingsgrootte en tourconstructie te komen. Op die manier worden de logistieke beslissingen van verzenders en transportbedrijven, die met elkaar in interactie staan en hun winsten maximaliseren, opgenomen. Het simulatiesysteem genereert een groot aantal afzonderlijke vrachtwagenritten als gevolg van de herhaaldelijke interactie tussen verzenders, transporteurs en carriers. Deze actoren handelen allemaal volgens de minimale kostenstrategie. Verder moet worden opgemerkt dat in dit model enkel wegverkeer wordt beschouwd.

Vervolgens zullen de verschillende activiteitengebaseerde modules van het INTERLOG goederentransportsysteem besproken worden, namelijk de generatiemodule, de sourcingmodule en een marktinteractiemodule.

Op basis van beschikbare data genereert de eerste module locatiepatronen van heterogene bedrijven in de ruimte. In de tweede module worden er relaties tussen leverancier en ontvanger opgesteld en de bedrijven bepalen de vraag naar geleverde goederen. Uiteindelijk worden in de laatste module goederenstromen omgezet naar verzendingen en transportcontracten worden toegekend aan transporteurs, zodat levertours geconstrueerd kunnen worden. Een voorstelling van dit proces is terug te vinden in figuur 7.



Figuur 7 - INTERLOG simulatiemodules (Liedtke, 2009)

2.3.1. GENERATIEMODULE

Het doel van deze eerste module is het creëren van een fictieve industrie, waarbij volgende kunstmatige besluitvormers worden opgenomen:

- ▶ verzenders;
- ▶ ontvangers;
- ▶ transportbedrijven.

Een Monte Carlo algoritme produceert het locatiepatroon van de verschillende spelers in de markt. Dit gebeurt op basis van beschikbare data op nationaal niveau over de verdelingen van bedrijfsgrootte en op basis van data over het aantal werknemers per sector en per regio.

Het Monte Carlo algoritme bevat volgende stappen:

- ▶ Een sequentieel Monte Carlo algoritme genereert het ene bedrijf na het andere, waarbij de sector van het bedrijf bepaald wordt aan de hand van een kansverdeling.
- ▶ Vervolgens wordt de grootte van het nieuwe bedrijf bepaald.
- ▶ Een branch-and-bound algoritme wordt toegepast om elk bedrijf te plaatsen in een geografische zone. Aan elke branch controleert het algoritme of de bedrijfsgrootte kleiner is dan de beschikbare structurele data op dit regionale niveau (Liedtke, 2009).

De verdeling van bedrijven in de ruimte is het resultaat van deze module. De bedrijven zijn toegekend aan de zijde van de goederentransportvraag of aan de zijde van het leveren van de transportdiensten.

2.3.2. SOURCING MODULE

Deze module geeft de keuzes van leveranciers weer en de uitwisseling van goederenstromen (in aantal ton per jaar) tussen de actoren van de transportvraagzijde op microniveau. In deze stap worden de productie en attractie van de goederenstromen bepaald. Vervolgens gaat een algoritme een pull-benadering simuleren. De keuze van leveranciers voor elk bedrijf wordt gegenereerd door een Monte Carlo algoritme. Hierna worden de noodzakelijke hoeveelheden goederen verdeeld onder de leveranciers. De resulterende microscopische goederenstromen worden bepaald door middel van een Monte Carlo algoritme dat automatisch rekening houdt met de productie- en attractiebepalingen (Liedtke, 2009).

2.3.3. INTERACTIEVE TRANSPORTMARKTSIMULATIE

Deze module geeft weer hoe verzenders de microscopische goederenstromen opsplitsen in afzonderlijke verzendingen. Vervolgens worden deze individuele verzendingen toegekend aan forwarders via een transportmarkt. Dergelijke acties gebeuren volgens een kostenminimaliserende strategie, zodat het hele gesimuleerde systeem in een dynamisch evenwicht terechtkomt.

In dit model gaan verzenders contracten op middellange termijn aan met transportbedrijven. Dergelijke bedrijven voeren deze taken dagelijks uit. Het model kan worden opgesplitst in twee niveaus (Liedtke, 2009);

- ▶ tactische beslissingen omtrent tijdelijke stabiele overeenkomsten en relaties tussen bedrijven;
- ▶ een niveau van operationele en gecombineerde dagelijkse planning.

Op het eerste niveau worden de contracten omtrent de transportvraagzijde onderhandeld en afgesloten. Hier wordt de contractprijs en verzendingsgrootte onderhandeld. Het bepalen van de optimale verzendingsgrootte gebeurt aan de hand van de totale logistieke kostenfunctie die volgende logistieke elementen mee opneemt: verzendingsgrootte, berekeningsperiode, microscopische goederenstroom, opslagkost per eenheid (inclusief de kapitaalkost), de bestelkost, de kost van materiaalbehandeling en de transportkost.

Het tweede niveau omvat zowel de coördinatie van deze contracten door middel van het opstellen van een leverplanning als de realisatie van de transporten in een beperkte omgeving. Een planningsprobleem dat vaak terugkomt bij goederentransport is het opnemen van nieuwe

leverpunten in een bestaande leverroute. Er bestaan evenwel algoritmen om nieuwe leverpunten in een bestaand routeplan mee op te nemen (Liedtke, 2009).

2.4. EUNET2.0

EUNET2.0 is een geïntegreerd regionaal economisch goederentransportmodel voor de Trans-Pennine Corridor in het noorden van Engeland. Het model neemt enkel het wegverkeer en het spoorverkeer op als mogelijke transportmodi. Het doel van dit model is de toekomstige goederenstromen te modelleren, waarbij rekening wordt gehouden met logistieke beslissingen en economische transacties.

EUNET2.0 maakt gebruik van een ruimtelijk input-ouput model en splitst de goederenstromen van de initiële producent naar de finale consument op in een aantal logistieke stadia voor de verschillende productcategorieën. Er ontstaat bijgevolg een schatting van een groot aantal herkomst-bestemmingsmatrices per productcategorie en distributiestadium. Consolidatiecentra, nationale en regionale distributiecentra en grote havens worden eveneens mee opgenomen. Impacts afkomstig van logistieke operaties en van de regionale en nationale economie op de goederenvraag kunnen zo worden gesimuleerd. De expliciete weergave van de logistieke stadia maakt een duidelijk onderscheid tussen grote en regelmatige bewegingen van de producent naar de distributiecentra en de verspreide, tijdsgevoelige bewegingen naar individuele, finale klanten (Jin et al., 2005).

Het model verbindt het patroon van goederenvraag met het onderliggende ruimtelijke patroon van economische transacties in Engeland. Hierdoor ontstaat er een transparante relatie tussen de groei van het goederenvervoer en de economische activiteit. Verder geeft het model de belangrijkste logistieke stadia van het goederentransport expliciet weer. Een voorbeeld van de beweging van voedsel en geproduceerde consumentenproducten wordt gegeven in Jin et al. (2005). Eerst worden de goederen vervoerd van de producent naar een consolidatiecentrum. Vervolgens gaan de producten van deze terminal naar een regionaal distributiecentrum. Van hieruit gaan de goederen naar supermarkten, waarna ze vervolgens bij de eindconsument terechtkomen.

De complexiteit van de verschillende logistieke ketens verschilt voor elke productcategorie, aangezien het aantal keer dat de goederen verplaatst worden tussen productie en consumptie (bewerkingsfactor) varieert tussen de productgroepen. In dit model is het ontwerp van de logistieke ketens gebaseerd op de gemiddelde bewerkingsfactoren van Engeland en op basis van inzicht in de logistieke ketenorganisatie gepubliceerd door een aantal bronnen. De toewijzing van goederenstromen aan de verschillende soorten logistieke ketens gebeurt aan de hand van een ruimtelijk input-output model.

Een nadeel van dit model is dat het op een geaggregeerd niveau plaatsvindt, waardoor er veel kostbare informatie over logistieke beslissingen op het niveau van individuele bedrijven verloren gaat.

2.5. ADA-model

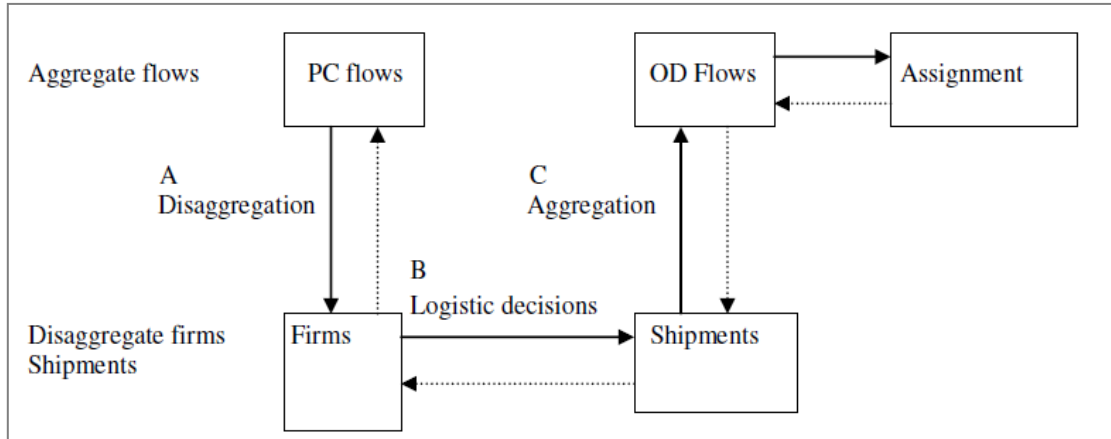
Het Aggregate-Disaggregate-Aggregate model werd in eerste instantie ontwikkeld als nationaal goederentransportmodel voor Noorwegen en Zweden. Het belangrijkste doel van dit model is het opnemen van logistieke elementen bij het modelleren van het nationaal goederenvervoer (de Jong & Ben-Akiva, 2007). de Jong en Ben-Akiva (2007) willen deze logistieke elementen mee in rekening brengen omwille van de recente logistieke veranderingen zoals onder andere Just-In-Time leveringen. De voordelen van een gedesaggregeerd model zijn volgens de Jong en Ben-Akiva (2008) dat deze modellen gebaseerd kunnen zijn op gedragstheorieën, ze meer gedetailleerde en beleidsrelevante variabelen kunnen opnemen en ze niet lijden aan de geaggregeerde vertekeningen van geaggregeerde modellen.

Het model is een transportmodel dat op internationaal, nationaal of regionaal niveau kan toegepast worden. Dergelijke modellen worden volgens de Jong en Ben-Akiva (2008) gebruikt voor verschillende doeleinden zoals:

- ▶ voorspelling van de vraag naar transport op middellange tot lange termijn en onder verschillende scenario's;
- ▶ testen van beleidsmaatregelen in transport;
- ▶ voorspellen van de impact van een nieuwe infrastructuur op vervoer.

Data is voornamelijk beschikbaar op geaggregeerd niveau, waardoor zowel de productie- en consumptiestromen als het netwerkmodel gedefinieerd worden op een geaggregeerd niveau. Tussen deze geaggregeerde modules bestaat er een logistiek model dat de keuze van verzendingsgrootte en transportketen verklaart evenals de keuze van transportmodus voor elk component van de transportketen. Dit model maakt gebruik van gedesaggregeerde data op bedrijfsniveau (de Jong & Ben-Akiva, 2008) en is bijgevolg gespecificeerd op het niveau van de besluitvormer, van één verzender naar één ontvanger.

Vervolgens wordt de structuur van het ADA-model kort toegelicht aan de hand van figuur 8.



Figuur 8 - ADA-structuur (de Jong & Ben-Akiva, 2008)

Het ADA-model maakt eerst gebruik van een geaggregeerde module waarin de productie-consumptie stromen worden bepaald. Vervolgens gaat men op een gedesaggregeerd niveau een aantal logistieke beslissingen modelleren zodat er een herkomst/bestemmingsmatrix (origin-destination, OD) wordt bekomen. Uiteindelijk worden de OD-stromen op bedrijfsniveau geaggregeerd naar OD-stromen op zoneniveau. Dit verschaft de input aan de toekenningsmodule, waar de zone-naar-zone OD-stromen worden toegewezen aan de netwerken van de verschillende transportmodi (de Jong & Ben-Akiva, 2008).

De focus ligt vooral op de logistieke, gedesaggregeerde module waar er logistieke beslissingen worden genomen door de individuele bedrijven. Het minimaliseren van de totale logistieke kosten bepaalt welke logistieke beslissingen er genomen moeten worden. De totale logistieke kostenfunctie wordt weergegeven in volgende formule die door de Jong, Ben-Akiva & Baak (2008) wordt omschreven als *'de totale jaarlijkse logistieke kosten G van een goed k, getransporteerd tussen bedrijf m in productiezone r en bedrijf n in consumptiezone s met verzendingsgrootte q, gebruikmakend van logistieke keten l'*:

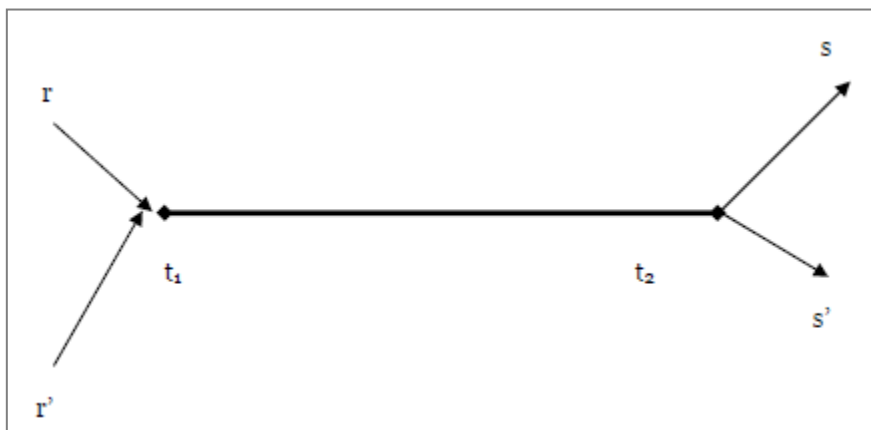
$$G_{rskmnql} = O_{kq} + T_{rskql} + D_k + Y_{rskl} + I_{kq} + K_{kq} + Z_{rskq}$$

met:

- G = totale jaarlijkse logistieke kosten;
- O = bestelkosten;
- T = transport-, consolidatie- en distributiekosten;
- D = kosten van veroudering en schade gedurende de transit;
- Y = kapitaalkosten van goederen gedurende de transit;
- I = voorraadkosten (opslagkosten);
- K = kapitaalkosten van de voorraad;
- Z = stock-out kosten.

Aangezien de focus van deze masterproef ligt op het integreren van het begrip consolidatie in transportmodellen, zal er vervolgens gekeken worden hoe dit concept in het ADA-model wordt opgenomen.

Het is noodzakelijk om de graad van consolidatie te bepalen voor het spoor-, zee-, luchtvervoer of geconsolideerde wegvoertuigen, wil men de totale logistieke kost van transportketens bepalen. Of consolidatie al dan niet plaatsvindt, hangt af van het feit of er voldoende andere ladingen aanwezig zijn op een bepaald OD-traject. Hiervoor zal er gekeken worden naar de totale hoeveelheid goederen binnen bepaalde producttypes die verzonden zullen worden van een overslagpunt naar een ander overslagpunt, zoals te zien is in figuur 9.



Figuur 9 - Verschillende bedrijfs-naar-bedrijfsstromen die éénzelfde traject tussen verschillende overslaglocaties gebruiken (de Jong & Ben-Akiva, 2008)

Een iteratief proces bepaalt de consolidatiegraad. In de eerste iteratie wordt een ladingsfactor van 75 procent gebruikt. Dit wil zeggen dat er voor alle geconsolideerde trajecten van een transportketen wordt aangenomen dat 75 procent van de capaciteit van de transportmodus gebruikt wordt en de verzender moet enkel kosten betalen die proportioneel zijn met de gevulde capaciteit. De waarde van de ladingsfactor wordt in elke iteratie geüpdatet en is afhankelijk van de productcategorie, het gebruikte transportmiddel en het traject t_1 - t_2 . Een procedure van Grønland (2008, in de Jong et al., 2008) werd toegepast om zo verschillende productcategorieën mee op te nemen in eenzelfde transporteenheid.

Het consolidatieproces heeft de neiging om verzendingen toe te kennen aan het grootst mogelijke voertuig binnen een bepaalde transportmoduscategorie. Om dit tegen te gaan wordt er in dit model een beperking geplaatst op de transportmoduskeuze.

Voor elk paar van overslaglocaties (t_1, t_2) wordt elk voertuig onderzocht. Door de jaarlijkse vraag tussen t_1 en t_2 toe te kennen aan een bepaald voertuig, met een vooraf bepaalde ladingsfactor (ϕ),

kan het aantal trips per jaar berekend worden. Als een bepaalde bedrijf-naar-bedrijfsverzending een frequentie vereist die groter is dan de zojuist berekende frequentie wordt de gebruiksrate van het voertuigtype lager gezet dan de vooraf bepaalde ladingsfactor (φ).

Het programma berekent vervolgens de maximumfrequentie f^* volgens de regel van de Economic Order Quantity theorie. Hierna wordt elke frequentie voor een bepaalde verzending geëvalueerd en de transportmodustypes die te groot zijn, worden verwijderd uit de keuze (de Jong et al., 2010).

Hoofdstuk 3 - Logistieke module

In de huidige economie is goederentransport onmisbaar geworden. De keuze van het geschikte transportmiddel is dan ook zeer belangrijk. Het probleem dat zich hierbij stelt, is dat bedrijven zich meestal enkel baseren op de directe transportkosten om deze keuze te maken (Vannieuwenhuysse & Misschaert, 2006). Naast de transportbeslissingen zijn er echter ook logistieke aspecten waarmee men rekening dient te houden. Enkele logistieke elementen die in rekening moeten worden gebracht zijn onder andere het bepalen van de lotgrootte, welke voorraadpolitiek men moet aanhouden, bestelkosten, levertijden, consolidatiemogelijkheden, et cetera. Deze elementen worden in rekening gebracht door het concept 'totale logistieke kosten'. Wanneer bedrijven verschillende transportmodi gaan vergelijken zullen ze expliciet aandacht moeten schenken aan alle kosten in de waardeketen die beïnvloed worden door de keuze van de transportmodus (Vernimmen & Witlox, 2003). Dehayes (1969) benadrukt dit nogmaals door te zeggen dat de vervoerswijzekeuze een directe invloed uitoefent op alle andere componenten van het logistieke systeem.

Een model waarin gebruik gemaakt wordt van het 'totale logistieke kosten' concept is het zojuist besproken Aggregate-Disaggregate-Aggregate (ADA) model van de Jong en Ben-Akiva (2008). Dit model heeft als doel om logistieke modellen mee op te nemen in de modellering van het goederenvervoer. In dit model werd op het gedesaggregeerde niveau reeds vier logistieke beslissingen mee opgenomen, namelijk (de Jong & Ben-Akiva, 2008):

- ▶ De frequentie en de grootte van de verzending;
- ▶ De keuze van de ladingseenheid, meer bepaald het al dan niet gebruik maken van een container;
- ▶ Transportroute: hieronder behoort onder andere het al dan niet gebruik maken van distributiecentra, goederenterminals, havens en/of luchthavens evenals het aantal vertakkingen in de transportketen. Hierbij moet rekening gehouden worden met de beslissing om al dan niet te consolideren.
- ▶ Welke transportmodus er voor elke tak in de transportketen gebruikt zal worden.

Zoals zojuist aangehaald blijkt de keuze van het transportmiddel een significante invloed te hebben op alle andere componenten van het logistieke systeem. Vervolgens zullen de meest voorkomende transportmodi dan ook worden toegelicht.

3.1. Types transportmodi

De belangrijkste transportmodi om goederen te vervoeren zijn het wegverkeer, het spoor, de zee- en binnenvaart, het luchtvervoer en pijpleidingen.

3.1.1. WEGVERKEER

Het wegtransport staat bekend voor haar snel en betrouwbaar transport. Voornamelijk wanneer het korte afstanden betreft, is dit vervoerstype flexibel en goedkoop. Het is niet nodig om goederen op andere transportmodi over te laden. Het betreft hier immers een deur-tot-deur service, waarbij het niet vereist is om te laden en te lossen tussen de herkomstplaats en de bestemming.

Een ander voordeel van wegtransport is dat de goederen overal kunnen geraken zonder gebruik te maken van een andere transportmiddel en dit omwille van het dichte wegennetwerk.

Een nadeel van deze transportmodus is de toenemende congestieproblematiek. Hierdoor ontstaan er vertragingen op de weg. Het weer is eveneens een factor dat kan zorgen voor vertragingen. Dergelijke vertragingen gaan ten koste van de leveringsbetrouwbaarheid. Verder heeft het wegverkeer een grotere negatieve milieu-impact dan de andere vervoersmiddelen. De veiligheid van het wegtransport blijkt tevens lager te liggen dan andere transportmodi, aangezien de kans op een ongeluk groter is.

Vrachtwagens hebben een beperkte capaciteit, waardoor het wegverkeer enkel geschikt is voor het verzenden van kleine leveringen.

Wat betreft de kosten vereisen voertuigen op de weg een relatief lage investeringskost. Doch brengt dit transportmiddel een hoge variabele kost met zich mee. Deze variabele kost bestaat uit arbeids-, brandstof- en belastingkosten. Hierdoor loopt de kost per eenheid hoog op.

3.1.2. SPOOR

Het spoor is voornamelijk geschikt voor het vervoeren van grote hoeveelheden laagwaardige producten tegen een relatief lage snelheid. Deze vervoerswijze blijkt meestal geen goed alternatief voor het wegverkeer. Het spoorvervoer is immers minder flexibel en betrouwbaar dan het wegverkeer.

Verder is het zo dat het goederenvervoer via de trein meestal niet tot op de eindbestemming kan geraken. Hierdoor is het noodzakelijk dat er natransport gebeurt via een ander transportmiddel, vaak via een vrachtwagen. Dit vergt meer tijd en meer overslag, waardoor de kosten stijgen.

Nochtans blijken de twee voorgenoemde transportmodi aan elkaar gewaagd qua snelheid, voornamelijk vanaf middellange afstanden. Een manier om het spoorvervoer flexibeler te maken is via piggyback transport (trailer on flatcar). De vrachtwagen rijdt op de trein en op de bestemming rijdt de vrachtwagen verder naar zijn eindbestemming. Zo kan de transporteur profiteren van de voordelen van beide vervoerstypes, namelijk het gemak en de flexibiliteit van het wegverkeer en eveneens de schaalvoordelen van het spoor (Ballou, 1999).



Figuur 10 - Piggyback transport (Berktoold, E., *Piggyback Transport*, internet, 02-02-2012, <http://www.panoramio.com/photo/7290962>)

De transportkosten van het spoor blijken lager te liggen dan die van het wegvervoer wanneer er grote hoeveelheden goederen over lange afstanden getransporteerd worden.

In tegenstelling tot het wegvervoer is het spoorvervoer een milieuvriendelijke en veilige transportmodus.

3.1.3. WATER

Het watertransport wordt gebruikt om goederen met een lage waarde in grote volumes over grote afstanden te vervoeren. Hoewel de initiële investeringskost zeer hoog is, kunnen er evenwel schaalvoordelen behaald worden door het grote laadvermogen. Binnenvaart is een goedkoop, veilig en milieuvriendelijk transportmiddel.

Het binnenlands watertransport kan enkel gebruikt worden in de mate dat het binnenlands waterwegennetwerk zich uitstrekt. Hierdoor zal er in veel gevallen een voor- en/of natransport gebruikt moeten worden in combinatie met het vervoer over water. Dit zorgt samen met de lage vaarsnelheid en het vaak moeten wachten bij sluisen en bruggen voor een lage transportsnelheid.

In geval van voor- en/of natransport kan er gebruik gemaakt worden van Roll on/Roll off schepen. Het ontwerp van deze schepen zorgt ervoor dat voertuigen er probleemloos kunnen oprijden. Eenmaal op de bestemming aangekomen worden de goederen verder vervoerd over de weg door middel van de vrachtwagens. Dit principe wordt weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 11 - Roll on/Roll off principe (Jurong Port, Roll on, Roll off (Ro-Ro) Facilities, internet, 02-02-2012, <http://www.jp.com.sg/JurongPort/roll-on-roll-off-ro-ro-facilities>)

Een ander nadeel van de binnenvaart is dat de vaarroute eveneens afhankelijk is van het scheepstype dat gekozen wordt. Het is zo dat niet elk schip door de verschillende vaarwegen kan varen omwille van haar afmetingen en meer bepaald haar diepgang.

3.1.4. LUCHTTRANSPORT

Het luchttransport is een duur transportmodus omwille van de hoge variabele kosten. Hierdoor komt het luchtvervoer slechts in een beperkt aantal gevallen in aanmerking als transportmiddel. Dit is het geval voor goederen met een hoge waarde, waarbij de snelheid van leveren essentieel is, zoals onder andere bederfelijke goederen. Het luchtvervoer wordt voornamelijk gebruikt om lange afstanden af te leggen.

Een ander voordeel van het luchttransport is dat goederen minder snel verloren of beschadigd geraken, waardoor er ook een minder beschermende verpakking van de goederen vereist is (Ballou, 1999).

Een nadeel is de betrouwbaarheid van leveren, doordat het luchttransport gevoelig is voor mechanische defecten, weersomstandigheden en congestie. De variabiliteit van levertermijnen blijkt hoger te liggen dan bij andere transportmodaliteiten.

3.1.5. PIJPLEIDING

Het aantal producten dat via pijpleidingen vervoerd kan worden, is zeer beperkt. Hieronder behoren onder andere ruwe olie, aardolie of gezuiverde petroleumproducten. Een ander nadeel is de lage vervoerssnelheid, hoewel dit nadeel afgezwakt kan worden door het feit dat de goederen 24 uur per dag en 7 dagen op 7 getransporteerd kunnen worden (Ballou, 1999).

Desalniettemin biedt dit transportmiddel enkele voordelen. De ondergrondse infrastructuur is volledig afgezonderd van andere soorten infrastructuur. Hierdoor is de kans op schade zeer klein en moet er geen rekening gehouden worden met enige vertragingen. Verder is dit transportmiddel zeer milieuvriendelijk, goedkoop en betrouwbaar.

Ondanks deze voordelen staat de hoge initiële investeringskost het gebruik van dit transportmiddel vaak in de weg.

Volgende tabel geeft de sterktes, zwaktes, bedreigingen en kansen weer van de verschillende transportmodi volgens Vannieuwenhuysse (2003, in Berghmans, 2006).

Tabel 1 - SWOT-analyse van de 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
Bedreigingen	Extra regelgeving	Bedrijfscultuur	Beperkt netwerk	Congestie	Terrorisme
Kansen	Nieuwe logistieke evoluties	Liberalisatie	Politieke prioriteit	Liberalisatie	Nieuwe goederenniches

3.2. Intermodaal transport

Indien een transporteur slechts gebruik maakt van één van bovenstaande transportmodi om zijn goederen op een bepaalde bestemming te krijgen, wordt dit unimodaal vervoer genoemd. Er kunnen echter ook meerdere transportmodi worden ingezet. In dat geval spreekt men van intermodaal transport. Intermodaal transport wordt door Macharis et al. (2002) gedefinieerd als

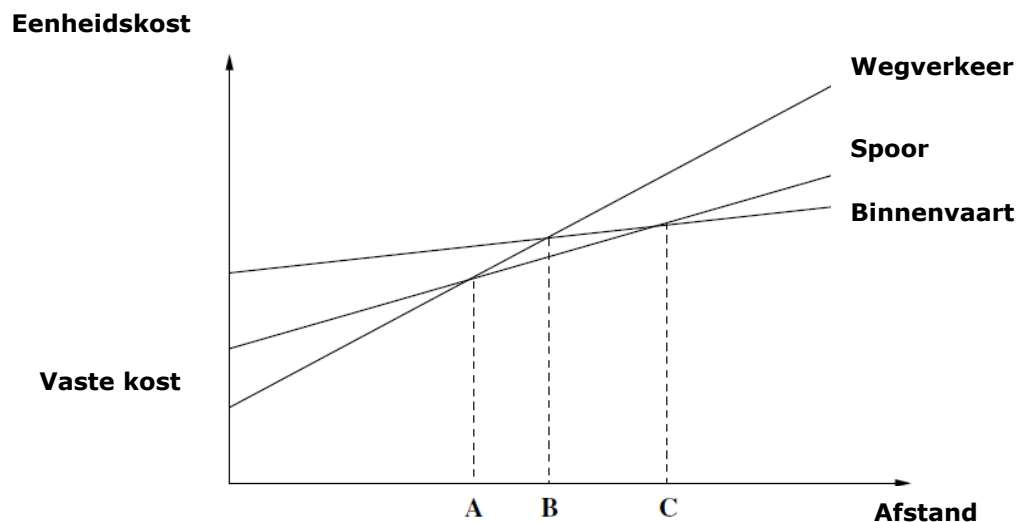
het transport voor gegroepeerd goederenvervoer door middel van meer dan één transportmodus, waarbij de goederen niet van ladingseenheid veranderen. Het hoofdtraject gebeurt per spoor, binnenschip of maritiem schip. Het voor- en natransport gebeurt via de weg en wordt liefst zo kort mogelijk gehouden.



Figuur 12 - Intermodale keten (Macharis & Verbeke, 1999)

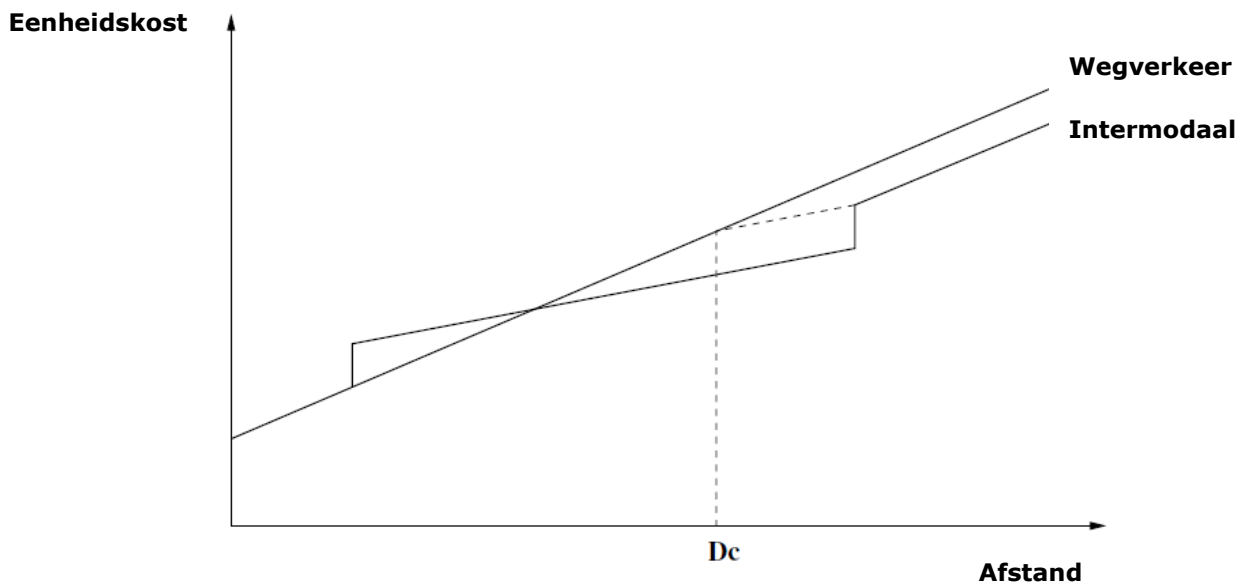
Figuur 12 geeft weer dat een eenheidslading per vrachtwagen naar de meest nabije terminal wordt gebracht. Daar wordt deze lading overgeladen op een andere vervoersmodus. Dit tweede transportmiddel transporteert de lading naar een volgende terminal, waar de lading opnieuw wordt overgeslagen op een vrachtwagen. Via dit transportmiddel worden de goederen tot aan de eindbestemming vervoerd (Macharis & Verbeke, 1999).

Volgens Macharis en Verbeke (1999) varieert de kostenstructuur van de diverse afzonderlijke transportmiddelen al naargelang de afstand die er afgelegd moet worden. De transportkosten bestaan enerzijds uit vaste kosten en anderzijds uit variabele kosten. De vaste kosten bevatten de initiële investeringskosten en werkings- en onderhoudskosten van de transportfaciliteiten (havens, treinstations en intermodale terminals). Deze vaste kosten wegen zwaarder door bij intermodaal transport aangezien er daar meer overslag vereist is. De variabele kosten zoals onder andere de brandstofkosten, tijdskosten, et cetera hangen af van het te transporteren volume. De totale kosten worden weergegeven in figuur 13.



Figuur 13 - Kostenstructuur diverse transportmodi (Höltgen, 1995, in Macharis et al., 1999)

Figuur 13 geeft weer dat zowel de vaste als de variabele kosten variëren voor de verschillende transportmiddelen. Het wegtransport heeft een relatief lage vaste kost, doch de variabele eenheidskost stijgt snel met de af te leggen afstand. Dit komt, zoals reeds aangehaald, doordat dit vervoersmiddel een kleine capaciteit heeft, zeer arbeidsintensief is en veel brandstof verbruikt. De initiële investeringskosten zijn bij het spoorvervoer en binnenvaart veel hoger. De variabele kosten stijgen echter niet zo snel door de aanzienlijke schaalvoordelen die behaald kunnen worden met dergelijke transportmodi (Macharis & Verbeke, 1999). Vanaf welke afstand intermodaal transport de efficiëntste transportvorm is, wordt duidelijk gemaakt in figuur 14.



Figuur 14 - Kostenstructuur intermodaal transport (Macharis & Verbeke, 1999)

De drempelafstand (D_c) in figuur 14 geeft de minimumafstand weer vanaf waar een bepaald transportmiddel goedkoper is dan het wegvervoer. Er kan geen kritische drempelafstand bepaald worden in figuur 13, aangezien er geen rekening wordt gehouden met de overslagkosten en de extra kosten die verbonden zijn aan het voor- en natransport over de weg. D_c geeft het punt aan vanaf welke afstand het intermodaal transport concurrentieel is met het wegvervoer (Macharis & Verbeke, 1999). Dit punt hangt evenwel af van de overslagkost, de hellingsgraad van de curve en de kost van het voor-en natransport. De hellingsgraad van de intermodale curve hangt af van de hoeveelheid goederen die men kan bundelen. Des te meer goederen er geconsolideerd kunnen worden, des te lager de eenheidskost van het intermodaal transport zal liggen.

Of er al dan niet geopteerd wordt voor intermodaal transport is niet enkel afhankelijk van de transportkost. Er zijn nog andere factoren in de praktijk waarmee rekening gehouden moet worden bij de keuze van de transportmodus. Hiertoe behoren onder andere de leveringsbetrouwbaarheid en snelheid, de flexibiliteit en de externe kosten die een transportmiddel met zich meebrengt. In

een intermodale keten zijn er veel meer partijen betrokken dan bij unimodaal transport. Wanneer deze diverse partijen niet goed op elkaar zijn afgestemd kunnen er tevens frictiekosten ontstaan in de vorm van vertragingen, beschadigingen bij overslag, complexe administratieve hinder, et cetera. Hierdoor zal de totale kostencurve van het intermodaal transport naar boven verschuiven.

Een laatste belangrijke kost waarmee rekening moet worden gehouden bij de transportmoduskeuze is de voorraadkost, zodat we tot het concept van de totale logistieke kost komen.

3.3. Totale logistieke kost

De zojuist vermelde kosten betreffen enkel de transportkosten. Hierbij wordt geen rekening gehouden met alle andere logistieke kosten die beïnvloed worden door de keuze van een bepaalde transportmodus. Wanneer alle kosten die ontstaan in de waardeketen en die beïnvloed worden door de transportmoduskeuze mee in rekening worden gebracht, spreekt men over de totale logistieke kosten (Vernimmen & Witlox, 2003).

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

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

met

- TLC = totale logistieke kost van een transportmodus (jaarlijks);
- r = transportkost per eenheid;
- T = totaal getransporteerd volume per jaar;
- u = voorraadkost van goederen in transit (per jaar);
- t = lead time (in jaar);
- a = bestelkost;
- s = gemiddelde tijd tussen verzendingen (in jaar);
- 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.

In deze formule wordt verondersteld dat de transportkosten ($r \cdot T$) niet variëren met het verzendingsvolume of met afstand. De verzendingskost per eenheid is bijgevolg constant. In realiteit ontstaan er schaalvoordelen wanneer de verzendingshoeveelheid stijgt, waardoor de transportkosten per eenheid dalen. De transportkosten zorgen ervoor dat trage transportmiddelen met een grote capaciteit de voorkeur verkrijgen.

Verder worden de voorraadkosten mee opgenomen in de formule. De totale voorraadkosten bevat vier elementen, namelijk de bestelkosten, voorraadkosten van goederen in transit, voorraadkosten en de kosten van een veiligheidsvoorraad.

De bestelkosten (a/s) kunnen gereduceerd worden door het aantal bestellingen te verlagen, waardoor goederen in grote hoeveelheden geleverd zullen worden. Vandaag de dag spelen bestelkosten echter niet meer zo een belangrijke rol. Een tweede manier waarop bestelkosten verlaagd kunnen worden is door het groeperen van meerdere bestellingen. Hierdoor ligt de totale kost lager dan de som van de afzonderlijke bestelkosten. De beslissing om al dan niet te consolideren heeft evenwel een invloed op een hele reeks logistieke kosten. Het toepassen van consolidatie heeft niet enkel een effect op bestelkosten, maar ook op de transportkosten en andere voorraadkosten (Vernimmen & Witlox, 2003).

De voorraadkosten van goederen in transit ($u \cdot t \cdot T$) leggen de voorkeur op het gebruik van snelle transportmodi.

De voorraadkosten ($\frac{w \cdot s \cdot T}{2}$) zijn goederen die wachten om verzonden te worden naar een bestemming. Deze kosten moedigen het gebruik van transportmiddelen met een kleine capaciteit aan. In dat geval zal de gemiddelde tijd tussen verzendingen dalen, waardoor tevens de voorraadkosten dalen.

Een veiligheidsvoorraad wordt aangelegd ter bescherming van vertragingen in leveringen of als anticipatie op veranderingen in het koopgedrag van consumenten. Hierdoor worden negatieve stock-outs vermeden. Des te sneller en betrouwbaarder een transportmodus is, ceteris paribus, des te kleiner de veiligheidsvoorraad moet zijn die moet worden aangehouden en des te lager de kosten van een veiligheidsvoorraad zullen zijn ($w \cdot K \cdot \sqrt{(s+t) \cdot T}$) (Vernimmen & Witlox, 2003).

Voorraadkosten zijn nauw gelinkt aan transportbeslissingen. De afweging tussen voorraadkosten en transportkosten is een zeer belangrijke factor geworden bij de moderne voorraadrends zoals Just-In-Time levering en zero-based voorraadsystemen. Wanneer men de transportkosten wil terugdringen door gebruik te maken van een trage transportmodus met een grote capaciteit, zal men er rekening mee moeten houden dat dit zal leiden tot een stijging in zowel de in-transit voorraadkosten als de voorraadkosten op de bestemming (Blauwens et al., 2008).

3.3.1. ANDERE KOSTEN

In het inventory-theoretic model wordt er voornamelijk gekeken naar de afweging tussen transport- en voorraadkosten. Volgens Blauwens et al. (2008) zijn er echter nog een aantal andere kosten die moeten worden opgenomen om tot het concept van 'totale logistieke kosten' te komen.

Bovenop de transportkosten en de diverse voorraadkosten behoren de overslagkosten, de verpakkingskosten en de customer service kosten eveneens tot de categorie logistieke kosten.

Transportbeslissingen kunnen eveneens een invloed hebben op de overslagkosten, zoals het in- en uitladen van een transportmodus of de vereiste overslag. Voornamelijk wanneer er gebruik gemaakt wordt van intermodaal transport zullen er extra overslagkosten ontstaan.

Beslissingen omtrent de transportmodus hebben ook een effect op de verpakkingskosten. Bulktransport vereist minder dure verpakking dan kleinere leveringen. De keuze tussen weg, spoor, water en luchttransport kan een verschil vereisen in verpakking.

Het niveau van klantenservice kan afhangen van de transportbeslissingen. De klantenservice hangt niet enkel af van de leveringstijden en de kans op stock-outs, maar voornamelijk van de behandeling van goederen en de manier waarop bedrijven omgaan met hun klanten.

Hoofdstuk 4 – Literatuurstudie Consolidatie

4.1. Algemene inleiding

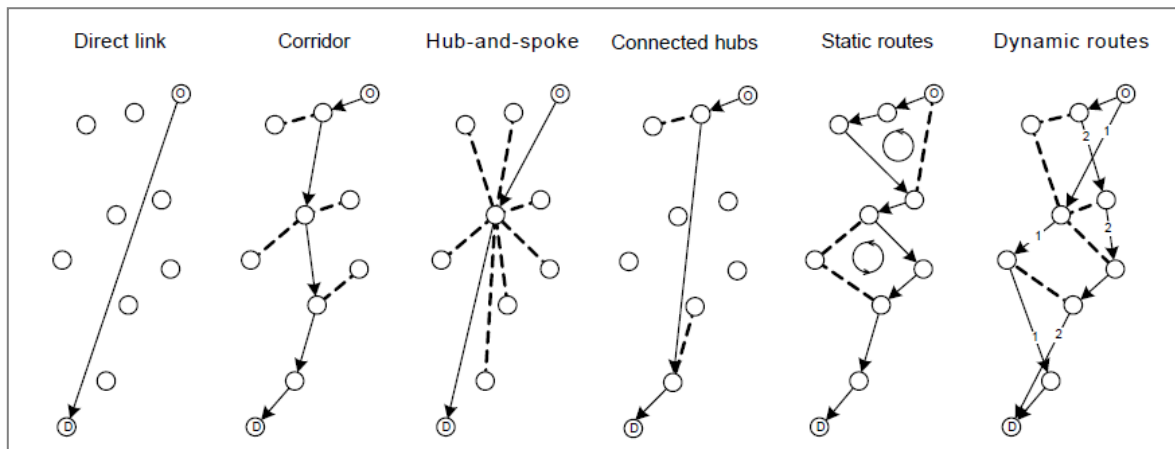
In de literatuur zijn er een aantal definities te vinden voor het begrip consolidatie. Bookbinder en Higginson (2002) definiëren consolidatie als een actieve inspanning om efficiënter gebruik te maken van transportbronnen. Zij geven aan dat goederen niet direct bewegen van een herkomstplaats naar een bestemming, maar dat er ook rekening moet worden gehouden met de economische en praktische haalbaarheid van consolidatie. Macharis et al. (2002) geeft een synoniem voor consolidatie, namelijk 'bundelen' en definieert dit als "een verzameling van goederen om zo een transporteenheid op te vullen". Baykasoglu en Kaplanoglu (2011) definiëren goederenconsolidatie tenslotte als een transportoptie die verschillende items, die op verschillende locaties en verschillende tijdstippen geproduceerd en gebruikt worden, combineert in één enkele lading om zo transportkosten te minimaliseren en het gebruik van voertuigen te maximaliseren.

Volgens Woxenius (2007) hangt de beslissing om te consolideren af van de volgende parameters:

- ▶ **Verzendingsgrootte:** indien men voldoende goederen heeft om een transporteenheid op te vullen, zal er sneller gekozen worden voor een direct transport. Des te groter de verzending is, des te sneller zal een bepaalde transporteenheid gevuld zijn en des te kleiner is de kans dat er geconsolideerd zal worden.
- ▶ **Transportafstand:** des te korter de afstand, des te groter de kans op een direct transport. Indien de afstand groter is, zal er waarschijnlijk meer gebruik gemaakt worden van intermodaal transport, waardoor de kans op consolidatie zal stijgen.
- ▶ **Tijdsvenster:** hoe gedetailleerder dit wordt gespecificeerd, hoe sneller men zal opteren voor een direct transport, zonder consolidatie. Indien er gewerkt wordt met een flexibel tijdsvenster is er meer kans op consolidatie.
- ▶ **Productkenmerken:** hoe specifiek een product, hoe sneller de keuze zal vallen op een directe transportroute. Een voorbeeld hiervan is het transporteren van verse groenten naar een supermarkt. Dit zijn zeer specifieke producten die een transportmiddel nodig hebben dat een koelcel bevat. In dit geval is het moeilijk om deze producten met andere goederen te bundelen.
- ▶ **Beschikbaarheid van andere goederen op de route:** des te minder goederen er beschikbaar zijn op de leverroute, des te sneller men zal opteren voor een direct transport.

Indien een transporteur beslist om verschillende verzendingen te consolideren, doet hij dit meestal systematisch volgens een bepaald ontwerp van een transportnetwerk. Figuur 15 geeft zes

algemene transportnetwerken weer die volgens Woxenius (2007) bij consolidatie van ladingen gebruikt kunnen worden.



Figuur 15 - Opties om verzendingen te transporteren van een oorsprong (O) naar een bestemming (D) (Woxenius, 2007)

4.1.1. DIRECTE LINK

Het transport verloopt direct van de plaats van oorsprong naar de bestemming. Er is geen coördinatie met de andere knooppunten in het netwerk. Dergelijk ontwerp is het meest flexibel en het meest efficiënt in het geval dat er een voldoende grote goederenstroom is voor de vereiste leverfrequentie. Het vervoer gebeurt hier via één transportmiddel, waardoor het transport onafhankelijk is van andere transportmodi. Een voorbeeld van dit ontwerp in goederenvervoer is het transport van een volledig gevulde vrachtwagen of een volledig gevulde treinwagon. Dit ontwerp komt vaker voor bij wegverkeer aangezien de voertuigen op de weg een kleinere capaciteit hebben dan het spoor, waardoor er sneller een volledig gevulde transporteenheid wordt bereikt (Woxenius, 2007).

4.1.2. CORRIDOR

In dit ontwerp wordt er uitgegaan van één hoofdverkeersader met een hoge dichtheid aan verkeersstromen. Verder worden een aantal diensten uitgewisseld met knooppunten die dichtbij deze verkeersader liggen. Dit gebeurt via een aantal korte stops aan tussenliggende knooppunten om zo de volledige transporttijd binnen de perken te houden. Als het transport van de tussenliggende knooppunten te laat aankomt bij de hoofdader zal het waarschijnlijk moeten wachten op het volgend transport. Enerzijds moet er een voldoende hoge frequentie van transport worden aangeboden zodat de klant op een goede manier bediend kan worden. Anderzijds moet er bepaald worden met hoeveel gevulde capaciteit er vertrokken zal worden, rekening houdend met

de verschillende ladingen die er langs de corridor nog bij komen. De verschillende transportmodi proberen samen te werken langs de corridor zodat congestie vermeden wordt. De binnenvaart maakt vaak gebruik van dit ontwerp.

4.1.3. HUB-AND-SPOKE

Dit ontwerp bevat één knooppunt dat als hub wordt aangeduid. Alle transporten verlopen via deze hub. Zelfs wanneer er een transport plaatsvindt tussen een oorsprong en een bestemming die langs elkaar liggen, verloopt dit via de hub. Er zijn slechts twee links nodig om alle oorsprongen en bestemmingen met elkaar te verbinden. Het belangrijkste voordeel van dit ontwerp is de mogelijkheid om een groot aantal herkomsten en bestemmingen met een hoge frequentie met elkaar te verbinden, ook al is de goederenstroom tussen elk O-D paar klein. De hoge opvulgraad van de transportmodi compenseert voor de langere afstanden en de extra overslag van goederen (Woxenius, 2007). Dit ontwerp wordt vaak toegepast in het lucht- en spoorverkeer.

4.1.4. CONNECTED HUBS

Goederenstromen in een bepaalde regio worden verzameld in een hub. Deze hub is vervolgens verbonden met andere hubs in andere regio's. Dit ontwerp wordt ook wel eens een directe link met een regionale consolidatie genoemd. In de verschillende regio's wordt dan weer gebruik gemaakt van een hub-en-spoke ontwerp om de goederen opnieuw te verdelen. Zo behoudt dit ontwerp van connected hubs het voordeel van de directe link alsook het voordeel van consolidatie. Een voorbeeld hiervan is de verzameling van containers in een bepaalde haven, waarna een schip deze containers verscheept naar een andere haven en deze containers hier opnieuw worden verdeeld.

4.1.5. STATISCHE ROUTE

De transporteur ontwerpt een aantal vaste links die hij op regelmatige basis zal gebruiken. Enkele knooppunten worden hier gebruikt als overdrachtpunten langs de leveringsroute. Meestal wordt slechts een deel van de lading overgedragen en blijft de rest van de lading op de transportmodus tot aan het volgende knooppunt. Als de transportmodus volledig gevuld is, kan de route verkort worden, maar moet een extra transporteenheid worden ingeschakeld om de overgebleven ladingen op te vangen. Publiek beschikbare transportdiensten maken vaak gebruik van dit transportontwerp, waarin het transport verloopt via vaste knooppunten en via een vast schema. Voorbeelden hiervan zijn de metro- of busdiensten (Woxenius, 2007).

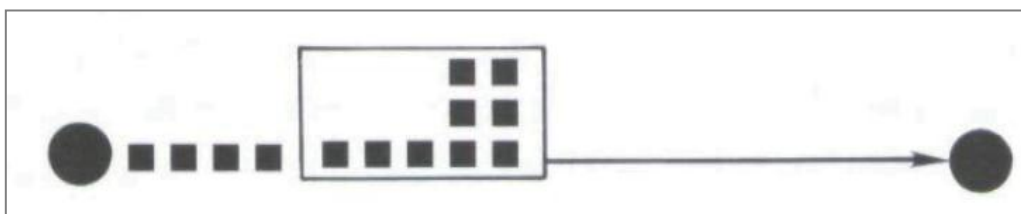
4.1.6. DYNAMISCHE ROUTE

In dit transportnetwerk worden de linken tussen verschillende knooppunten ontworpen aan de hand van de werkelijke vraag. De transporteur kan kiezen tussen verschillende routes tussen herkomst en bestemming. Dit is een zeer flexibel netwerk waarbij zowel de leveringsroutes als de vertrek- en aankomsttijden frequent kunnen veranderen. Zeer belangrijk bij het planningsproces is het tijdig verzamelen en verwerken van data over de vraag naar goederen. Om een optimale transportroute te organiseren is het vereist dat de volledige informatie op voorhand gekend is, maar dit is zelden het geval voor transportplanners.

4.2. Types consolidatie

Volgens Hall (1987) zijn er drie verschillende manieren om te consolideren, namelijk consolidatie van voorraad, consolidatie van goederen in verschillende voertuigen en consolidatie in terminals. Hall (1987) definieert een verzending als een groep van items die dezelfde oorsprong en bestemming hebben en verzonden worden als één enkele eenheid. Een lading is een groep van verzendingen die in hetzelfde voertuig reizen. Volgens de auteur vindt consolidatie plaats wanneer verschillende items in eenzelfde lading reizen.

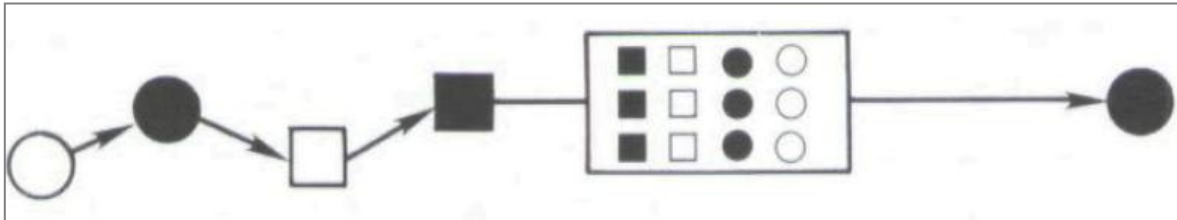
Consolidatie van de voorraad is de eenvoudigste vorm van consolidatie en wordt weergegeven in figuur 16. Hierbij worden eenheden, die geproduceerd en gebruikt zullen worden op een ander moment, opgeslagen en getransporteerd in dezelfde lading. In de realiteit worden verschillende verzendingen verzameld totdat er een bepaalde minimumlading of een bepaald tijdstip bereikt is. Dit wordt nog verder besproken in paragraaf 4.3. Deze manier van consolidatie gebeurt op eenzelfde plaats.



Figuur 16 - Consolidatie van de voorraad (Hall, 1987)

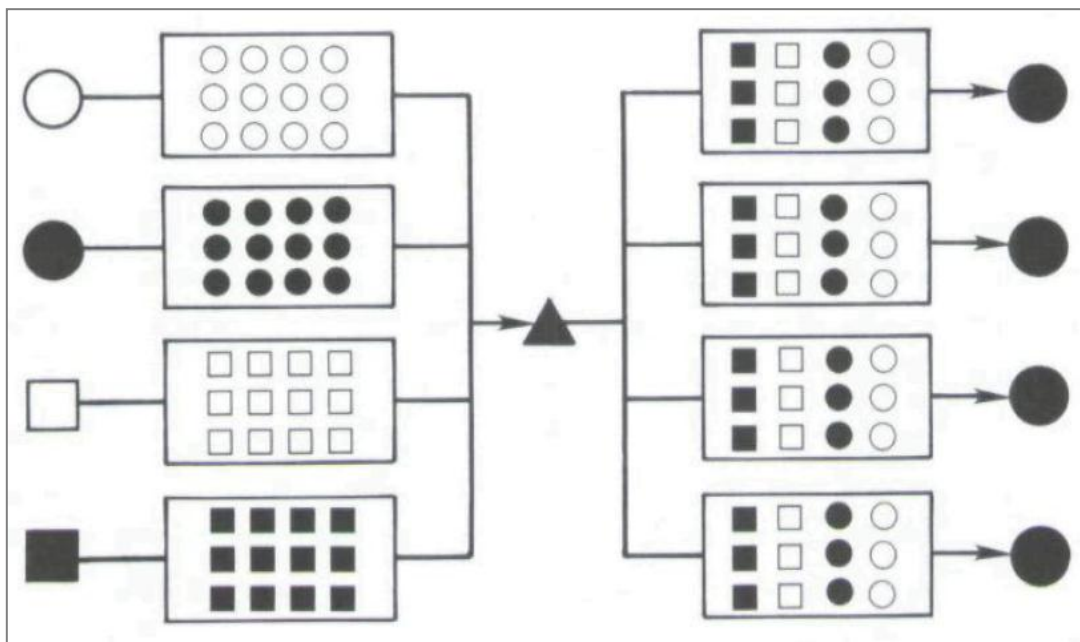
In tegenstelling tot de eerste manier van consolideren worden in de twee volgende types van consolidatie goederen gebundeld die zich op verschillende plaatsen bevinden. Dit wordt ook wel 'consolidatie in de ruimte' genoemd.

De tweede manier van consolideren betreft het ophalen en afleveren van producten op verschillende herkomstplaatsen en bestemmingen. Hierbij wordt enerzijds een onderscheid gemaakt tussen het oppikken van goederen op verschillende herkomstplaatsen, ook wel 'verzamelen van goederen' genoemd, en anderzijds het afleveren van goederen op verschillende bestemmingen, ook wel 'peddling' genoemd.



Figuur 17 - Consolidatie van voertuigen (Hall, 1987)

De laatste manier van ruimtelijke consolidatie is het bundelen van goederen in terminals, zoals voorgesteld in figuur 18. Door middel van terminals worden goederen van verschillende oorsprongen samengebracht op een bepaalde locatie. Hier worden de goederen geordend, overgeladen op nieuwe voertuigen en vervoerd naar andere bestemmingen.



Figuur 18 - Consolidatie in terminals (Hall, 1987)

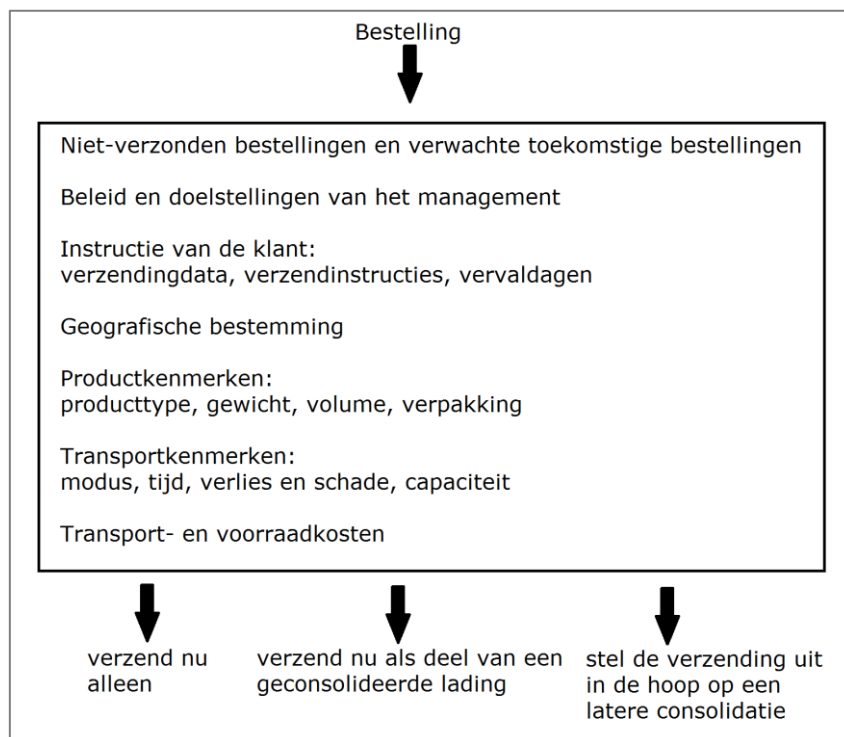
De voorgaande drie types van consolidatie kunnen eventueel ook gecombineerd worden.

Consolidatie van goederen in terminals geeft de mogelijkheid om gebruik te maken van intermodaal transport. Uit het onderzoek van Macharis et al. (2002) blijkt dat er nog vaak gebruik gemaakt wordt van unimodaal transport. De reden hiervoor is dat de meeste expediteurs onvoldoende groot zijn om zelf het nodige volume te verzamelen om een volledige container te vullen. Daarbij biedt het wegtransport ook vele voordelen zoals een flexibele en relatief snelle transportdienst en vaak een betere kosten/kwaliteit ratio dan het intermodaal transport.

Macharis et al. (2002) stellen vast dat door expediteurs te laten samenwerken met terminaloperatoren er een modale verschuiving kan gebeuren. Het groeperen van goederen is evenwel een vereiste om bedrijven met kleine goederenstromen aan te sporen om gebruik te maken van het intermodaal transport. Door goederen van verschillende bedrijven te groeperen in één container kan er een kostenvoordeel behaald worden op het hoofdtransport evenals op het voor- en natransport.

4.3. Wanneer consolideren?

Indien een verzender beslist om te consolideren is een belangrijke vraag hoe lang bestellingen van klanten bewaard moeten worden en/of welke hoeveelheid er gebundeld moet worden voordat de geconsolideerde lading wordt verzonden. Figuur 19 geeft de variabelen weer waarvan deze beslissing afhangt (Higginson & Bookbinder, 1994).



Figuur 19 - Beslissing wanneer verzenden? (Higginson & Bookbinder, 1994)

Volgens Higginson en Bookbinder (1994) zijn er drie consolidatiestrategieën die in de praktijk vaak gebruikt worden om te beslissen wanneer verzendingen verstuurd moeten worden. Een eerste is de quantity-based strategie waarbij bestellingen van klanten in een bepaalde bestemmingszone verzameld worden totdat er een gewenste ladingshoeveelheid bereikt is om zo schaalvoordelen te behalen. Een tweede strategie is de time-based strategie. Geconsolideerde verzendingen worden slechts uitgevoerd na vooraf bepaalde tijdsintervallen. Bestellingen die aankomen tussen deze tijdsintervallen worden gebundeld. Wanneer er in dit interval slechts één bestelling arriveert, betekent dit dat deze bestelling afzonderlijk verzonden wordt. Tenslotte is er nog de time-and-quantity-based (TQ) strategie waarbij er twee parameters beschreven worden, namelijk een gewenste ladingshoeveelheid en een maximum wachttijd. Een geconsolideerde lading wordt verzonden wanneer de wachttijd van een bestelling een bepaalde grenswaarde overschrijdt vóórdat de gewenste hoeveelheid lading is gebundeld ofwel wanneer de gewenste ladingshoeveelheid is bereikt. In dit laatste geval wordt de lading verzonden voordat de vooropgestelde release datum bereikt is (Mutlu et al., 2010). Deze strategie heeft als voordeel dat de service voor de klant versneld wordt, doch brengt dit eveneens een verhoogde variabiliteit met zich mee (Jackson, 1981).

Bij een time-based strategie ligt de focus voornamelijk op de service voor de klant. Bij deze strategie wordt een verzendingsdatum bepaald zodat deze voldoet aan de eisen van de klant (Higginson & Bookbinder, 1994). Het voordeel van dergelijke strategie is dat het gemakkelijk te hanteren is en een consistente service biedt aan de klant. Klanten kunnen nauwkeurig bepalen wanneer hun bestelling zal arriveren (Jackson, 1981). Een quantity-based strategie wordt meestal nagestreefd uit kostenoverwegingen.

Welke strategie het beste is, hangt sterk af van de tijd die verloopt tussen binnenkomende bestellingen en de tijd die een klant bereid is te wachten op zijn levering evenals de doelstellingen van het management omtrent kosten en klantenservice. Zo is een quantity-based strategie duurder dan een time-based strategie indien de klant bereid is om lang te wachten op zijn levering. De transporteur heeft dan voldoende tijd om een geconsolideerde lading te bekomen die voldoende groot is om te profiteren van volumekortingen. Indien de klant niet bereid is om zo lang te wachten, zal de transporteur een kleinere lading moeten versturen en zal deze strategie duurder zijn dan een quantity-based strategie. In dat geval zal de service voor de klant wel beter zijn dan in het geval van een quantity-based strategie. Verder dreigt het gevaar bij een time-based strategie - wanneer bestellingen traag binnenkomen - dat bepaalde bestellingen lang in voorraad blijven staan. Hierdoor worden de kortingen, die behaald worden op het transport, teniet gedaan door de voorraadkosten (Higginson & Bookbinder, 1994). Mutlu et al. (2010) stellen eveneens vast dat de consolidatiestrategie op basis van tijd niet noodzakelijk schaalvoordelen behaalt, maar dat deze strategie wel belangrijk is in termen van leveringsbetrouwbaarheid. De logistieke dienstverlener kan zo namelijk een maximum lead time bepalen.

Bij een time-and-quantity-based strategie is de gemiddelde wachttijd tussen bestelling en verzending significant lager dan bij de andere twee strategieën. Wanneer enerzijds het tijdsinterval tussen binnenkomende bestellingen laag is, worden ladingen verzonden na de vooropgestelde wachttijd. Dit is de reden waarom ladingen sneller verzonden worden dan onder de quantity-based strategie. Anderzijds wanneer klanten bereid zijn om lang te wachten op hun bestelling, zal de gewenste ladingshoeveelheid eerst bereikt worden. Zo wordt de extra wachttijd van een time-based strategie vermeden (Higginson & Bookbinder, 1994). Het kan zijn dat schaalvoordelen geassocieerd met het verzenden van een grotere hoeveelheid goederen door deze strategie worden opgeofferd. De vereisten van de klantenservice worden echter altijd voldaan (Çetinkaya, 2005).

De quantity-and-time-based strategie is volgens Mutlu et al. (2010) superieur aan de andere twee strategieën. Deze strategie kan volgens de auteurs zowel de schaalvoordelen realiseren die bestaan bij de quantity-based strategie alsook de voordelen van leveringsbetrouwbaarheid van de time-based strategie. Dit wordt aangetoond in onderstaand model.

4.3.1. MODEL VAN MUTLU, ÇETINKAYA EN BOOKBINDER

Consolidatie van zendingen wordt door Mutlu, Çetinkaya en Bookbinder (2010) gedefinieerd als een praktijk waarbij kleine verzendingen gecombineerd worden in een grotere lading om zo te kunnen profiteren van schaalvoordelen die samenhangen met de transportkosten. Consolidatie van goederen zorgt voor een afweging tussen voorraadkosten en transportkosten. Wanneer er ladingen geconsolideerd worden, zal dit zorgen voor een lagere transportkost, maar eveneens ook voor een hogere voorraadkost. De goederen blijven immers langer in het bedrijf aanwezig, aangezien de eerste verzendingen moeten wachten op de volgende verzendingen om vervolgens de geconsolideerde lading gezamenlijk te kunnen verzenden. Het doel hierbij is dan ook het minimaliseren van de verwachte totale kost van transport én het aanhouden van voorraad (Bookbinder & Higginson, 2002).

Er bestaan enkele mathematische modellen die de verzendingshoeveelheid optimaliseren wanneer men de snelheid kent waarmee bestellingen geplaatst worden. Bij de quantity-based en time-and-quantity-based consolidatiestrategieën wordt het Economic Shipment Weight (ESW) model gebruikt om het gewicht te berekenen dat gebundeld moet worden om een verzending economisch te maken (Baykasoglu & Kaplanoglu, 2011). De ESW speelt dezelfde rol in transportmodellen als de economische bestelhoeveelheid (EOQ) in voorraadmodellen en wordt weergegeven in volgende vergelijking:

$$ESW = \frac{\sqrt{2 \cdot \hat{a} \cdot F_L \cdot E[W]}}{r_w}$$

met:

- $\hat{\alpha}$ = snelheid van binnenkomende bestellingen;
- F_L = som van alle vaste kosten die geassocieerd zijn met een lading;
- $E[W]$ = het verwachte gewicht per bestelling;
- r_w = variabele kost van het aanhouden van voorraad per eenheid gewicht per tijdsperiode.

4.3.2. UITWERKING MODEL VAN MUTLU, ÇETINKAYA EN BOOKBINDER

Het model van Mutlu et al. (2010) bekijkt het consolidatieprobleem vanuit het oogpunt van de logistieke dienstverlener. De logistieke dienstverlener draait echter niet op voor de extra voorraadkosten die ontstaan bij het bedrijf wanneer het moet wachten om een geconsolideerde lading te verzenden. Daarom zal de voorraadkost hier vervangen worden door de kost die ontstaat doordat de logistieke dienstverlener niet in staat is een factuur te versturen totdat de verzending geleverd is.

Het model is gebaseerd op een puur consolidatieprobleem. Dit wil zeggen dat de consolidatiestrategie geïmplementeerd wordt zonder rekening te houden met voorraadbeslissingen (Çetinkaya, 2005). De bestellingen en verzendingen van klanten komen volgens een Poisson proces aan in een depot. Het depot stelt hier een centrale third party logistics provider (3PL) voor en de klanten zijn de retailers die in de nabijheid van de 3PL liggen. Een geconsolideerde verzending wordt verzonden wanneer ofwel indien enerzijds het aantal bestellingen die wachten een gewenste hoeveelheid q heeft bereikt ofwel indien anderzijds de wachttijd van de bestelling een bepaalde grootte T heeft bereikt. De tijd tussen het vertrek van twee opeenvolgende geconsolideerde ladingen wordt een consolidatiecyclus genoemd. Het doel van dit model bestaat uit het bepalen van de beslissingsvariabelen q en T zodat de gemiddelde, verwachte lange-termijn kost $\tilde{G}(q, T)$ minimaal is.

Elke verzending bevat een vaste kost \tilde{K} , die de kost van het bundelen, de setup- en overslagkosten vertegenwoordigt. Bovenop deze vaste kost is er eveneens een eenheidskost c voor elke bestelling in de verzending. Deze eenheidskost geeft de kost weer voor het verwerken en behandelen van de bestellingen. Verder is er nog een wachtkost w opgenomen in het model, voor het uitstellen van elke bestelling met één tijdseenheid. Dit geeft de opportuiniteitskost van de logistieke dienstverlener weer, doordat een uitstelling van verzending leidt tot uitgestelde inkomsten.

Elke keer dat er een bestelling ontvangen wordt in het depot, wordt het aantal bestellingen dat wacht om verzonden te worden geüpdatet. Op deze manier kan de eerste keer dat de grootte van de geconsolideerde verzending de hoeveelheid q overschrijdt, onmiddellijk geregistreerd worden.

Op basis van de Renewal Reward Theorem wordt de totale kost $\tilde{G}(q, T)$ berekend. Aangezien de bestellingen aankomen volgens een Poisson proces betekent dit dat elke verzending het systeem stochastisch zuivert. Elke verzending is een nieuwe cyclus. Vervolgens kan $\tilde{G}(q, T)$ gedefinieerd worden als volgt $E[C_C]/E[L]$. Hierbij vertegenwoordigt $E[C_C]$ de verwachte kost en $E[L]$ de verwachte lengte van een consolidatiecyclus. $E[C_C]$ kan verder nog worden opgesplitst in een verwachte verzendingskost $E[C_S]$ en een verwachte wachtkost $E[C_W]$.

In het speciale geval van onmiddellijke levering ($q=0$ en $T=0$), zonder consolidatie van bestellingen, zien we dat de verwachte kost $E[C_C]$ gelijk is aan $\tilde{K}+c$ en de verwachte lengte van een consolidatiecyclus is gelijk aan $1/\lambda$, waardoor de totale kost gelijk is aan $\tilde{G}(0, T) = \tilde{G}(q, 0) = \tilde{K}\lambda + c\lambda$. In het artikel van Mutlu et al. (2010) komen de auteurs tot het besluit dat consolidatie enkel zin heeft wanneer de vaste kost K groter is dan twee keer de wachtkost w . Indien de vaste kost K kleiner is dan $2w$ is het goedkoper om elke bestelling afzonderlijk te verzenden.

Indien we t zeer groot laten worden ($t \rightarrow \infty$), worden de ladingen verzonden wanneer de gewenste ladingshoeveelheid is bereikt. In dit geval wordt de time-and-quantity-based strategie herleid tot de quantity-based strategie. Indien we q zeer groot laten worden ($q \rightarrow \infty$), worden de gebundelde ladingen T tijdseenheden na de aankomst van de eerste bestelling binnen elke verzending verzonden. In dit geval is de TQ-strategie herleid tot de time-based consolidatiestrategie. De auteurs tonen aan dat de quantity-based strategie – wat betreft kosten – superieur is aan de time-based en time-and-quantity-based strategieën. Wanneer er echter een maximum wachttijd wordt ingebracht in het model zien we dat voor vaste waarden van q en T , de TQ-strategie het significant beter doet dan de andere twee strategieën. Er moet nu enkel nog een afweging gemaakt worden tussen het kostennadeel van de TQ-strategie ten opzichte van de quantity-strategie en het voordeel van de TQ-strategie in termen van leveringsbetrouwbaarheid ten opzichte van de quantity-strategie. Volgens de auteurs kan een TQ strategie geïmplementeerd worden, waardoor de prestaties van tijdige leveringen significant verbeteren. De extra kost die hierdoor ontstaat ten opzichte van de quantity-based strategie is volgens Mutlu et al. (2010) relatief klein ten opzichte van de verbetering in service dat een 3PL er mee behaalt.

4.4. Voor- en nadelen van consolidatie

Veel bedrijven moeten vandaag de dag een groot aantal kleine bestellingen verzenden naar hun klanten. Detailhandelaars evenals groothandelaars willen steeds een kleinere voorraad aanhouden. Dit doen ze door kleinere en meer frequente bestellingen te plaatsen bij de leverancier. Tegelijkertijd voelen bedrijven/transporteurs een druk om grote hoeveelheden goederen te verzenden omwille van stijgende transportkosten en verslechterde service voor kleine verzendingen (Jackson, 1981).

Het belangrijkste voordeel van goederenconsolidatie bestaat uit het verkrijgen van significant gereduceerde distributiekosten door een actieve planning van het management om meerdere, kleine verzendingen te bundelen in één grote verzending. Dit wordt door Bookbinder en Higginson (2002) duidelijk gemaakt aan de hand van volgend voorbeeld. Éénmaal per dag wordt een vrachtwagen gehuurd om 6000 pond glasvezel te vervoeren van Boston naar Ann Arbor. Wanneer er een constante productiesnelheid verondersteld wordt, de voorraadkost gelijk is aan 10 cent per honderd pond per dag en een transportkost van \$2,90 per honderd pond, is de totale dagelijkse uitgave aan transport en voorraad gelijk aan \$180 per dag oftewel \$900 per week. Indien de verzender de vijf dagelijkse hoeveelheden zou combineren in één enkele verzending van 30.000 pond per week zou de voorraadkost stijgen tot \$75 per week. Het totale gewicht van deze lading zou in aanmerking komen voor een reductie van de transportkosten van \$2,90 per honderd pond naar \$2,07, waardoor de wekelijkse transportkosten dalen tot \$621. De totale transport- en voorraadkost is nu gelijk aan \$696 per week, wat overeenkomt met een besparing van 23 procent in vergelijking met de dagelijkse verzendingen. Door verschillende bestellingen te bundelen in grotere hoeveelheden worden dus schaalvoordelen behaald.

Dit voordeel wordt ook aangehaald door Hall (1987). Deze auteur stelt vast dat telkens een transportmiddel gebruikt wordt om een verzending uit te voeren, er een vaste kost ontstaat (lonen van bestuurders, brandstof- en onderhoudskosten). Dergelijke kosten komen voor of het transportmiddel volledig geladen is of niet. Des te meer eenheden een verzending bevat, des te lager bijgevolg de transportkost per eenheid en des te efficiënter transportmiddelen gebruikt worden. Door goederen te bundelen kunnen eveneens de kosten van het voor- en natransport over de weg gereduceerd worden. Hierdoor stijgt de aantrekkelijkheid van het intermodaal goederentransport (Caris et al., 2010).

Een tweede voordeel dat Bookbinder en Higginson (2002) aanhalen is het feit dat consolidatie eveneens kan leiden tot minder schade aan de goederen. De kans is immers groter dat de goederen direct getransporteerd worden naar de geadresseerde op één transportmiddel in plaats van verschillende less-than-truckload transporten. De kost van het aanhouden van voorraad moet echter ook in rekening worden gebracht aangezien een te lange wachttijd kan leiden tot een daling in service voor de klant.

Caris et al. (2010) haalt aan dat het bundelen van goederen zorgt voor een reductie in ladingseenheden en bijgevolg voor minder vrachtwagens op de weg. Dit feit brengt maatschappelijke voordelen met zich mee zoals een daling in de hoeveelheid luchtvervuiling, verkeerslawaaï, ongevallen en files.

Deze voordelen moeten evenwel afgewogen worden tegenover de nadelen van consolidatie. Doordat verschillende bestellingen gebundeld moeten worden, wordt de consolidatiestrategie

geïmplementeerd ten koste van de klant. De klant moet langer wachten op zijn bestelling en er is meer variabiliteit aanwezig in de bestelcyclus. Deze variabiliteit ontstaat doordat de tijd waarin bestellingen gebundeld worden kan variëren aangezien het moment waarop bestellingen binnenkomen en de grootte van de bestellingen onzeker is. Een bijkomend nadeel is dat de voorraadkosten hierdoor eveneens stijgen (Jackson, 1981). Voornamelijk wanneer het gaat om goederen met een hoge waarde is consolidatie niet altijd de beste optie. Dergelijke goederen brengen een hoge voorraadkost met zich mee, wat de gereduceerde transportkosten teniet kan doen (Daganzo, 1988).

Voorraadkosten vertegenwoordigen bovendien een opportuiniteitskost doordat er een vertraging ontstaat in het ontvangen van de inkomsten of een voorschot op materialen (Çetinkaya & Bookbinder, 2003).

Consolidatie brengt eveneens een administratieve last met zich mee betreffende het plannen, uitvoeren en onderhouden van de consolidatiesystemen (Jackson, 1981). Voornamelijk bij intermodaal transport zijn er verschillende partijen betrokken die moeten samenwerken. Hierbij is een goede coördinatie van uiterst belang (Caris et al., 2010).

Bij consolidatie zullen er vaak omwegen moeten gebeuren door de transportmodi als het magazijn niet aan de terminal ligt of wanneer goederen van verschillende bedrijven verzameld moeten worden. Dit veroorzaakt meer overslag, shunting¹ en andere bewerkingen die aan de knooppunten moeten gebeuren, wat bijgevolg tot hogere kosten en langere routes en lead times zal leiden (Hall, 1987). Langere lead times worden eveneens veroorzaakt door lange wachttijden aan de terminals en het vereiste voor- en natransport (Macharis et al., 2002).

De uitdaging van consolidatie is de voordelen met de nadelen te combineren, zodat de transporteur kan profiteren van de kostenvoordelen zonder het niveau van de klantenservice te verlagen door de lengte of de variabiliteit van de bestelcyclus te verhogen (Jackson, 1981). Vaak hangt de beslissing om te consolideren af van de relaties en afwegingen tussen volume en frequentie van levering, evenals van de transportkost en leveringstijd (Caris et al., 2010).

¹ Shunting betekent het scheiden van wagons van de oorspronkelijke trein en herordenen op een

Hoofdstuk 5 – Praktijkgedeelte

5.1. Situering

Het praktijkgedeelte van deze masterproef zal uitgaan van een goederentransportmodel dat toegepast wordt op Vlaanderen. Dit goederentransportmodel zal zich focussen op vier bouwstenen, namelijk productie en 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 (Maes et al., 2011).

Het doel van dit praktijkgedeelte is na te gaan welke invloed consolidatie heeft op het kiezen van een bepaald transportmiddel. Indien dit zo is zal het goederentransportmodel andere effecten van een bepaalde beleidsmaatregel voorspellen. Hiervoor zal deze praktijkstudie zich voornamelijk focussen op stap drie van het vierstapsmodel, namelijk de logistieke beslissingen. Er wordt bijgevolg verondersteld dat de vorige stappen reeds berekend zijn. Na de tweede stap vindt er een desaggregratiestap plaats. Hierbij zal beroep worden gedaan op PC-stromen tussen verschillende gemeenten om zo PC-stromen tussen individuele bedrijven te creëren. De vierde en laatste stap, namelijk de toewijzing aan een netwerk zal eveneens niet behandeld worden in deze masterproef.

De logistieke beslissingen zullen gemodelleerd worden op basis van de logistieke module van het Aggregate-Disaggregate-Aggregate (ADA) model (de Jong & Ben-Akiva, 2008). In deze module worden namelijk de beslissingen genomen omtrent transportmoduskeuze en dit op het gedesaggregeerd niveau. De logistieke beslissingen worden best gemodelleerd op een microscopische schaal om ze te integreren in een goederentransportmodel. Hierdoor kunnen de verschillende agenten en hun beslissingen individueel worden opgenomen.

5.2. Inleiding

Vlaanderen bevat 308 gemeenten die in deze masterproef beschouwd zullen worden als zones. Indien de simulatie van consolidatiebeslissingen wordt toegepast op de 308 gemeenten van Vlaanderen zou dit te veel rekenwerk met zich meebrengen. Dit is de reden waarom er een selectie van tien gemeenten in de regio Vlaanderen wordt gemaakt.

Van alle mogelijke relaties tussen twee zones, tussen de verzenders en ontvangers van een bepaald goed, zullen er slechts enkelen werkelijk gerealiseerd worden. Om deze links te bepalen wordt gebruik gemaakt van de stappen van het Aggregate-Disaggregate-Aggregate model (de Jong

& Ben-Akiva, 2008). Om deze bedrijf-naar-bedrijfsrelaties (firm-to-firm, F2F) te berekenen, wordt volgende formule gehanteerd (Maes et al., 2011):

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

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

Tabel 2 toont aan dat er tussen de tien gekozen Vlaamse gemeenten 934 gerealiseerde links bestaan.

Tabel 2 - Aantal gerealiseerde links

AANTAL GEREALISEERDE LINKS										
naar van	Genk	St.- Truiden	Antwerpen	Mechelen	Leuven	Zaventem	Gent	Aalst	Brugge	Kortrijk
Genk	1,67	0,88	15,41	2,44	2,50	3,19	6,48	1,86	2,79	2,27
St.-Truiden	0,88	0,46	8,12	1,28	1,32	1,68	3,42	0,98	1,47	1,19
Antwerpen	15,41	8,12	142,19	22,48	23,11	29,41	59,85	17,18	25,71	20,92
Mechelen	2,44	1,28	22,48	3,56	3,65	4,65	9,46	2,72	4,07	3,31
Leuven	2,50	1,32	23,11	3,65	3,76	4,78	9,73	2,79	4,18	3,40
Zaventem	3,19	1,68	29,41	4,65	4,78	6,08	12,38	3,55	5,32	4,33
Gent	6,48	3,42	59,85	9,46	9,73	12,38	25,19	7,23	10,82	8,81
Aalst	1,86	0,98	17,18	2,72	2,79	3,55	7,23	2,07	3,11	2,53
Brugge	2,79	1,47	25,71	4,07	4,18	5,32	10,82	3,11	4,65	3,78
Kortrijk	2,27	1,19	20,92	3,31	3,40	4,33	8,81	2,53	3,78	3,08

Voor deze masterproef zullen deze 934 gerealiseerde links met behulp van een random selectie proportioneel herleid worden tot slechts 53 links. Het berekenen van de totale logistieke kost voor 934 links zou immers te veel tijd en rekenwerk met zich meebrengen. De geselecteerde 53 links worden weergegeven in tabel 3.

Tabel 3 - Aantal gebruikte links

AANTAL GEREALISEERDE LINKS										
naar van	Genk	St.- Truiden	Antwerpen	Mechelen	Leuven	Zaventem	Gent	Aalst	Brugge	Kortrijk
Genk	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1
St.-Truiden	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Antwerpen	1	1	0	2	2	1	4	1	2	1
Mechelen	0	0	3	0	0	1	0	1	0	0
Leuven	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Zaventem	1	0	2	1	0	0	1	0	0	0
Gent	0	0	3	0	1	2	0	1	2	0
Aalst	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Brugge	0	1	2	1	0	0	1	0	0	0
Kortrijk	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0

Om het praktijkgedeelte te kunnen starten is eveneens informatie nodig over de productie-consumptiestromen die bestaan tussen de verschillende zones. Deze productie-consumptiestromen hebben enkel betrekking op de goederencategorie NSTR1. De NSTR² is een veel gebruikte classificatie van goederen in Europa. De goederencategorie NSTR1 betreft voedingsproducten (behalve landbouwproducten) en veevoeder. Voor de gekozen tien Vlaamse gemeenten komen we dan tot volgende PC-tabel:

Tabel 4 - Geaggregeerde PC-stromen NSTR1 (in ton)

PC NSTR1										
naar van	Genk	St.-Truiden	Antwerpen	Mechelen	Leuven	Zaventem	Gent	Aalst	Brugge	Kortrijk
Genk	1501,35	900,51	10695,85	1811,79	2103,06	662,89	5402,97	1815,97	2771,18	1751,91
St.-Truiden	791,25	474,59	5637	954,86	1108,37	349,36	2847,51	957,07	1460,49	923,3
Antwerpen	9950,74	5968,47	70890,73	12008,29	13938,83	4393,55	35810,19	12036,04	18367,02	11611,42
Mechelen	2629,5	1577,18	18733	3173,21	3683,36	1161	9462,9	3180,55	4853,52	3068,34
Leuven	3356,67	2013,34	23913,46	4050,74	4701,96	1482,07	12079,8	4060,1	6195,72	3916,86
Zaventem	3306,03	1982,96	23552,71	3989,63	4631,03	1459,71	11897,56	3998,85	6102,25	3857,77
Gent	7634,34	4579,1	54388,35	9212,93	10694,06	3370,79	27474,07	9234,22	14091,43	8908,44
Aalst	2397,23	1437,86	17078,26	2892,91	3358	1058,45	8627,02	2899,6	4424,79	2797,3
Brugge	2663,92	1597,83	18978,25	3214,76	3731,58	1176,2	9586,79	3222,18	4917,06	3108,51
Kortrijk	4927,73	2955,66	35105,98	5946,66	6902,68	2175,74	17733,65	5960,4	9095,58	5750,12

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

5.3. Desaggregatiestap

Zoals reeds vermeld in de literatuurstudie is het beter om logistieke beslissingen in een goederentransportmodel te integreren op het gedesaggregeerde niveau. Hiervoor zullen bijgevolg de geaggregeerde PC-stromen uit tabel 4 moeten worden geconverteerd naar gedesaggregeerde bedrijf-naar-bedrijfsstromen. Doordat dit praktijkgedeelte slechts 53 in plaats van 934 links behandelt, zal er voor elk gemeentepaar willekeurig een aantal bedrijf-naar-bedrijfsstromen berekend moeten worden. Ter verduidelijking zal dit geïllustreerd worden aan de hand van het gemeentepaar Antwerpen – Mechelen. In realiteit blijken er, afgerond, 22 links te bestaan tussen Antwerpen en Mechelen. Ter vereenvoudiging zullen er in deze masterproef slechts twee links beschouwd worden tussen deze zones.

De PC-tabel (tabel 4) geeft weer dat er tussen deze 22 links jaarlijks 12.008,29 ton getransporteerd wordt van Antwerpen naar Mechelen. Om jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijfsstromen toe te kennen aan de twee links worden er eerst random 22 getallen gesimuleerd tussen nul en tien. Vervolgens wordt er een percentage berekend voor elk van de 22 links en worden er random twee percentages gekozen. Op basis van deze percentages worden de jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijfsstromen berekend zoals aangetoond in tabel 5.

Tabel 5 - Berekening jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijfsstroom

Gerealiseerde linken	Random getallen [0, 10]	Percentage	Jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijfsstroom
1	10	8,850%	
2	2	1,770%	
3	5	4,422%	
4	5	4,422%	
5	4	3,540%	
6	8	7,080%	
7	4	3,540%	
8	2	1,770%	
9	2	1,770%	
10	5	4,425%	
11	5	4,425%	4,425% · 12.008,29 = 531,340 ton
12	10	8,850%	
13	2	1,770%	
14	10	8,850%	
15	7	6,195%	
16	6	5,310%	
17	0	0,000%	
18	8	7,080%	7,080% · 12.008,29 = 850,144 ton
19	0	0,000%	
20	4	3,540%	
21	6	5,310%	
22	8	7,080%	
Totaal	113	100%	

5.4. Definitie van de transportmogelijkheden

In dit praktijkgedeelte definiëren we slechts vier verschillende transportmodi, namelijk wegtransport klein, wegtransport groot, spoor en binnenvaart. De transportmogelijkheden lucht en pijpleiding worden buiten beschouwing gelaten, aangezien de afstand tussen de tien gemeenten onvoldoende groot is om het luchtvervoer in te zetten en de goederencategorie NSTR1 zich niet leent tot het vervoer via pijpleiding. Zoals zojuist aangehaald wordt een opsplitsing gemaakt wat betreft het wegtransport. De reden hiervoor is dat een kleine vrachtwagen een lagere laadcapaciteit heeft en sneller is dan een traditionele, grote vrachtwagen. Hierdoor opteren we ervoor om een duidelijk onderscheid te maken tussen deze twee transportmodi.

Deze vier transportmodi zullen later de basis vormen van de zes transportketens waarvan de totale logistieke kosten worden berekend. Hierbij moet nog worden opgemerkt dat enkel het transport via de weg direct is. Bij het spoor- en binnenvaartvervoer dient er overslag te gebeuren. Enkele kenmerken met betrekking tot deze vervoersmiddelen zijn terug te vinden in onderstaande tabellen.

Tabel 6 - Gegevens kleine vrachtwagen

Capaciteit (ton)	1,5
Transportkosten (euro/km)	0,5
Laad- en loskosten (euro/ton)	1
Frequentie (per week)	50

Tabel 7 - Gegevens grote vrachtwagen

Capaciteit (ton)	27
Transportkosten (euro/km)	1
Laad- en loskosten (euro/ton)	2
Frequentie (per week)	10

Tabel 8 - Gegevens trein

Capaciteit (ton)	1200
Transportkosten (euro/km)	15
Laad- en loskosten (euro/ton)	0,4
Frequentie (per week)	15

Tabel 9 - Gegevens binnenvaart

Capaciteit (ton)	1000
Transportkosten (euro/km)	9
Laad- en loskosten (euro/ton)	0,4
Frequentie (per week)	15

In de logistieke beslissingsmodule worden er verschillende transportketens gecreëerd vooraleer logistieke beslissingen kunnen worden genomen (Maes et al., 2011). Voor elk van de 53 links zullen zes verschillende ketens gebouwd worden en zal gekeken worden waar de diverse overslagpunten gelokaliseerd zijn. De volgende ketens zullen beschouwd worden:

- ▶ weg groot;
- ▶ weg klein;
- ▶ weg klein – spoor – weg klein;
- ▶ weg groot – spoor – weg groot;
- ▶ weg klein – binnenvaart – weg klein;
- ▶ weg groot – binnenvaart – weg groot.

Ten slotte is eveneens data vereist over de netwerkstructuur van de diverse transportmodi en de locatie van de terminals. Hiervoor werd beroep gedaan op figuur 20. De binnenvaart/wegterminals zijn weergegeven in het groen. De spoor/wegterminals zijn weergegeven in het zwart. De trimodale terminals zijn weergegeven in het rood en de zeehavens in het blauw.



Figuur 20 - Terminals in België

5.5. Berekening Totale Logistieke Kost

Nu de jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijfsstromen gekend zijn, kan voor elke transportketen de totale logistieke kost berekend worden. De berekening van de totale logistieke kost is gebaseerd op de formule van het ADA-model (de Jong & Ben-Akiva, 2008):

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

waarbij de volgende logistieke elementen zijn opgenomen:

- bestelkost (O);
- transportkost (T);
- kapitaalkost van de goederen in transit (Y);
- voorraadkost (I);
- kapitaalkost van de goederen in voorraad (K).

Hierbij moet worden opgemerkt dat de kost van veroudering en schade aan goederen in transit (D) en de stock-outkosten (Z) niet zijn opgenomen omdat het zeer moeilijk is om hierover data te verzamelen. Bijgevolg zijn er geen data omtrent deze kosten beschikbaar die bruikbaar zijn voor dit model.

Om de totale logistieke kost van elke keten te berekenen wordt er uitgegaan van een gemiddelde verzendingsgrootte van 68,40 ton (q). Om dit te bekomen werden alle PC-stromen van de NSTR1 categorie opgeteld (767.278,77 ton) en gedeeld door de 934 links (821,50 ton). Aangezien we veronderstellen dat er één verzending per maand plaatsvindt, werd deze hoeveelheid nogmaals gedeeld door 12 om zo te komen tot de gemiddelde verzendingsgrootte van 68,40 ton. Deze verzendingsgrootte kan later eventueel nog aangepast worden aan de specificaties van de jaarlijkse transportbestellingen tussen bedrijven.

In het vervolg van deze paragraaf zal ter illustratie de totale logistieke kost voor de link 'Antwerpen – Mechelen' en enkel voor de transportketen 'weg groot – spoor – weg groot' verder uitgewerkt worden. De data gebruikt in deze illustratie zijn gebaseerd op het werk van Maes et al. (2011) en een overzicht hiervan is terug te vinden in tabel 10.

Tabel 10 - Symbolen (gebaseerd op Maes et al., 2011)

Symbol	Beschrijving	Afhankelijk van?	Waarde
o	Constante bestelkosten per verzending	NSTR categorie	€55
q	Gemiddelde verzendingsgrootte	NSTR categorie	68,40 ton
d	Disconteringsvoet (per jaar)	constant	4%
v	Waarde van de vervoerde goederen (in euro per ton)	NSTR categorie	€672/ton
w	Kosten van opslag (in euro per ton per jaar)	NSTR categorie	20%
$TK_{\text{weg groot}}$	Transportkost weg groot		€1/km
TK_{spoor}	Transportkost spoor		€15/km
Cap_{spoor}	Capaciteit spoor		1200 ton
L_{groot}	Kost van laden/lossen - weg groot		€2/ton
L_{spoor}	Kost van laden/lossen - spoor		€0,4/ton

De data die specifiek betrekking hebben op de illustratie van de link 'Antwerpen – Mechelen' wordt weergegeven in tabel 11.

Tabel 11 - Specifieke data

Symbol	Beschrijving	Afhankelijk van?	Waarde
Q	Jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijf goederenstroom (in ton)	PC-matrix	531,34 ton
f	frequentie		7,77 zendingen
D_{vt}	Afstand voortransport		10,38 km
D_{ht}	Afstand hoofdtransport		25,11 km
D_{nt}	Afstand natransport		7,85 km

De frequentie van de verzendingen wordt berekend als volgt: $Q/q = 7,77$. Aangezien we in deze praktijkstudie uitgaan van een continu leverschema moet er worden opgemerkt dat het aantal leveringen, Q/q , naar boven wordt afgerond. In dit geval is dit dus acht ($531,34/68,40$). Deze afronding zorgt ervoor dat er enkel volledige verzendingen worden verzonden, namelijk acht leveringen van 68,40 ton. Wanneer we niet zouden afronden zouden er 7,77 leveringen verzonden worden, wat wil zeggen dat de laatste levering slechts 52,54 ton bevat. Hier wordt ervan uitgegaan

dat de overige 15,86 ton wordt meegeleverd en zal dienen voor de bevoorrading van het volgende jaar. De bestelkosten (O) zijn bijgevolg $o \cdot f = \text{€}440$.

De transportkosten (T) worden bepaald aan de hand van volgende formule:

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

De transportkosten van de grote vrachtwagen worden vermenigvuldigd met drie omdat er drie grote vrachtwagens met een capaciteit van 27 ton moeten worden ingezet om de verzending van 68,40 ton te transporteren. Bij een kleine vrachtwagen zal deze drie vervangen worden door 46 (68,4/1,5).

Dit leidt uiteindelijk tot een totale transportkost van 5.481,86 euro. Hierbij wordt evenwel de veronderstelling gemaakt dat de transportkosten bij de transportmodus trein evenredig zijn met de werkelijk gevulde capaciteit van de trein. Initieel wordt uitgegaan van een consolidatiegraad van 75 procent. Dit is consistent met de veronderstelling van het ADA-model, zoals aangehaald in paragraaf 2.5. Dit percentage zal later worden aangepast om rekening te houden met verdere consolidatiemogelijkheden.

Om de kapitaalkost van goederen in transit (Y) te berekenen worden de reis- en wachttijden van het weg- en spoortransport opgeteld. In bijlage A wordt weergegeven dat de wachttijd van het transportmiddel 'weg groot' 8,4 uur bedraagt. Deze wachttijd wordt berekend door het totaal aantal uren in een week (7 dagen \cdot 24 uren = 168 uren) te delen door de frequentie van het transportmiddel 'weg groot', namelijk tien. Dit leidt tot een periode van 16,8 uur tussen twee trucks. Om de wachttijd te kennen wordt de helft genomen van deze periode, namelijk 8,4 uur. Een opmerking hierbij is dat in dit voorbeeld wordt uitgegaan van een werkweek van zeven dagen, waarbij 24 uren per dag gewerkt wordt. Dit is niet altijd het geval en waar nodig moet men dit aanpassen om aan de realiteit te voldoen. De wachttijd van het spoor en de binnenvaart wordt op dezelfde manier berekend, maar hier bedraagt de frequentie van de transportmodi 15, waardoor er een wachttijd van 5,6 uur bekomen wordt. De totale tijd (TT) is bijgevolg gelijk aan 23,13 uur (0,2718uur + 8,4uur + 0,3138uur + 5,6uur + 0,1396uur + 8,4uur). De kapitaalkost van goederen

in transit is bijgevolg:
$$\frac{TT \cdot d \cdot v \cdot Q}{365 \cdot 24} = \frac{23,13\text{uur} \cdot 0,04 \cdot 672 \frac{\text{€}}{\text{ton}} \cdot 531,34}{365 \cdot 24 \text{uur}} = 37,70 \text{ euro.}$$

Uit deze berekening blijkt dat deze kost weinig invloed heeft op de totale logistieke kost. Voornamelijk wanneer kleine hoeveelheden per verzending verstuurd worden is dit het geval.

De voorraadkost (I) komt overeen met 4.596,48 euro ($q/2 \cdot w \cdot v$) en de kapitaalkost van de voorraad (K) met 919,30 euro.

De totale logistieke kost voor deze transportketen is bijgevolg gelijk aan 11.475,34 euro. De volledige analyse van de verschillende transportketens van de verbinding 'Antwerpen – Mechelen' is terug te vinden in bijlage A.

Uit deze analyse 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'.

Deze procedure wordt toegepast voor alle 53 verbindingen, telkens voor de zes transportketens. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij het intermodaal transport meerdere routes per transportketen mogelijk zijn.

In tabel 12 wordt een overzicht gegeven van de drie goedkoopste transportketens. Bij twee links is het niet mogelijk om een intermodale transportketen op te stellen, aangezien de afstand tussen de twee zones hiervoor te klein is. Uit de analyse valt op dat bij intermodaal transport de ketens die gebruik maken van een grote vrachtwagen voor het voor- en natransport meestal goedkoper blijken te zijn dan de ketens die gebruik maken van de kleine vrachtwagen. Dit komt waarschijnlijk door de gemiddelde verzendingsgrootte van 68,40 ton, waardoor er 46 kleine vrachtwagens moeten worden ingezet en slechts drie grote vrachtwagens. Bij een grote vrachtwagen ligt de transportkost per kilometer en de laad-en loskost hoger dan bij een kleine vrachtwagen. Nochtans blijkt de stijging in deze kosten voor drie grote vrachtwagens in de meeste gevallen lager te liggen dan het inzetten van 46 kleine vrachtwagens tegen een lagere transportkost per kilometer en een lagere laad-en loskost.

Tabel 12 - Overzicht goedkoopste transportketens

	Goedkoopste transportketen	2^{de} goedkoopste transportketen	3^{de} goedkoopste transportketen
Weg groot	Alle links	/	/
Weg groot – binnenvaart – weg groot	/	29 links	18 links
Weg klein – spoor – weg klein	/	3 links	1 link
Weg groot – spoor – weg groot	/	19 links	32 links

Een andere conclusie die we kunnen trekken uit deze analyse is dat wanneer we bij dezelfde route kijken naar twee verschillende jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijfsstromen (Q), steeds dezelfde transportketen de goedkoopste keten blijkt te zijn. De grootte van de jaarlijkse bedrijf-naar-

bedrijfsstromen blijkt dus niet van invloed te zijn op het bepalen van de goedkoopste transportketen.

Met betrekking tot het intermodaal transport kan geconcludeerd worden dat de goedkoopste route altijd die route is met het langste hoofdtransport en het kortste voor- en natransport. Wanneer we het voortransport bijvoorbeeld langer maken en het hoofdtransport korter leidt dit toch tot een hogere totale logistieke kost. Hierdoor blijkt dat wanneer we het hoofdtransport doen toenemen met enkele kilometers dit niet veel invloed heeft op de kosten, doch wanneer we dit doen voor het voor- of natransport blijkt dit wel een significante invloed te hebben. Zoals reeds aangehaald in de literatuurstudie vermelden Macharis et al. (2002) dat het voor- en natransport liefst zo kort mogelijk wordt gehouden. Bij het intermodaal transport blijken de vaste kosten zwaarder door te wegen aangezien de initiële overslagkosten hoger zijn en er meer overslag vereist is. De variabele kosten bij het spoorvervoer en de binnenvaart stijgen echter niet zo snel met de afstand zoals bij het wegtransport aangezien er aanzienlijke schaalvoordelen behaald kunnen worden (Macharis & Verbeke, 1999).

5.6. Consolidatiemogelijkheden

Zoals aangehaald in de literatuurstudie hangt de hellingsgraad van de intermodale curve in figuur 14 af van de hoeveelheid goederen die men kan consolideren. Des te groter deze hoeveelheid, des te lager de eenheidskost van het intermodaal transport zal liggen, aangezien er schaalvoordelen ontstaan wanneer de verzendingshoeveelheid stijgt. Om dit te testen wordt in dit praktijkgedeelte de mogelijkheid tot consolidatie onderzocht.

In paragraaf 5.5. wordt enkel gekeken naar wat Woxenius (2007) een directe link noemt. Het transport verloopt direct van de plaats van oorsprong naar de bestemming. Hierbij wordt er, naast de initiële consolidatiegraad van 75 procent, geen rekening gehouden met het consolideren van goederen die beschikbaar zijn op de leverroute. In de rest van deze praktijkstudie zal onderzocht worden welke consolidatieopties er bestaan voor de drie goedkoopste transportketens van elke link. Hierbij zullen we ons enkel concentreren op het type consolidatie dat door Hall (1987) 'consolidatie in terminals' wordt gedefinieerd. Goederen van verschillende oorsprongen worden samengebracht op een bepaalde locatie, namelijk een terminal. Hier worden de goederen geordend, overgeladen op nieuwe transportmodi en vervoerd naar andere bestemmingen.

5.6.1. CONSOLIDATIE OP BASIS VAN HOOFDTRANSPORT

Bij deze optie tot consolidatie zullen de intermodale transportketens geconsolideerd worden op basis van gemeenschappelijke hoofdtransporten. In dit geval spreekt men van het transportnetwerk dat door Woxenius (2007) 'connected hubs' wordt genoemd. Verbindingen die

gebruik maken van hetzelfde hoofdtransport zullen geconsolideerd worden voor zover dit mogelijk is in de mate van frequentie van leveringen per bedrijf per jaar. De capaciteit van de transportmodi trein en binnenvaartschip is reeds voor 75 procent gevuld. Dit wil zeggen dat de trein reeds 900 ton ($0,75 \cdot 1200\text{ton}$) en het binnenvaartschip 750 ton ($0,75 \cdot 1000\text{ton}$) vervoert. Bij de transportmodi trein kunnen er bijgevolg maximaal vijf links geconsolideerd worden, waardoor de gebruikte capaciteit neerkomt op 97,80 procent ($(900 + 68,4 \cdot 4)/1200 = 1173,60/1200 = 97,80\%$). Bij de transportmodus schip kunnen er maximaal vier links geconsolideerd worden, waardoor de gebruikte capaciteit van het schip neerkomt op 95,52 procent ($(750 + 3 \cdot 68,4)/1000 = 955,2/1000 = 95,52\%$).

Bij het bekijken van de link 'Antwerpen – Mechelen' blijken er twee routes mogelijk te zijn zowel voor de transportketen 'weg groot – spoor – weg groot' als voor 'weg groot – binnenvaart – weg groot'. De consolidatieprocedure zal enkel worden toegelicht voor de transportketen met als hoofdtransport het spoor.

Zoals te zien in bijlage A is de transportketen 'weg groot – spoor – weg groot' mogelijk voor twee routes, namelijk:

Route 1: Voortransport: Antwerpen – Antwerpen
 Hoofdtransport: Antwerpen – Muizen
 Natransport: Muizen – Mechelen

Route 2: Voortransport: Antwerpen – Antwerpen
 Hoofdtransport: Antwerpen – Willebroek
 Natransport: Willebroek – Mechelen

Om te kunnen consolideren wordt gekeken welke links nog gebruik maken van hetzelfde traject wat betreft het hoofdtransport. Een overzicht van de gemeenschappelijke trajecten qua hoofdtransport is terug te vinden in bijlage B. Vier andere links maken eveneens gebruik van het traject 'Antwerpen – Muizen' en drie links in het totaal van het hoofdtraject 'Antwerpen – Willebroek'.

Ter illustratie van de consolidatieprocedure zal er verder gewerkt worden met het hoofdtransport 'Antwerpen – Muizen'. De andere vier links die eveneens gebruik maken van dit traject zijn twee links tussen Antwerpen en Leuven, een link tussen Antwerpen en Zaventem en ten slotte een tweede link tussen Antwerpen en Mechelen.

Indien het aantal consolideerbare links in het geval van spoor als hoofdtransport groter is dan vijf, worden de links met het minst aantal leveringen per jaar buiten beschouwing gelaten. Dit doen we

zodat de links die wel geconsolideerd kunnen worden maximaal gebruik kunnen maken van de consolidatieoptie. In het geval van de binnenvaart als hoofdtransport wordt dezelfde procedure toegepast, maar reeds vanaf vier links. Om dit even toe te lichten bekijken we kort het voorbeeld waarbij het hoofdtransport 'Gent – Antwerpen' via spoor geconsolideerd kan worden voor zes links. Deze links zijn weergegeven in tabel 13:

Tabel 13 - Hoofdtransport 'Gent – Antwerpen'

Link	Beginterminal	Eindterminal	Aantal leveringen
Gent-Antwerpen 1	Gent	Antwerpen	6
Gent-Antwerpen 2	Gent	Antwerpen	16
Gent-Antwerpen 3	Gent	Antwerpen	23
Aalst-Antwerpen	Gent	Antwerpen	7
Brugge-Antwerpen 1	Gent	Antwerpen	14
Brugge-Antwerpen 2	Gent	Antwerpen	5

Indien de zes leveringen geconsolideerd zouden worden, zou de trein voor 103,50 procent gevuld zijn. Aangezien dit niet mogelijk is laten we de link 'Brugge – Antwerpen 2' weg uit de analyse. Op deze manier kunnen de overige links voor tenminste zes leveringen een consolidatiegraad van 97,80 procent behalen. Indien we er bijvoorbeeld voor zouden opteren om de link 'Brugge – Antwerpen 2' te behouden en de link 'Aalst-Antwerpen' uit de analyse weg te laten, zou dit betekenen dat de vijf links slechts voor 5 leveringen een consolidatiegraad van 97,80 procent kunnen behalen, wat nadeliger is dan het eerste scenario.

Wanneer we verder werken met de oorspronkelijke illustratie van de link 'Antwerpen – Mechelen' moet er om te consolideren nog gekeken worden hoeveel verzendingen elke link per jaar transporteert. Dit wordt berekend door de jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijfsstromen (Q) te delen door de gemiddelde verzendingsgrootte (q). Deze berekening wordt eveneens afgerond naar boven aangezien we ervan uitgaan dat we altijd met volledige leveringen van 68,40 ton werken. De uitkomst is weergegeven in tabel 14:

Tabel 14 - Aantal verzendingen per jaar

Link	Jaarlijkse bedrijf-naar-bedrijfsstroom Q	Aantal verzendingen per jaar (Q/q) (afgerond naar boven)
Antwerpen – Mechelen 1	531,34 ton	8
Antwerpen – Mechelen 2	850,14 ton	13
Antwerpen – Leuven 1	974,74 ton	15
Antwerpen – Leuven 2	389,89 ton	6
Antwerpen – Zaventem	164,75 ton	3

Aangezien de link 'Antwerpen – Zaventem' slechts drie verzendingen per jaar uitvoert, kunnen de vijf links enkel voor deze drie leveringen geconsolideerd worden. Wanneer de vijf links geconsolideerd worden zal de consolidatiegraad van de trein stijgen naar 97,80 procent. Vervolgens blijkt de link 'Antwerpen – Leuven 2' zes leveringen per jaar uit te voeren, waardoor de overige vier links nogmaals geconsolideerd kunnen worden voor drie extra leveringen. Bij deze drie leveringen is de consolidatiegraad gelijk aan 92,10 procent. Deze procedure kan herhaald worden tot 13 leveringen. Uiteindelijk zal de link 'Antwerpen – Leuven 1' twee leveringen moeten transporteren met de initieel gevulde capaciteit van 75 procent. Een samenvatting van deze procedure wordt weergegeven in tabel 15.

Tabel 15 - Consolidatieprocedure

Geconsolideerde linken	Aantal leveringen	Consolidatiegraad
Antwerpen – Mechelen 1 Antwerpen – Mechelen 2 Antwerpen – Leuven 1 Antwerpen – Leuven 2 Antwerpen - Zaventem	3	$= (900 + 4 \cdot 68,4) / 1200 = 97,80 \%$
Antwerpen – Mechelen 1 Antwerpen – Mechelen 2 Antwerpen – Leuven 1 Antwerpen – Leuven 2	3	$= (900 + 3 \cdot 68,4) / 1200 = 92,10\%$
Antwerpen – Mechelen 1 Antwerpen – Mechelen 2 Antwerpen – Leuven 1	2	$= (900 + 2 \cdot 68,4) / 1200 = 86,40\%$
Antwerpen – Mechelen 2 Antwerpen – Leuven 1	5	$= (900 + 68,4) / 1200 = 80,40\%$
Antwerpen – Leuven 1	2	$= 900 / 1200 = 75\%$

Wat betreft de link 'Antwerpen – Mechelen 1', waarover het hier in deze illustratie gaat, betekent deze consolidatieprocedure dat er drie leveringen getransporteerd zullen worden met een trein die voor 97,80 procent gevuld is, drie leveringen worden getransporteerd met een trein die voor 92,10 procent gevuld is en twee leveringen worden vervoerd met een gevulde capaciteit van 86,40 procent. Wat betreft de transportkosten leidt dit tot volgende formule:

$$\begin{aligned} T = & [D_{vt} \cdot TK_{weg\ groot} \cdot 3 + D_{ht} \cdot TK_{spoor} \cdot [q / (0,978 \cdot Cap_{spoor})] + D_{nt} \cdot TK_{weg\ groot} \cdot 3 + q \cdot (4 \cdot L_{groot} \\ & + 2 \cdot L_{spoor})] \cdot 3 \\ & + \\ & [D_{vt} \cdot TK_{weg\ groot} \cdot 3 + D_{ht} \cdot TK_{spoor} \cdot [q / (0,921 \cdot Cap_{spoor})] + D_{nt} \cdot TK_{weg\ groot} \cdot 3 + q \cdot (4 \cdot L_{groot} + 2 \cdot \\ & L_{spoor})] \cdot 3 \\ & + \\ & [D_{vt} \cdot TK_{weg\ groot} \cdot 3 + D_{ht} \cdot TK_{spoor} \cdot [q / (0,864 \cdot Cap_{spoor})] + D_{nt} \cdot TK_{weg\ groot} \cdot 3 + q \cdot (4 \cdot L_{groot} + 2 \cdot \\ & L_{spoor})] \cdot 2 \end{aligned}$$

Hierdoor komt de transportkost neer op 5.438,35 euro. Deze consolidatiemogelijkheden zorgen bijgevolg voor een reductie van 43,51 euro. Hierdoor komt de totale logistieke kost neer op 11.431,83 euro. Ongeacht de mogelijkheid tot consolidatie blijft de transportketen 'weg groot' de goedkoopste oplossing.

Deze consolidatieprocedure wordt uitgevoerd voor elk van de 53 links waarbij consolidatie mogelijk is op basis van een gemeenschappelijk hoofdtraject. In alle gevallen leidt consolidatie tot een kostenreductie. Deze reductie is echter onvoldoende groot om als goedkoopste transportketen beschouwd te worden. Bij elk van de 53 links blijft de transportketen 'weg groot' de goedkoopste optie.

De berekening van de totale logistieke kost voor de drie goedkoopste transportketens van de link 'Antwerpen-Mechelen', waarbij rekening gehouden wordt met de consolidatiemogelijkheden wordt weergegeven in bijlage C.

5.6.2. INITIËLE CONSOLIDATIEGRAAD VAN 50 PROCENT

Voorgaande consolidatieprocedure leidde niet tot een significante reductie in de transportkosten. Omwille van deze reden gaan we vervolgens kijken welke invloed de initiële consolidatiegraad heeft op de transportkosten. We onderzoeken wat gebeurt met de transportkosten indien de initiële consolidatiegraad 50 procent bedraagt. Tabel 16 geeft de totale logistieke kost en de transportkost weer van de vijf links die geconsolideerd werden in voorgaande procedure met een initiële consolidatiegraad van 75 procent. Wanneer alle vijf links geconsolideerd worden, zal de trein gevuld zijn voor 97,80 procent.

Tabel 16 - Initiële consolidatiegraad = 75%

	Initiële consolidatiegraad = 75%		Geconsolideerd		Reductie in T
	Totale kost	Transportkost (T)	Totale kost	Transportkost (T)	
Antwerpen – Mechelen 1	€ 11.475,34	€ 5.481,86	€ 11.431,83	€ 5.438,35	0,79%
Antwerpen – Mechelen 2	€ 15.199,12	€ 8.908,02	€ 15.112,38	€ 8.821,28	0,97%
Antwerpen – Leuven 1	€ 17.238,69	€ 10.828,39	€ 17.185,07	€ 10.774,77	0,50%
Antwerpen – Leuven 2	€ 10.204,94	€ 4.331,35	€ 10.168,98	€ 4.295,39	0,83%
Antwerpen – Zaventem	€ 7.859,29	€ 2.166,76	€ 7.839,27	€ 2.146,74	0,92%

Tabel 17 geeft eveneens de totale kost en de transportkost weer van de vijf links. In dit geval vertrekken we van een initiële consolidatiegraad van 50 procent. Hierdoor liggen de totale logistieke kost en de transportkost hoger dan bij de initiële consolidatiegraad van 75 procent. De consolidatieprocedure is hetzelfde als beschreven in voorgaande paragraaf, enkel de consolidatiegraden wijken af. Wanneer de vijf links tezamen geconsolideerd worden, zal de trein slechts gevuld zijn voor 72,80 procent. Hierbij kan opgemerkt worden dat de procentuele reductie in transportkost hoger ligt wanneer de initiële consolidatiegraad 50 procent is. Dit wil zeggen dat de daling in de transportkost hoger is indien vertrokken wordt van een lagere initiële consolidatiegraad. Bijgevolg daalt de marginale opbrengst van consolidatie met de initiële consolidatiegraad van het transportmiddel. De conclusie van deze procedure is echter hetzelfde als wanneer een initiële consolidatiegraad van 75 procent werd gebruikt. De transportketen 'weg groot' blijft de goedkoopste optie voor alle links.

Tabel 17 - Initiële consolidatiegraad = 50%

	Initiële consolidatiegraad = 50%		Geconsolideerd		Reductie in T
	Totale kost	Transportkost (T)	Totale kost	Transportkost (T)	
Antwerpen – Mechelen 1	€ 11.589,83	€ 5.596,35	€ 11.500,72	€ 5.507,24	1,59%
Antwerpen – Mechelen 2	€ 15.385,17	€ 9.094,07	€ 15.274,09	€ 8.982,99	1,22%
Antwerpen – Leuven 1	€ 17.453,35	€ 11.043,05	€ 17.342,28	€ 10.931,98	1,01%
Antwerpen – Leuven 2	€ 10.290,81	€ 4.417,22	€ 10.217,65	€ 4.344,06	1,66%
Antwerpen – Zaventem	€ 7.902,22	€ 2.209,69	€ 7.861,88	€ 2.169,35	1,83%

Wanneer vertrokken wordt van een initiële consolidatiegraad van 50 procent moet wel opgemerkt worden dat het mogelijk is om meer dan vijf links te consolideren bij het spoortransport en meer dan vier links bij het binnenvaarttransport. We kunnen dit illustreren aan de hand van het hoofdtransport 'Gent-Antwerpen' dat reeds in paragraaf 5.6.1. werd aangehaald. Wanneer de initiële consolidatiegraad 75 procent bedraagt kunnen er slechts 4 extra links mee worden opgenomen in het transport. Wanneer de initiële consolidatiegraad echter 50 procent bedraagt kunnen er maximaal acht links geconsolideerd worden, wat tot een extra kostenreductie zal leiden. De zes links met als hoofdtransport 'Gent-Antwerpen' kunnen in dit scenario wel geconsolideerd worden waardoor de consolidatiegraad zal stijgen van 50 procent tot 78,50 procent en de reductie in transportkost hoger zal liggen dan wanneer slechts vijf links geconsolideerd kunnen worden. Een vergelijking van de reductie in de transportkost tussen de scenario's waarin vijf links en zes links geconsolideerd worden bij een initiële consolidatiegraad van 50 procent wordt weergegeven in tabel 18.

Tabel 18 - Vergelijking consolidatie met vijf of zes links

		Initiële consolidatiegraad = 50%				
		Initiële Transportkost (T)	Consolidatie van 5 links		Consolidatie van 6 links	
			Transportkost	Reductie in T	Transportkost	Reductie in T
Gent	–	€ 4.677,12	€ 4.456,42	4,72%	€ 4.427,13	5,34%
Antwerpen 1						
Gent	–	€ 12.472,33	€ 12.045,01	3,43%	€ 12.015,72	3,65%
Antwerpen 2						
Gent	–	€ 17.928,97	€ 17.501,65	2,38%	€ 17.472,37	2,55%
Antwerpen 3						
Aalst	–	€ 6.077,82	€ 5.827,19	4,12%	€ 5.797,90	4,61%
Antwerpen						
Brugge	–	€ 12.634,03	€ 12.230,75	3,19%	€ 12.201,46	3,42%
Antwerpen 1						
Brugge	–	€ 4.512,46	/	/	€ 4.298,95	4,73%
Antwerpen 2						

Tabel 18 toont logischerwijs aan dat de reductie in de transportkost hoger is wanneer de link 'Brugge – Antwerpen 2' mee wordt opgenomen in het consolidatieproces. Ter conclusie kunnen we bijgevolg opmerken dat bedrijven een groter kostenvoordeel kunnen behalen wanneer de initiële consolidatiegraad lager ligt zodat er meerdere leveringen met elkaar geconsolideerd kunnen worden.

5.6.3. BEPALING VAN DE KRITISCHE DREMPELAFSTAND

Een reden waarom de transportketen 'weg groot' bij elke link de goedkoopste optie is kan afgeleid worden uit de literatuurstudie omtrent de kritische drempelafstand. Deze afstand geeft de minimumafstand weer vanaf waar een bepaald transportmiddel goedkoper is dan het wegvervoer (Macharis & Verbeke, 1999). De afstand die door een schip of trein kan worden afgelegd in Vlaanderen is onvoldoende groot om de bijkomende kosten van het extra transportmiddel teniet te doen. Een tweede reden kan zijn dat de verzendingsgrootte (q) van 68,40 ton relatief klein is in verhouding met de capaciteit van het binnenvaartschip (1000 ton) en het spoor (1200 ton).

Om te bepalen vanaf welke afstand de transportketen 'weg groot – spoor – weg groot' in het hierboven besproken voorbeeld verkozen wordt boven de transportketen 'weg groot' wordt een analyse op basis van trial en error uitgevoerd. Hiervoor gaan we kijken naar de link 'Antwerpen – Mechelen 1' en de consolidatieprocedure zoals beschreven in paragraaf 5.6.1.

Voor deze analyse wordt bij het intermodaal transport enkel de afstand van het hoofdtraject verhoogd. De directe afstand bij de transportketen 'weg groot' wordt eveneens proportioneel verhoogd. Ter illustratie wordt een voorbeeld uitgewerkt waarbij het hoofdtransport van de transportketen 'weg groot – spoor – weg groot' verhoogd wordt tot 100 kilometer.

In de oorspronkelijke situatie bedraagt de afstand van het voortransport 10,38 kilometer, de afstand van het hoofdtransport bedraagt 25,11 kilometer en de afstand van het natransport 7,85 kilometer. Bij de transportketen 'weg groot – spoor – weg groot' wordt er bijgevolg een totale afstand van 43,34 kilometer afgelegd. Bij de directe transportketen 'weg groot' bedraagt de afstand 29,66 kilometer. Wanneer we bijgevolg het hoofdtransport van de transportketen 'weg groot – spoor – weg groot' verhogen tot 100 kilometer, komen we aan een totale afgelegde afstand van 118,23 kilometer. In vergelijking met de oorspronkelijke afstand van 43,34 kilometer is dat een vermenigvuldiging met de factor 2,73. Wanneer we vervolgens de afstand van het directe transport eveneens vermenigvuldigen met 2,73 levert dit de directe afstand van 80,97 kilometer op. Deze berekening wordt ook weergegeven in tabel 19. De reistijden van het transport worden in dit geval niet aangepast omdat deze tijden in deze analyse verwaarloosbaar zijn.

Tabel 19 - Berekening directe afstand

	Intermodaal transport		Direct transport	
Voortransport	10,38 km	10,38 km		
Hoofdtransport	25,11 km	100 km		
Natransport	7,85 km	7,85 km		
Totaal	43,34 km	118,23 km	29,66 km	80,97 km

Wanneer de lengte van het hoofdtransport verhoogd wordt tot 100 kilometer bedraagt de totale logistieke kost van het directe transport 10.100,80 euro. De totale logistieke kost van de keten 'weg groot – spoor – weg groot' bedraagt 12.158,36 euro en na consolidatie 11.985,05 euro. Het verschil tussen de totale logistieke kost van het directe transport en het intermodale transport met consolidatie is lager (1.884,25 euro) dan in de oorspronkelijke situatie (2.561,03 euro). De afstand van het hoofdtransport blijkt dus werkelijk een invloed uit te oefenen op het effect van de consolidatiemogelijkheden.

Via trial en error wordt de kritische drempelafstand bepaald waarbij het goedkoper is om gebruik te maken van het intermodale transport met consolidatiemogelijkheden. Deze kritische afstand blijkt in dit voorbeeld bij benadering 308,5 kilometer te zijn. Als de afstand van het hoofdtransport verhoogd wordt tot 308,5 kilometer bedraagt de directe afstand 223,6 kilometer ($[(10,83\text{km} + 308,5\text{km} + 7,85\text{km})/43,34\text{km}] \cdot 29,66\text{km} = 223,6 \text{ km}$). De totale logistieke kost die hiermee gepaard gaat bedraagt 13.525,36 euro. De totale logistieke kost van het geconsolideerde

intermodale transport bedraagt 13.525,21 euro. We kunnen dus besluiten dat in dit geval het intermodaal transport verkozen wordt boven het directe transport vanaf het punt dat de afstand van het hoofdtransport 308,5 kilometer overstijgt. Voor afstanden kleiner dan 308,5 kilometer wordt het directe transport met een grote vrachtwagen geprefereerd. De volledige berekening van de totale logistieke kost is terug te vinden in bijlage D.

Voordat we deze conclusie veralgemenen moeten we enkele beperkingen van dit voorbeeld mee in beschouwing nemen. In deze illustratie werden drie leveringen geconsolideerd voor 97,80 procent, drie leveringen voor 92,10 procent en twee leveringen voor 86,40 procent. Wanneer het aantal leveringen en/of de verschillende consolidatiegraden wijzigen zal de kritische afstand ook veranderen. Indien het aantal leveringen dat geconsolideerd kan worden stijgt en de graad van consolidatie hoger is, zal het intermodaal transport sneller als vervanging kunnen worden gebruikt voor het directe transport. De kritische drempelafstand is dus afhankelijk van deze variabelen. In dit voorbeeld wordt ook geen rekening gehouden met het aanpassen van de reistijden, aangezien wordt aangenomen dat deze verwaarloosbaar zijn. Indien we de exacte kritische afstand willen kennen, moeten we deze reistijden wel mee in beschouwing nemen. Bij dit fictieve voorbeeld ligt de focus dan ook niet op de correctheid en accuraatheid van de gebruikte gegevens. Deze dienen enkel ter illustratie om de methodologie, die gebruikt wordt bij het bepalen van de optimale afstand van het hoofdtransport, te illustreren. Uit deze illustratie kan in ieder geval wel besloten worden dat de afstand een zeer belangrijke factor is bij de keuze van het al dan niet gebruik maken van intermodaal transport.

5.6.4. CONSOLIDATIE OP BASIS VAN GEMEENSCHAPPELIJKE BEGINTERMINAL

Een tweede manier om verschillende links met elkaar te consolideren kan gebeuren door te onderzoeken of verschillende links tezamen een corridor (Woxenius, 2007) kunnen vormen. Links die voor het hoofdtransport vertrekken van dezelfde beginterminal kunnen voor een bepaald deeltraject van het hoofdtransport geconsolideerd worden. Het voor- en natransport zal door elke link afzonderlijk worden uitgevoerd. In dit praktijkgedeelte zal het opstellen van een corridor gebeuren door middel van visuele controle, gebruikmakend van figuur 20.

In deze consolidatieprocedure zal de transportkost dalen omwille van een hogere consolidatiegraad in het gemeenschappelijke deeltraject van het hoofdtransport, maar anderzijds kan de transportkost eveneens stijgen aangezien het totale traject langer kan zijn dat het oorspronkelijke traject. De kapitaalkost van goederen in transit zal eveneens stijgen door de extra reistijd en wachttijd. Er zal nu onderzocht worden of de daling in totale logistieke kost, veroorzaakt door de consolidatie, groter is dan de stijging in totale logistieke kost ten gevolge van het langere traject en de verhoogde kapitaalkost.

Deze consolidatieprocedure zal geïllustreerd worden aan de hand van volgende vier links, die de binnenvaart gebruiken als hoofdtransport en waarbij het voor-en natransport wordt uitgevoerd door een grote vrachtwagen.

Tabel 20 - Overzicht geconsolideerde links

Link	Beginterminal	Eindterminal	Gemeenschappelijk hoofdtransport	Afzonderlijk hoofdtransport	Aantal leveringen
Brugge - Antwerpen	Zeebrugge	Deurne	Zeebrugge - Gent	Gent - Deurne	14
Brugge - Gent	Zeebrugge	Gent	Zeebrugge - Gent	/	16
Brugge - Sint-Truiden	Zeebrugge	Genk	Zeebrugge - Gent / Gent - Willebroek	Willebroek - Genk	24
Brugge - Mechelen	Zeebrugge	Willebroek	Zeebrugge - Gent / Gent - Willebroek	/	8

In deze illustratie zullen de vier links geconsolideerd worden voor het traject 'Zeebrugge - Gent'. Verder moet worden opgemerkt dat de links 'Brugge - Sint-Truiden' en 'Brugge-Mechelen' eveneens geconsolideerd zullen worden voor het traject 'Gent-Willebroek'.

Wanneer we focussen op de link 'Brugge - Sint-Truiden' zien we dat het hoofdtransport wordt opgesplitst in drie deeltrajecten, dewelke ook worden aangeduid op figuur 21:

- ▶ Zeebrugge - Gent: punt B naar punt C;
- ▶ Gent - Willebroek: punt C naar punt D;
- ▶ Willebroek - Genk: punt D naar punt E.



Figur 21 - Link Brugge - Sint-Truiden (via GoogleMaps)

Het eerste deeltraject, namelijk 'Zeebrugge-Gent' zal voor acht leveringen geconsolideerd worden voor 95,52 procent, zes leveringen worden geconsolideerd voor 88,68 procent, twee leveringen voor 81,84 procent en de overige acht leveringen behouden de initiële consolidatiegraad van 75 procent. Het tweede deeltraject 'Gent – Willebroek' zal voor acht leveringen geconsolideerd worden voor een consolidatiegraad van 81,84 procent en de overige 16 leveringen behouden de 75 procent consolidatiegraad.

Vervolgens wordt de transportkost van deze link berekend. De kosten voor het voor- en natransport, alsook de kosten voor het laden en lossen van de vracht blijft hetzelfde, namelijk:

- ▶ Voortransport: $[9,89\text{km} \cdot \text{€}1 \cdot 3] \cdot 24 \text{ leveringen} = \text{€}712,08$
- ▶ Natransport: $[32,3\text{km} \cdot \text{€}1 \cdot 3] \cdot 24 \text{ leveringen} = \text{€}2.325,60$
- ▶ Laad/loskosten: $[(4 \cdot \text{€}2 + 2 \cdot \text{€}0,4) \cdot 68,4\text{ton}] \cdot 24 \text{ leveringen} = \text{€}14.446,08$

De transportkosten van het hoofdtransport worden weergegeven in de drie volgende tabellen, die de kosten per deeltraject weergeven:

Tabel 21 - Transportkost Zeebrugge - Gent

Consolidatiegraad	# leveringen	Zeebrugge – Gent: 61,83km
95,52%	8	$[61,83\text{km} \cdot \text{€}9 \cdot (68,4 / (0,9552 \cdot 1000))] \cdot 8$ leveringen = €318,76
88,68%	6	$[61,83\text{km} \cdot \text{€}9 \cdot (68,4 / (0,8868 \cdot 1000))] \cdot 6$ leveringen = €257,51
81,84%	2	$[61,83\text{km} \cdot \text{€}9 \cdot (68,4 / (0,8184 \cdot 1000))] \cdot 2$ leveringen = €93,01
75%	8	$[61,83\text{km} \cdot \text{€}9 \cdot (68,4 / (0,75 \cdot 1000))] \cdot 8$ leveringen = €405,98

Tabel 22 - Transportkost Gent - Willebroek

Consolidatiegraad	# leveringen	Gent – Willebroek: 93,80km
81,84%	8	$[93,80\text{km} \cdot \text{€}9 \cdot (68,4 / (0,8184 \cdot 1000))] \cdot 8$ leveringen = €564,45
75%	16	$[93,80\text{km} \cdot \text{€}9 \cdot (68,4 / (0,75 \cdot 1000))] \cdot 16$ leveringen = €1.231,86

Tabel 23 - Transportkost Willebroek - Genk

Consolidatiegraad	# leveringen	Willebroek – Genk: 122,01km
75%	24	$[93,80\text{km} \cdot \text{€}9 \cdot (68,4 / (0,75 \cdot 1000))] \cdot 24$ leveringen = €2.403,45

Als bovenstaande kosten worden opgeteld komen we tot een totale transportkost van 22.758,78 euro. Deze kost ligt hoger dan de oorspronkelijke transportkost, namelijk 22.124,40 euro. De oorzaak hiervoor kan waarschijnlijk gezocht worden in de afstand van het afgelegde traject. In het oorspronkelijke traject bedraagt de afstand van het hoofdtransport 235,58 kilometer. Na bovenstaande consolidatieprocedure bedraagt de afstand 277,64 kilometer. De extra transportkost die hierdoor ontstaat is te groot om teniet gedaan te worden door de voordelen ten gevolge van de consolidatie.

Vervolgens stijgt eveneens de kapitaalkost van goederen in transit. De reistijden zijn afhankelijk van de af te leggen afstand en doordat deze afstand is gestegen, stijgen de reistijden eveneens. Per extra tussenstop in een terminal wordt er eveneens een extra wachttijd van 15 minuten (0,25 uur) bijgeteld. Hierdoor stijgt deze kapitaalkost van 228,70 euro naar 251,77 euro.

De overige kosten die deel uitmaken van de totale logistieke kost blijven onveranderd. Als bovenstaande kosten in rekening worden gebracht komen we aan een totale logistieke kost van 29.846,33 euro. Dit is 657,45 euro meer dan in de oorspronkelijke situatie. In dit geval levert de mogelijkheid tot consolidatie geen extra voordelen op. De daling in transportkosten ten gevolge van de consolidatie worden volledig teniet gedaan door de extra kosten ontstaan door het langere traject dat moet worden afgelegd. Een overzicht van de totale logistieke kost voor en na de consolidatieprocedure is terug te vinden in tabel 24.

Tabel 24 - Vergelijking link 'Brugge - Sint-Truiden' voor en na consolidatie

Weg groot – BINNENVAART – weg groot			
Voor consolidatie		Na consolidatie	
WEG GROOT: Brugge – Zeebrugge		WEG GROOT: Brugge – Zeebrugge	
Afstand	9,89 km	Afstand	9,89 km
Reistijd	0,1408 uur	Reistijd	0,1408 uur
Wachttijd	8,4 uur	Wachttijd	8,4 uur
BINNENVAART: Zeebrugge – Genk		BINNENVAART: Zeebrugge – Gent	
Afstand	235,5753 km	Afstand	61,8265 km
Reistijd	23,5575 uur	Reistijd	6,1826 uur
Wachttijd	5,6 uur	Wachttijd	0,25 uur
		BINNENVAART: Gent – Willebroek	
		Afstand	93,8001 km
		Reistijd	9,38 uur
		Wachttijd	0,25 uur
		BINNENVAART: Willebroek – Genk	
		Afstand	122,0075 km
		Reistijd	12,2007 uur
		Wachttijd	5,6 uur
WEG GROOT: Genk – Sint-Truiden		WEG GROOT: Genk – Sint-Truiden	
Afstand	32,3 km	Afstand	32,3 km
Reistijd	0,5474 uur	Reistijd	0,5474 uur
Wachttijd	8,4 uur	Wachttijd	8,4 uur
Q =	1597,83 ton	Q =	1597,83 ton
Totale Logistieke Kost (in euro):		Totale Logistieke Kost (in euro):	
O =	1.320	O =	1.320
T =	22.124,40	T =	22.758,78
Y =	228,70	Y =	251,77
I =	4.596,48	I =	4.596,48
K =	919,30	K =	919,30
	<hr/>		<hr/>
	29.188,88		29.846,33

Het resultaat van deze consolidatieprocedure voor de overige drie links wordt weergegeven in tabel 25.

Tabel 25 - Overzicht overige links

Link	Initiële totale logistieke kost	Totale logistieke kost na consolidatie	Initiële afstand	Afstand na consolidatie
Brugge – Antwerpen	€ 17.967,39	€ 17.908,82	136,82km	143,18km
Brugge – Gent	€ 17.935,88	€ 17.793,21	61,83km	61,83km
Brugge – Mechelen	€ 12.232,09	€ 12.242,89	133,45km	155,63km

Uit voorgaande tabel blijkt dat het voor de links 'Brugge – Antwerpen' en 'Brugge-Gent' wel gunstig is om op deze manier te consolideren. De link 'Brugge – Mechelen' is echter niet gebaat bij dergelijke consolidatie. Een verklaring hiervoor kan zijn dat de afstand van het hoofdtransport gestegen is met 22,18 kilometer. De extra afstand zal de daling in transportkosten wederom teniet gedaan hebben. Toch moet opgemerkt worden dat consolidatie op deze manier gunstiger kan zijn dan de oorspronkelijke situatie, ook al wordt het traject van het hoofdtransport langer als het initiële traject. Dit zien we bij link 'Brugge – Antwerpen'. De extra afstand die hier ontstaat door de consolidatie is echter veel kleiner dan bij de link 'Brugge – Mechelen', namelijk slechts 6,36 kilometer. We kunnen bijgevolg concluderen dat consolidatie op deze manier gunstig kan zijn voor een link waarbij het hoofdtraject langer wordt. Nochtans mag dit verschil in lengte niet te groot worden. Welke stijging in afstand 'te' groot is om een kostenvoordeel te bekomen is moeilijk te zeggen aangezien er eveneens rekening moet worden gehouden met het aantal leveringen dat geconsolideerd kan worden en de graad van consolidatie van de verschillende leveringen.

5.6.5. CONSOLIDATIE OP BASIS VAN GEMEENSCHAPPELIJKE EINDTERMINAL

Links kunnen eveneens geconsolideerd worden door corridors te bouwen tussen links die dezelfde eindterminal hebben bij hun hoofdtransport. Hiervoor wordt onderzocht of een bepaald traject van het hoofdtraject geconsolideerd kan worden zodat de geconsolideerde links uiteindelijk allemaal aankomen in dezelfde eindterminal. Deze consolidatieprocedure wordt op dezelfde manier uitgevoerd zoals de procedure hierboven besproken.

Bovenstaande twee consolidatieprocedures werden toegepast waar mogelijk op de 53 links. De analyse van de resultaten toont aan dat in 67,90 procent van de gevallen deze consolidatie ervoor zorgt dat de totale logistieke kost zal dalen in vergelijking met de oorspronkelijke kost. In de overige 32,10 procent van de gevallen stijgt de totale logistieke kost. Uit de analyse blijkt dat dit voornamelijk de links zijn waarbij het traject veel langer is dan het oorspronkelijke traject. De gemiddelde stijging in afstand bij deze links bedraagt 25,25 kilometer. Nochtans neemt de totale

logistieke kost in sommige gevallen eveneens toe indien de stijging in afstand slechts anderhalve kilometer bedraagt. In deze gevallen blijkt het aantal leveringen dat geconsolideerd wordt laag te zijn en de toename in de graad van consolidatie beperkt te zijn. Bijvoorbeeld wanneer er een verhoging is van de initiële consolidatiegraad van 75 procent naar 81,84 procent. Deze stijging in consolidatiegraad is dan onvoldoende om de extra kosten veroorzaakt door de langere afstand en de extra kapitaalkost teniet te doen, waardoor een hogere totale logistieke kost bekomen wordt.

Ook bij deze manier van consolideren blijkt de mogelijkheid tot consolidatie niet te leiden tot een goedkoper alternatief dan het directe transport via een grote vrachtwagen. De redenen hiervoor zijn waarschijnlijk dezelfde als beschreven in paragraaf 5.6.3.

5.7. Besluit

5.7.1. RESULTATEN

Uit de zojuist besproken analyses blijkt dat de onderzochte consolidatiemogelijkheden in Vlaanderen niet leiden tot een voorkeur voor het intermodaal transport. De belangrijkste reden hiervoor is dat de afstand van het hoofdtransport onvoldoende groot is om de extra kosten van het intermodale vervoer te compenseren. Het voorbeeld in paragraaf 5.6.3. toont aan dat de afstand van het hoofdtransport veel langer moet zijn om de intermodale transportketen te verkiezen boven de directe transportketen 'weg groot'. In dit voorbeeld was de kritische drempelafstand 308,5 kilometer. Wanneer we via GoogleMaps (figuur 22) de afstand berekenen tussen twee gemeenten in de uithoeken van Vlaanderen, namelijk De Panne (punt A) en Dilsen-Stokkem (punt B), zien we dat de afstand slechts 255 kilometer bedraagt. Wil men bijgevolg voor dit voorbeeld de intermodale transportketen gebruiken, zal men leveringen buiten Vlaanderen moeten uitvoeren en dus buiten het bereik van dit praktijkgedeelte vallen.



Figuur 22 - Afstand tussen De Panne en Dilsen-Stokkem (via GoogleMaps)

We kunnen dus besluiten dat Vlaanderen in veel gevallen onvoldoende groot is voor het intermodale transport om de gewenste schaalvoordelen te behalen en een goedkoper alternatief te vormen dan het directe transport.

Daarbij moet nog worden opgemerkt dat in deze praktijkstudie enkel werd gekeken naar een verzendingsgrootte van 68,40 ton. Deze hoeveelheid is relatief klein in vergelijking met de capaciteit van het spoor en het binnenvaartschip. Wanneer deze verzendingshoeveelheid toeneemt, zullen er sneller schaalvoordelen behaald worden door middel van consolidatie. Doch een stijging in de verzendingsgrootte zorgt er eveneens voor dat het aantal vrachtwagens dat voor het voor- en natransport moet worden ingezet stijgt. Welke invloed een verandering in de verzendingsgrootte heeft op de keuze van het transportmiddel werd niet onderzocht in deze masterproef.

Uit dit praktijkgedeelte kunnen we verder nog concluderen dat hoe hoger de consolidatiegraad ligt, hoe sneller het intermodale transport geprefereerd wordt. Eveneens zal men sneller opteren voor het intermodale transport wanneer meer leveringen geconsolideerd wordt. De keuze voor een transportmiddel zal aldus beïnvloed worden door onder andere het aantal leveringen dat geconsolideerd wordt, de consolidatiegraad van de verschillende leveringen, de verzendingsgrootte en de afstand die moet worden afgelegd. Indien de afstand en de verzendingsgrootte vastliggen, zal het snelst overgegaan worden tot intermodaal transport wanneer alle leveringen voor een bepaalde link voor 100 procent geconsolideerd zijn.

5.7.2. GOEDERENTRANSPORTMODELLEN

Wat betreft de goederentransportmodellen blijkt het wel nuttig te zijn om de optie tot consolidatie mee op te nemen. De mogelijkheid tot consolidatie beïnvloedt welk transportmodus/transportketen een bedrijf zal gebruiken voor het vervoer van haar goederen. Voornamelijk wanneer we op nationaal of internationaal niveau kijken zal consolidatie een grote rol spelen in de beslissing voor een bepaalde transportketen. Bij lange afstanden zal er sneller gekozen worden voor een intermodale transportketen in plaats van het directe transport. Het is net dit directe transport dat zorgt voor een groot deel van de externaliteiten die door de huidige maatschappij niet langer getolereerd worden.

Aangezien de mogelijkheid tot consolidatie een invloed heeft op de transportmoduskeuze heeft het eveneens een invloed op de externaliteiten die aan de maatschappij worden blootgesteld. Indien voor een intermodale transportketen wordt gekozen, mag verwacht worden dat de verkeerscongestie, het verbruik van energie en de uitstoot van CO₂ zal dalen. Eveneens het gebruik van de infrastructuur en de beschikbare capaciteit worden hierdoor beïnvloed.

Volgens Macharis en Verbeke (1999) heeft "de Europese Unie geopteerd voor de ontwikkeling van het intermodaal vervoer als één van de instrumenten om te beantwoorden aan zowel de toenemende verkeerscongestie als aan de milieu- en veiligheidsvraagstukken in het goederenvervoer". Consolidatie speelt hier een belangrijk rol aangezien het ervoor zorgt dat het intermodaal transport sneller geprefereerd wordt boven het unimodaal transport.

Aangezien de overheid de negatieve gevolgen van het directe transport wil aanpakken is het belangrijk dat de logistieke beslissing met betrekking tot consolidatie wordt opgenomen in goederentransportmodellen. Op die manier zullen de beleidsmakers een nauwkeurigere analyse kunnen maken van de effecten van voorgestelde beleidsmaatregelen. Indien de consolidatieoptie niet mee in rekening wordt gebracht zullen de modellen een groter aandeel van het transport toekennen aan het wegtransport dan dat in realiteit zal plaatsvinden. Hierdoor kunnen overheden niet de werkelijke gevolgen van hun beleidsmaatregelen inschatten.

Hoofdstuk 6 – Conclusie

In het eerste hoofdstuk werd een situering gegeven van het praktijkprobleem. Hierna werden een centrale onderzoeksvraag en drie deelvragen opgesteld. In de rest van de masterproef werden vervolgens antwoorden gezocht op deze vragen.

6.1. Logistieke beslissingen in goederentransportmodellen

De literatuurstudie toont aan dat veel goederentransportmodellen geen rekening houden met het opnemen van logistieke beslissingen op het niveau van individuele besluitvormers. Toch werden enkele goederentransportmodellen onderzocht om te kijken op welke manier ze al dan niet rekening houden met logistieke beslissingen en om na te gaan op welke manier de transportmoduskeuze tot stand komt.

Het doel van het traditionele vierstapsmodel is het zo goed mogelijk simuleren van het effect van beleidsmaatregelen op het verplaatsingsgedrag. Nochtans is dit model ongevoelig voor het economische gedrag op het niveau van bedrijven die handelen als individuele besluitvormers. Buiten het transportaspect worden er geen logistieke elementen mee opgenomen.

In het SMILE-model (strategic model for integrated logistic evaluations) worden weliswaar enkele logistieke keuzes mee opgenomen, zoals onder andere consolidatie, doch enkel voor geaggregeerde goederenstromen.

Het simulatiemodel van Liedtke neemt wel logistieke beslissingen mee in beschouwing. Er wordt virtueel over contracten gehandeld met andere actoren. De logistieke keuzes zijn gebaseerd op een minimale kostenstrategie. Doch neemt dit model enkel het wegverkeer mee in beschouwing.

Het EUNET2.0 heeft als doel om de toekomstige goederenstromen te voorspellen door rekening te houden met logistieke beslissingen en economische transacties. De mogelijkheid tot het gebruikmaken van consolidatiecentra is opgenomen. Het nadeel van dit model is dat dit enkel gebeurt op geaggregeerd niveau, zodat er veel kostbare informatie verloren gaat over logistieke beslissingen op het niveau van bedrijven.

Het Aggregate-Disaggregate-Aggregate (ADA) model bevat een relatief complete logistieke module. Door middel van de desaggregatie die plaatsvindt in de logistieke module kunnen er meer gedetailleerde beleidsrelevante variabelen opgenomen worden. In deze module wordt gebruik

gemaakt van de totale logistieke kosten om logistieke beslissingen te nemen zoals onder andere lotgrootte, consolidatieopties, voorraadbeleid, et cetera.

6.2. Definitie van consolidatie

In de literatuur zijn er veel verschillende definities van consolidatie terug te vinden. Zo definiëren Bookbinder en Higginson (2002) consolidatie als een actieve inspanning om efficiënter gebruik te maken van transportbronnen. Zij geven aan dat goederen niet direct bewegen van een herkomstplaats naar een bestemming, maar dat er ook rekening moet worden gehouden met de economische en praktische haalbaarheid van consolidatie. Macharis et al. (2002) geeft een synoniem voor consolidatie, namelijk 'bundelen' en definieert dit als "een verzameling van goederen om zo een transporteenheid op te vullen". Baykasoglu en Kaplanoglu (2011) definiëren goederenconsolidatie tenslotte als een transportoptie die verschillende items, die op verschillende locaties en verschillende tijdstippen geproduceerd en gebruikt worden, combineert in één enkele lading om zo transportkosten te minimaliseren en het gebruik van voertuigen te maximaliseren.

In deze masterproef wordt er gewerkt met wat door Hall (1987) consolidatie in terminals wordt genoemd. Hierbij worden goederen gebundeld in terminals. Door gebruik te maken van deze terminals worden goederen van verschillende oorsprongen samengebracht op een bepaalde locatie. Hier worden de goederen geordend, overgeladen op nieuwe voertuigen en vervoerd naar andere bestemmingen.

6.3. Toelichting praktijkgedeelte

In het praktijkgedeelte wordt nagegaan hoe het begrip consolidatie kan worden opgenomen in goederentransportmodellen. In dit geval wordt er een model gebruikt dat gebaseerd is op het ADA-model.

Vlaanderen bevat 308 gemeenten die in deze masterproef beschouwd worden als zones. Indien de simulatie van consolidatiebeslissingen wordt toegepast op de 308 gemeenten van Vlaanderen zou dit te veel rekenwerk met zich meebrengen. Dit is de reden waarom er een selectie van tien gemeenten in de regio Vlaanderen wordt gemaakt.

Tussen deze tien gemeenten bestaan er 934 gerealiseerde links tussen individuele bedrijven. Voor deze masterproef wordt dit getal proportioneel herleid tot 53 links. Vervolgens worden de geaggregeerde productie-consumptiestromen tussen de verschillende zones teruggebracht tot gedesaggregeerde bedrijf-naar-bedrijfsstromen. Deze PC-stromen hebben enkel betrekking op de goederencategorie NSTR1.

In de logistieke beslissingsmodule worden er verschillende transportketens gecreëerd vooraleer logistieke beslissingen kunnen worden genomen (Maes et al., 2011). Voor elk van de 53 links worden zes verschillende transportketens gebouwd en wordt gekeken waar de diverse overslagpunten gelokaliseerd zijn. De volgende ketens werden onderzocht:

- ▶ weg groot;
- ▶ weg klein;
- ▶ weg klein – spoor – weg klein;
- ▶ weg groot – spoor – weg groot;
- ▶ weg klein – binnenvaart – weg klein;
- ▶ weg groot – binnenvaart – weg groot.

De berekening van de totale logistieke kost bevat vijf kosten. Deze zijn bestel-, transport-, en de voorraadkosten en de kapitaalkost van zowel de goederen in transit als van de goederen in voorraad. De totale logistieke kost wordt berekend voor elk van de zes transportketens. Op basis van deze analyse wordt voor elk van de 53 links gekeken welke transportketen het goedkoopst is. Dit bleek in alle gevallen de transportketen 'weg groot' te zijn, gevolgd door de transportketens 'weg groot – spoor – weg groot' en 'weg groot – binnenvaart – weg groot'.

Vervolgens werd het concept consolidatie verder uitgewerkt. Naar analogie met het ADA-model werden er in de initiële berekeningen van de totale logistieke kost gewerkt met een consolidatiegraad van 75 procent. Om te kijken welke invloed consolidatie uitoefent op de totale logistieke kost wordt onderzocht hoe deze kost wijzigt als de mogelijkheid tot verdere consolidatie mee wordt opgenomen. Verschillende links worden met elkaar geconsolideerd op diverse manieren. Eerst werden links geconsolideerd die gebruik maakten van hetzelfde hoofdtransport. Vervolgens werden links geconsolideerd waarvan het transport vertrekt van dezelfde beginterminal of aankomt in dezelfde eindterminal. In het geval van de transportketen 'weg groot – spoor – weg groot' kan de consolidatiegraad maximaal verhoogd worden tot 97,80 procent en in het geval van de transportketen 'weg groot – binnenvaart – weg groot' tot 95,52 procent. De capaciteit van een binnenvaartschip bedraagt 1000 ton in vergelijking met het spoor, waar de capaciteit 1200 ton bedraagt. Dit wil dus zeggen dat er in deze masterproef meer mogelijkheid is tot consolidatie in het geval van een hoofdtransport via het spoor als met het binnenvaartschip. Uit deze analyse blijkt verder dat de totale logistieke kost daalt wanneer de consolidatiegraad stijgt, doch deze stijging is onvoldoende groot om het intermodaal vervoer als goedkoopste transport te beschouwen. Het directe vervoer met een grote vrachtwagen blijft optimaal.

Verder werd onderzocht of het optimaal is om het intermodaal vervoer in te zetten als de afstand van een bepaald hoofdtransport stijgt. Uit een illustratie bleek dat vanaf 308,5 kilometer het goedkoper was om het geconsolideerde intermodaal vervoer in te zetten in plaats van het directe

transport. Hieruit blijkt bijgevolg dat hoe langer de afstand is voor een bepaalde link, hoe sneller consolidatie ervoor kan zorgen dat het intermodaal vervoer geprefereerd wordt.

Uiteindelijk toont het praktijkgedeelte aan dat het nuttig is om het concept consolidatie mee op te nemen in goederentransportmodellen. Consolidatie kan er namelijk voor zorgen – indien de afstand tenminste voldoende groot is – dat bedrijven een andere transportketen kiezen dan het directe transport. Wanneer overheden de effecten van beleidsmaatregelen willen voorspellen op basis van goederentransportmodellen zal het model betere voorspellingen weergeven als de mogelijkheid tot consolidatie mee is opgenomen. Op die manier zullen de beleidsmakers een nauwkeurigere analyse kunnen maken van de effecten van voorgestelde beleidsmaatregelen. Indien consolidatie niet mee in beschouwing wordt genomen zullen de goederentransportmodellen in de meeste gevallen een te groot gedeelte van het transport toekennen aan het wegvervoer, wat niet in overstemming is met de realiteit. In dat geval zullen overheden niet de werkelijke gevolgen van hun beleidsmaatregelen kunnen inschatten.

Hoofdstuk 7 – Lijst van geraadpleegde werken

- ▶ Ballou, R. H. (1999). *Business Logistics Management: Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
- ▶ Baykasoglu, A., & Kaplanoglu, V. (2011). A multi-agent approach to load consolidation in transportation. *Advances in Engineering Software*, 42, 477-490.
- ▶ Ben-Akiva, M., Bottom, J., Gao, S., Koutsopoulos, H. N., & Wen, Y. (2007, April). Towards Disaggregate Dynamic Travel Forecasting Models. *Tsinghua Science and Technology*(12), 115-130.
- ▶ 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., & van Binsbergen, A. (1999). GoodTrip - A New Approach for Modelling and Evaluation of Urban Goods Distribution. *Paper presented at the 2nd KFB-Research Conference*. Lund.
- ▶ 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.
- ▶ Bookbinder, J. H., & Higginson, J. K. (2002). Probabilistic modeling of freight consolidation by private carriage. *Transportation Research Part E*, 38, 305-318.
- ▶ Caris, A., Macharis, C., & Janssens, G. K. (2010, January 10-14). Potential benefits of shipper consolidation at inland distribution centers. *TRB 89th Annual Meeting*. Washington, USA.
- ▶ Çetinkaya, S. (2005). Coordination of inventory and shipment consolidation decisions: a review of premises, models and justification. In J. Geunes, E. Akçali, P. M. Pardalos, H. E. Romeijn, & Z.-J. Shen, *Applications of supply chain management and e-commerce research* (pp. 3-46). New York: Springer.
- ▶ Çetinkaya, S., & Bookbinder, J. H. (2003). Stochastic models for the dispatch of consolidated shipments. *Transportation Research Part B*, 37, 747-768.

- ▶ Chow, J. Y., Yang, C. H., & Regan, A. C. (2010). State-of-the art of freight forecast modeling: lessons learned and the road ahead. *Transportation*, 1011-1030.
- ▶ Daganzo, C. F. (1988). Shipment composition enhancement at a consolidation center. *Transportation Research B*, 22B(2), 103-124.
- ▶ de Jong, G., & Ben-Akiva, M. (2007). A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice. *Transportation Research Part B*, 41, 950-965.
- ▶ de Jong, G., & Ben-Akiva, M. (2008). The Aggregate-Disaggregate-Aggregate (ADA) Freight Model System. In M. Ben-Akiva, H. Meersman, & E. Van de Voorde, *Recent developments in Transport Modelling* (pp. 117-134). Bingley: Howard House.
- ▶ de Jong, G., Ben-Akiva, M., & Baak, J. (2008). *Method Report - Logistics Model in the Norwegian National Freight Model System (Version 2)*. Den Haag: Significance.
- ▶ de Jong, G., Ben-Akiva, M., & Baak, J. (2010). *Method Report - Logistics Model in the Swedish National Freight Model System (Version 2)*. Den Haag: Significance.
- ▶ de Jong, G., Gunn, H., & Walker, W. (2004). National and International Freight Transport Models: An Overview and Ideas for Future Development. *Transport Reviews*, 24(1), 103-124.
- ▶ Dehayes, D. W. (1969). Industrial transportation planning: estimation transit time for rail carload shipments. *Transportation Research Forum Papers*.
- ▶ Friedrich, H., & Liedtke, G. (2010). Consideration of logistics for policy analysis with freight transport models. Berlin.
- ▶ Hall, R. W. (1987). Consolidation strategy: inventory, vehicles and terminals. *Journal of Business Logistics*, 8(2), 57-73.
- ▶ Hensher, D., & Figliozzi, M. A. (2007). Behavioural insights into the modelling of freight transportation and distribution systems. *Transportation Research Part B*, 41, 921-923.
- ▶ Higginson, J. K., & Bookbinder, J. H. (1994). Policy recommendations for a shipment-consolidation program. *Journal of Business Logistics*, 15(1), 87-112.
- ▶ Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introduction to Operations Research* (9e editie ed.). New York: McGraw-Hill.

- ▶ Immers, L. H., & Stada, J. E. (2011). *Cursus H01I6A: Verkeersmodellen*. Leuven: Centrum voor Industrieel Beleid / Verkeer en Infrastructuur.
- ▶ Jackson, G. C. (1981). Evaluating order consolidation strategies using simulation. *Journal of Business Logistics*, 110-138.
- ▶ Jin, Y., Williams, I., & Shahkarami, M. (2005). Integrated regional economic and freight logistics modelling: Results from a model for Trans-Pennine corridor, UK. Association for European Transport.
- ▶ Liedtke, G. (2009). Principles of micro-behaviour commodity transport modeling. *Transportation Research Part E*, 45, 795-809.
- ▶ Liedtke, G., & Schepperle, H. (2004). Segmentation of the Transportation Market with Regard to Activity-based Freight Transport Modelling. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 7(3), 199-218.
- ▶ Macharis, C., & Verbeke, A. (1999). *Intermodaal vervoer - Economische en strategische aspecten van het intermodaal vervoer in Vlaanderen*. Leuven-Apeldoorn: Garant.
- ▶ Macharis, C., Vereecken, L., & Verbeke, A. (2002, May). The possibilities of groupage in Belgium. *Paper presented at the Congress on Freight Transport Automation and Multimodality*. Delft, the Netherlands.
- ▶ Maes, T., Ramaekers, K., Caris, A., Bellemans, T., & Janssens, G. K. (2010, October 25-27). Creating an innovative activity-based freight transportation framework. *Proceedings of The European Simulation and Modelling Conference*. Diepenbeek, Limburg, Belgium.
- ▶ Maes, T., Ramaekers, K., Caris, A., Bellemans, T., & Janssens, G. K. (2010). Innovative freight transportation framework for Flanders. Hasselt University, Transportation Research Institute.
- ▶ Maes, T., Ramaekers, K., Caris, A., Janssens, G. K., & Bellemans, T. (2011, June 6-8). Simulation of logistic decision within freight transportation model. *In Proceedings of the Industrial Simulation Conference*. Venice.
- ▶ Mutlu, F., Çetinkaya, S., & Bookbinder, J. H. (2010). An analytical model for computing the optimal time-and-quantity-based policy for consolidated shipments. *IIE Transactions*, 42(5), 367-377.

- ▶ Ortúzar, J. d., & Willumsen, L. G. (1994). *Modelling Transport* (2e editie 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, 18-31.
- ▶ Samimi, A., Mohammadian, A., & Kawamura, K. (2009, December 13-18). Behavioral freight movement modeling. *12th International Conference on Travel Behaviour Research*. Jaipur, Rajasthan, India.
- ▶ Tavasszy, L. A., Smeenk, B., & Ruijgrok, C. J. (1998). A DSS For Modelling Logistic Chains in Freight Transport Policy Analysis. *International Transactions in Operational Research*, 5(6), 447-459.
- ▶ Tavasszy, L., Ruijgrok, K., & Davydenko, I. (2010, July 11-15). Incorporating logistics in freight transportation models: State of the art and research opportunities. *12th WCTR*. Lisbon, Portugal.
- ▶ 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.
- ▶ Woxenius, J. (2007). Generic Framework for Transport Network Designs: Applications and Treatment in Intermodal Freight Transport Literature. *Transport Reviews*, 27(6), 733-749.

Hoofdstuk 8 – Bijlagen

8.1. Bijlage A – Berekening Totale Logistieke Kost 'Antwerpen – Mechelen'

8.1.1. TRANSPORTKETEN: WEG KLEIN

Tabel 26 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg klein

Weg klein	
Afstand tussen Antwerpen en Mechelen:	29,66 km
Reistijd tussen Antwerpen en Mechelen:	22,95593 min 0,382598833 uur
Wachttijd op volgende truck (helft van frequentie interval):	
	Totaal uren in een week: 168
	Frequentie weg klein: 50
	Duurtijd tussen 2 trucks: 3,36
	Helft van de duurtijd: 1,68
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	6.551,84
Y=	3,36
I=	4.596,48
K=	919,30
	12.510,98

8.1.2. TRANSPORTKETEN: WEG GROOT

Tabel 27 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg groot

Weg groot	
Afstand tussen Antwerpen en Mechelen:	29,66 km
Reistijd tussen Antwerpen en Mechelen:	25,35299 min
	0,422549833 uur
Wachttijd op volgende truck (helft van frequentie interval):	
	Totaal uren in een week: 168
	Frequentie weg groot: 10
	Duurtijd tussen 2 trucks: 16,8
	Helft van de duurtijd: 8,4
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	2.900,64
Y=	14,38
I=	4.596,48
K=	<u>919,30</u>
	8.870,80

8.1.3. TRANSPORTKETEN: WEG KLEIN – SPOOR – WEG KLEIN

Tabel 28 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg klein - spoor - weg klein

Weg klein - spoor - weg klein	
Weg klein: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	10,38 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	16,31021 min
	0,2718368 uur
Wachttijd weg klein:	1,68 uur
Spoor: Antwerpen - Muizen, Afstand:	25,107298 km
Reistijd: Antwerpen - Muizen	18,830473 min
	0,3138412 uur
Wachttijd spoor:	5,6 uur
Weg klein: Muizen - Mechelen, Afstand:	7,85 km
Reistijd: Muizen - Mechelen	8,20026 min
	0,136671 uur
Wachttijd weg klein:	1,68 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	6.209,86
Y=	15,79
I=	4.596,48
K=	919,30
	12.181,43

Tabel 29 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg klein - spoor - weg klein

Weg klein - spoor - weg klein	
Weg klein: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	10,38 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	16,31021 min
	0,2718368 uur
Wachttijd weg klein:	1,68 uur
Spoor: Antwerpen - Willebroek, Afstand:	28,401489 km
Reistijd: Antwerpen - Willebroek	21,301117 min
	0,3550186 uur
Wachttijd spoor:	5,6 uur
Weg klein: Willebroek - Mechelen, Afstand:	10,97 km
Reistijd: Willebroek - Mechelen	8,04764 min
	0,1341273 uur
Wachttijd weg klein:	1,68 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	6.813,98
Y=	15,85
I=	4.596,48
K=	919,30
	<hr/>
	12.785,61

8.1.4. TRANSPORTKETEN: WEG GROOT – SPOOR – WEG GROOT

Tabel 30 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg groot - spoor - weg groot

Weg groot - spoor - weg groot	
Weg groot: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	10,38 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	16,31031 min
	0,2718385 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Spoor: Antwerpen - Muizen, Afstand:	25,107298 km
Reistijd: Antwerpen - Muizen	18,830473 min
	0,3138412 uur
Wachttijd spoor:	5,6 uur
Weg groot: Muizen - Mechelen, Afstand:	7,85 km
Reistijd: Muizen - Mechelen	8,38142 min
	0,1396903 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	5.481,86
Y=	37,70
I=	4.596,48
K=	919,30
	<hr/>
	11.475,34

Tabel 31 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg groot - spoor - weg groot

Weg groot - spoor - weg groot	
Weg groot: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	10,38 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	16,31031 min
	0,2718385 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Spoor: Antwerpen - Willebroek, Afstand:	28,401489 km
Reistijd: Antwerpen - Willebroek	21,301117 min
	0,3550186 uur
Wachttijd spoor:	5,6 uur
Weg groot: Willebroek - Mechelen, Afstand:	10,97 km
Reistijd: Willebroek - Mechelen	8,2361 min
	0,1372683 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	5.586,78
Y=	37,77
I=	4.596,48
K=	919,30
	<hr/>
	11.580,33

8.1.5. TRANSPORTKETEN: WEG KLEIN – BINNENVAART – WEG KLEIN

Tabel 32 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg klein - binnenvaart - weg klein

Weg klein - binnenvaart - weg klein	
Weg klein: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	24,93 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	27,08339 min
	0,45138983 uur
Wachttijd weg klein:	1,68 uur
Binnenvaart: Antwerpen - Vilvoorde, Afstand:	51,749107 km
Reistijd: Antwerpen - Vilvoorde	310,494644 min
	5,17491073 uur
Wachttijd binnenvaart:	5,6 uur
Weg klein: Vilvoorde - Mechelen, Afstand:	13,6 km
Reistijd: Vilvoorde - Mechelen	8,66817 min
	0,1444695 uur
Wachttijd weg klein:	1,68 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	10.055,89
Y=	24,02
I=	4.596,48
K=	919,30
	16.035,69

Tabel 33 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg klein - binnenvaart - weg klein

Weg klein - binnenvaart - weg klein	
Weg klein: Antwerpen - Deurne, Afstand:	9,9 km
Reistijd: Antwerpen - Deurne	13,68894 min
	0,228149 uur
Wachttijd weg klein:	1,68 uur
Binnenvaart: Deurne - Willebroek, Afstand:	29,608038 km
Reistijd: Deurne - Willebroek	177,648228 min
	2,9608038 uur
Wachttijd binnenvaart:	5,6 uur
Weg klein: Willebroek - Mechelen, Afstand:	10,97 km
Reistijd: Willebroek - Mechelen	8,04764 min
	0,13412733 uur
Wachttijd weg klein:	1,68 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	6.661,06
Y=	20,03
I=	4.596,48
K=	<u>919,30</u>
	12.636,87

8.1.6. TRANSPORTKETEN: WEG GROOT – BINNENVAART – WEG GROOT

Tabel 34 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg groot - binnenvaart - weg groot

Weg groot - binnenvaart - weg groot	
Weg groot: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	24,93 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	27,2913 min
	0,454855 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Binnenvaart: Antwerpen - Vilvoorde, Afstand:	51,749107 km
Reistijd: Antwerpen - Vilvoorde	310,494644 min
	5,174910733 uur
Wachttijd binnenvaart:	5,6 uur
Weg groot: Vilvoorde - Mechelen, Afstand:	13,6 km
Reistijd: Vilvoorde - Mechelen	9,10786 min
	0,151797667 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	6.079,89
Y=	45,95
I=	4.596,48
K=	919,30
	12.081,62

Tabel 35 - Link 'Antwerpen - Mechelen': weg groot - binnenvaart - weg groot

Weg groot - binnenvaart - weg groot	
Weg groot: Antwerpen - Deurne, Afstand:	9,9 km
Reistijd: Antwerpen - Deurne	13,68894 min
	0,228149 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Binnenvaart: Deurne - Willebroek, Afstand:	29,608038 km
Reistijd: Deurne - Willebroek	177,648228 min
	2,9608038 uur
Wachttijd binnenvaart:	5,6 uur
Weg groot: Willebroek - Mechelen, Afstand:	10,97 km
Reistijd: Willebroek - Mechelen	8,2361 min
	0,137268333 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	5.510,66
Y=	41,94
I=	4.596,48
K=	<u>919,30</u>
	11.508,38

8.2. Bijlage B – Hoofdtransport SPOOR

Tabel 36 - Hoofdtransport spoor

Link	Beginterminal	Eindterminal	Aantal leveringen
Antwerpen – Leuven 1	Antwerpen	Brussel	15
Antwerpen – Leuven 2	Antwerpen	Brussel	6
Antwerpen – Zaventem	Antwerpen	Brussel	3
Antwerpen – Genk	Antwerpen	Genk	14
Antwerpen – Sint-Truiden	Antwerpen	Genk	22
Antwerpen – Gent 1	Antwerpen	Gent	8
Antwerpen – Gent 2	Antwerpen	Gent	5
Antwerpen – Gent 3	Antwerpen	Gent	10
Antwerpen – Gent 4	Antwerpen	Gent	13
Antwerpen – Aalst	Antwerpen	Gent	19
Antwerpen – Kortrijk	Antwerpen	Kortrijk	10
Antwerpen – Genk	Antwerpen	Meerhout	14
Antwerpen – Sint-Truiden	Antwerpen	Meerhout	22
Antwerpen – Mechelen 1	Antwerpen	Muizen	8
Antwerpen – Mechelen 2	Antwerpen	Muizen	13
Antwerpen – Leuven 1	Antwerpen	Muizen	15
Antwerpen – Leuven 2	Antwerpen	Muizen	6
Antw-Zaventem	Antwerpen	Muizen	3
Antwerpen – Mechelen 1	Antwerpen	Willebroek	8
Antwerpen – Mechelen 2	Antwerpen	Willebroek	13
Antwerpen – Aalst	Antwerpen	Willebroek	19
Antwerpen – Brugge 1	Antwerpen	Zeebrugge	4
Antwerpen – Brugge 2	Antwerpen	Zeebrugge	14
Leuven – Antwerpen 1	Brussel	Antwerpen	21
Leuven – Antwerpen 2	Brussel	Antwerpen	23
Zaventem – Antwerpen 1	Brussel	Antwerpen	9
Zaventem – Antwerpen 2	Brussel	Antwerpen	3

Zaventem – Genk	Brussel	Genk	17
-----------------	---------	------	----

Zaventem – Gent	Brussel	Gent	18
-----------------	---------	------	----

Zaventem – Genk	Brussel	Meerhout	17
-----------------	---------	----------	----

Zaventem – Mechelen	Brussel	Muizen	11
---------------------	---------	--------	----

Aalst – Brugge	Brussel	Zeebrugge	24
----------------	---------	-----------	----

Genk – Antwerpen	Genk	Antwerpen	19
------------------	------	-----------	----

Sint-Truiden – Antwerpen	Genk	Antwerpen	11
--------------------------	------	-----------	----

Genk – Zaventem	Genk	Brussel	3
-----------------	------	---------	---

Gent – Antwerpen 1	Gent	Antwerpen	6
--------------------	------	-----------	---

Gent – Antwerpen 2	Gent	Antwerpen	16
--------------------	------	-----------	----

Gent – Antwerpen 3	Gent	Antwerpen	23
--------------------	------	-----------	----

Aalst – Antwerpen	Gent	Antwerpen	7
-------------------	------	-----------	---

Brugge – Antwerpen 1	Gent	Antwerpen	14
----------------------	------	-----------	----

Brugge – Antwerpen 2	Gent	Antwerpen	5
----------------------	------	-----------	---

Gent – Leuven	Gent	Brussel	17
---------------	------	---------	----

Gent – Aalst	Gent	Brussel	25
--------------	------	---------	----

Gent – Zaventem 1	Gent	Brussel	8
-------------------	------	---------	---

Gent – Zaventem 2	Gent	Brussel	4
-------------------	------	---------	---

Brugge – Sint-Truiden	Gent	Genk	24
-----------------------	------	------	----

Gent – Leuven	Gent	Muizen	17
---------------	------	--------	----

Brugge – Mechelen	Gent	Muizen	8
-------------------	------	--------	---

Gent – Zaventem 1	Gent	Muizen	8
-------------------	------	--------	---

Gent – Zaventem 2	Gent	Muizen	4
-------------------	------	--------	---

Gent – Brugge 1	Gent	Zeebrugge	21
-----------------	------	-----------	----

Gent – Brugge 2	Gent	Zeebrugge	11
-----------------	------	-----------	----

Aalst – Brugge	Gent	Zeebrugge	24
----------------	------	-----------	----

Kortrijk – Antwerpen	Kortrijk	Antwerpen	37
----------------------	----------	-----------	----

Kortrijk – Brugge	Kortrijk	Gent	42
-------------------	----------	------	----

Kortrijk – Brugge	Kortrijk	Zeebrugge	42
-------------------	----------	-----------	----

Genk – Antwerpen	Meerhout	Antwerpen	19
------------------	----------	-----------	----

Sint-Truiden – Antwerpen	Meerhout	Antwerpen	11
--------------------------	----------	-----------	----

Genk – Zaventem	Meerhout	Brussel	3
-----------------	----------	---------	---

Mechelen – Antwerpen 1	Muizen	Antwerpen	17
------------------------	--------	-----------	----

Mechelen – Antwerpen 2	Muizen	Antwerpen	6
------------------------	--------	-----------	---

Mechelen – Antwerpen 3	Muizen	Antwerpen	11
------------------------	--------	-----------	----

Zaventem – Antwerpen 1	Muizen	Antwerpen	9
------------------------	--------	-----------	---

Zaventem – Antwerpen 2	Muizen	Antwerpen	3
------------------------	--------	-----------	---

Leuven – Antwerpen 1	Muizen	Antwerpen	21
----------------------	--------	-----------	----

Leuven – Antwerpen 2	Muizen	Antwerpen	23
----------------------	--------	-----------	----

Mechelen – Zaventem	Muizen	Brussel	6
---------------------	--------	---------	---

Mechelen – Antwerpen 1	Willebroek	Antwerpen	17
------------------------	------------	-----------	----

Mechelen – Antwerpen 2	Willebroek	Antwerpen	6
------------------------	------------	-----------	---

Mechelen – Antwerpen 3	Willebroek	Antwerpen	11
------------------------	------------	-----------	----

Aalst – Antwerpen	Willebroek	Antwerpen	7
-------------------	------------	-----------	---

Genk – Antwerpen	Willebroek	Antwerpen	19
------------------	------------	-----------	----

Antwerpen – Genk	Willebroek	Genk	14
------------------	------------	------	----

Brugge – Antwerpen 1	Zeebrugge	Antwerpen	14
----------------------	-----------	-----------	----

Brugge – Antwerpen 2	Zeebrugge	Antwerpen	5
----------------------	-----------	-----------	---

Brugge – Sint-Truiden	Zeebrugge	Genk	24
-----------------------	-----------	------	----

Brugge – Gent	Zeebrugge	Gent	16
---------------	-----------	------	----

Brugge – Mechelen	Zeebrugge	Muizen	8
-------------------	-----------	--------	---

8.3. Bijlage C – Berekening TLK met consolidatie: 'Antwerpen – Mechelen 1'

8.3.1. CONSOLIDATIE WEG GROOT – SPOOR – WEG GROOT

- ▶ Hoofdtransport = Antwerpen – Muizen
 - 8 leveringen: 3 leveringen met een consolidatiegraad van 97,80%
 - 3 leveringen met een consolidatiegraad van 92,10%
 - 2 leveringen met een consolidatiegraad van 86,40%

Tabel 37 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - spoor - weg groot

Weg groot - spoor - weg groot	
Weg groot: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	10,38 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	16,31031 min
	0,2718385 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Spoor: Antwerpen - Muizen, Afstand:	25,107298 km
Reistijd: Antwerpen - Muizen	18,830473 min
	0,313841217 uur
Wachttijd spoor:	5,6 uur
Weg groot: Muizen - Mechelen, Afstand:	7,85 km
Reistijd: Muizen - Mechelen	8,38142 min
	0,139690333 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	5.438,35
Y=	37,70
I=	4.596,48
K=	919,30
	11.431,83

- ▶ Hoofdtransport = Antwerpen – Willebroek
8 leveringen: 8 leveringen met een consolidatiegraad van 86,40%

Tabel 38 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - spoor - weg groot

Weg groot - spoor - weg groot	
Weg groot: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	10,38 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	16,31031 min
	0,2718385 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Spoor: Antwerpen - Willebroek, Afstand:	28,401489 km
Reistijd: Antwerpen - Willebroek	21,301117 min
	0,355018617 uur
Wachttijd spoor:	5,6 uur
Weg groot: Willebroek - Mechelen, Afstand:	10,97 km
Reistijd: Willebroek - Mechelen	8,2361 min
	0,137268333 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	5.552,61
Y=	37,77
I=	4.596,48
K=	<u>919,30</u>
	11.546,16

8.3.2. CONSOLIDATIE WEG GROOT – BINNENVAART – WEG GROOT

- ▶ Hoofdtransport = Antwerpen – Vilvoorde
- 8 leveringen: 8 leveringen met een consolidatiegraad van 80,40%

Tabel 39 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - binnenvaart - weg groot

Weg groot - binnenvaart - weg groot	
Weg groot: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	24,93 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	27,2913 min
	0,454855 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Binnenvaart: Antwerpen - Vilvoorde, Afstand:	51,749107 km
Reistijd: Antwerpen - Vilvoorde	310,494644 min
	5,174910733 uur
Wachttijd binnenvaart:	5,6 uur
Weg groot: Vilvoorde - Mechelen, Afstand:	13,6 km
Reistijd: Vilvoorde - Mechelen	9,10786 min
	0,151797667 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	6.051,49
Y=	45,95
I=	4.596,48
K=	<u>919,30</u>
	12.053,22

- ▶ Hoofdtransport = Deurne - Willebroek

8 leveringen: 8 leveringen met een consolidatiegraad van 80,40%

Tabel 40 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - binnenvaart - weg groot

Weg groot - binnenvaart - weg groot	
Weg groot: Antwerpen - Deurne, Afstand:	9,9 km
Reistijd: Antwerpen - Deurne	13,68894 min
	0,228149 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Binnenvaart: Deurne - Willebroek, Afstand:	29,608038 km
Reistijd: Deurne - Willebroek	177,648228 min
	2,9608038 uur
Wachttijd binnenvaart:	5,6 uur
Weg groot: Willebroek - Mechelen, Afstand:	10,97 km
Reistijd: Willebroek - Mechelen	8,2361 min
	0,137268333 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	5.494,41
Y=	41,94
I=	4.596,48
K=	<u>919,30</u>
	11.492,13

8.4. Bijlage D – Berekening TLK direct transport en intermodaal transport voor de link 'Antwerpen – Mechelen 1'

Direct transport

Tabel 41 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot

Weg groot	
Afstand tussen Antwerpen en Mechelen:	223,6 km
Reistijd tussen Antwerpen en Mechelen:	25,35299 min 0,422549833 uur
Wachttijd op volgende truck (helft van frequentie interval):	
Totaal uren in een week:	168
Frequentie weg groot:	10
Duurtijd tussen 2 trucks:	16,8
Helft van de duurtijd:	8,4
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	7.555,20
Y=	14,38
I=	4.596,48
K=	<u>919,30</u>
	13.525,36

Intermodaal transport – consolidatiegraad = 75%

Tabel 42 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - spoor - weg groot

Weg groot - spoor - weg groot	
Weg groot: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	10,38 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	16,31031 min
	0,2718385 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Spoor: Antwerpen - Muizen, Afstand:	308,50 km
Reistijd: Antwerpen - Muizen	18,830473 min
	0,313841217 uur
Wachttijd spoor:	5,6 uur
Weg groot: Muizen - Mechelen, Afstand:	7,85 km
Reistijd: Muizen - Mechelen	8,38142 min
	0,139690333 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	7.410,49
Y=	37,70
I=	4.596,48
K=	<u>919,30</u>
	13.403,97

Intermodaal transport – met consolidatiemogelijkheden

Tabel 43 - Link 'Antwerpen - Mechelen 1': weg groot - spoor - weg groot

Weg groot - spoor - weg groot	
Weg groot: Antwerpen - Antwerpen, Afstand:	10,38 km
Reistijd: Antwerpen - Antwerpen	16,31031 min
	0,2718385 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Spoor: Antwerpen - Muizen, Afstand:	308,50 km
Reistijd: Antwerpen - Muizen	18,830473 min
	0,313841217 uur
Wachttijd spoor:	5,6 uur
Weg groot: Muizen - Mechelen, Afstand:	7,85 km
Reistijd: Muizen - Mechelen	8,38142 min
	0,139690333 uur
Wachttijd weg groot:	8,4 uur
Q =	531,34 ton
Totale logistieke kost (in euro):	
O=	440
T=	7.531,73
Y=	37,70
I=	4.596,48
K=	919,30
	13.525,21

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Opnemen van consolidatiemogelijkheden in goederentransportmodellen

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

Jaar: **2012**

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

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

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

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

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

Voor akkoord,

Caenen, Hanne

Datum: **1/06/2012**