

Bepaling van optimale verzendingsstrategieën bij verschillende transportalternatieven

Mieke BERGHMANS

promotor :
Prof. dr. Gerrit JANSSENS

Woord vooraf

Deze eindverhandeling is tot stand gekomen ter voltooiing van mijn opleiding tot het behalen van de graad Handelsingenieur met afstudeerrichting Operationeel Management en Logistiek aan de Universiteit Hasselt te Diepenbeek. Mijn interesse in het logistieke gebeuren, die opgewekt werd tijdens mijn stage en één van mijn studentenjobs, heeft mijn keuze van mijn onderwerp sterk beïnvloed. Het programma dat door dr. Wout Dullaert en Dhr. Bert Vernimmen tot mijn beschikking werd gesteld, maakte het mogelijk om zelf een onderzoek uit te voeren en het theoretische aan de praktijk te toetsen.

Ik zou graag mijn dank willen betuigen aan mijn promotor Prof. dr. G. Janssens voor zijn begeleiding en advies, alsook voor de informatie die hij mij ter beschikking heeft gesteld. Zijn kritische standpunten hebben mij meerdere malen een dienst bewezen.

Verder richt ik eveneens een woord van dank aan dr. Wout Dullaert en Dhr. Bert Vernimmen. Beide zijn medewerkers aan de Vakgroep Transport en Ruimtelijke Economie (van de faculteit Toegepaste Economische Wetenschappen) aan de universiteit van Antwerpen. Aan de hand van het programma dat zij hebben opgesteld, heb ik mijn onderzoek tot een goed einde kunnen brengen. Van hen heb ik eveneens tal van informatiebronnen ontvangen alsook enkele kritische bedenkingen met betrekking tot mijn literatuurstudie.

Ten slotte ben ik eveneens mijn ouders erg dankbaar voor hun hulp en morele en financiële steun die ze mij gegeven hebben tijdens mijn opleiding en tijdens de verwezenlijking van deze eindverhandeling. Bij hen kon ik steeds terecht voor goede raad, een kritisch oordeel en vooral voor een stimulerend praatje.

Samenvatting

Vervoer wordt gedefinieerd als die menselijke activiteit die voortspuit uit het ruimtelijk verplaatsen van personen, goederen en informatie. Door goederen en diensten te vervoeren, vermeerdert hun waarde. Hetzelfde product of een identieke dienst bezit een andere nuttigheidsgraad naargelang de plaats waar het product zich bevindt of waar de dienst plaatsgrijpt. De vraag naar vervoer ontleent zijn nut bijgevolg aan de activiteiten die door de verplaatsingen mogelijk worden. Het transport van goederen en diensten vormt bijgevolg een zeer belangrijke schakel in de logistieke keten.

De logistiek moet er voor zorgen dat de juiste goederen en diensten op het juiste tijdstip, de juiste plaats en in de gewenste staat worden afgeleverd, en dat de onderneming daarmee een zo hoog mogelijk rendement haalt. Transport en voorraadbeheer vormen de belangrijkste elementen van de logistieke keten aangezien ze de grootste kosten uitmaken van deze keten. Om het transport van haar goederen en/of diensten uit te voeren, heeft een bedrijf de keuze uit een brede waaier van transportmogelijkheden. De belangrijkste transportmiddelen zijn het vervoer over de weg, per spoor, over het water, door de lucht en via de pijpleiding. Een onderneming kan echter eveneens opteren om meerdere vervoersmiddelen in te zetten. Ze past bijgevolg intermodaal vervoer toe. Intermodaal vervoer wordt omschreven als het vervoer van een vracht met een eenheidslading via meer dan één vervoersmiddel, waarbij de goederen zelf, tijdens de overslag niet behandeld worden. Eenheidsladingen zijn containers, wissellaadbakken en opleggers. In sommige gevallen worden ook paletten of volledige vrachtwagencombinaties als laadeenheid beschouwd. De intermodale transportketen is opgebouwd uit het voor-, het hoofd- en het natransport. De aaneenschakeling van deze schakels wordt mogelijk door een intermediair overslagpunt.

Een onderneming heeft naast de keuze voor één of meerdere transportalternatieven eveneens de keuze tussen eigen vervoer en beroepsvervoer. Eigen vervoer betekent dat een bedrijf het transport van haar goederen zelf uitvoert en bijgevolg het vervoer zelf produceert. Wanneer

echter de onderneming het vervoer van haar goederen uitbesteedt aan derden tegen betaling van een vervoersprijs, past ze beroepsvervoer toe.

Om de keuze tussen verschillende transportalternatieven te vergemakkelijken, kan een transportdienst, zijnde een set van prestatiekenmerken die aangekocht worden aan een bepaalde prijs, gezien worden in termen van kenmerken die voor alle diensten gelden. Deze kenmerken zijn de prijs, de gemiddelde levertermijn, de variabiliteit in de levertermijn en verlies en schade. Deze factoren lijken de meest belangrijke te zijn voor beslissingsmakers. Indien de prijs beschouwd wordt om een keuze te maken tussen een aantal transportalternatieven, kan een onderneming zich baseren op de afweging tussen de transportkosten en de voorraadkosten.

De mogelijke inzetbaarheid van de verschillende vervoerswijzen kan eveneens aangeduid worden door een aantal factoren van secundair belang zoals de beschikbaarheid, de frequentie, de grootte of de capaciteit, de snelheid, de toegankelijkheid, het comfort, de variabiliteit, de veiligheid, de dichtheid van het transportnetwerk, de wetgeving en milieubeschouwingen. Elk van deze factoren bepalen de geschiktheid van een bepaald transportalternatief.

Ten slotte bestaat er een verkeerstechnische indeling. Deze indeling wordt gemaakt op basis van het ingezette vervoermiddel en de hiervoor noodzakelijke infrastructuur. De hoeveelheid, de aard en de waarde van de te vervoeren goederen, de af te leggen afstand, de snelheid en het doordringingsvermogen van het vervoermiddel helpen de keuze van het transportalternatief mee bepalen.

De optimale transportwijze(n) kan vanuit een logistiek standpunt geanalyseerd worden op basis van de totale logistiek kostprijs aan de hand van het 'inventory-theoretic' model. Een logistieke beslissing beïnvloedt verschillende logistieke kosten die samen de totale logistieke kostprijs uitmaken. Wanneer een onderneming een afweging maakt tussen verschillende transportalternatieven, moet rekening gehouden worden met alle kosten binnen de logistieke

keten waarop transportbeslissingen een invloed uitoefenen. De totale logistieke kosten dienen te geminimaliseerd te worden en niet slechts één kostenelement binnen de logistieke keten.

De totale logistieke kosten bestaan uit de transportkosten, de kosten van goederenbehandeling, de voorraadkosten, de kosten van voorraadtekort, de verpakkingskosten, de kosten van orderbehandeling, de administratie- en instelkosten, de kosten van klantenservice en de kosten van vestigingsplaats. De transport- en de voorraadkosten vormen de belangrijkste kostenelementen.

De transportkosten nemen minder dan proportioneel toe indien de partijgrootte toeneemt. Deze schaalvoordelen zijn echter niet altijd van toepassing, aangezien sommige vervoerswijzen zoals het spoorvervoer en de binnenvaart voor- en/of natransport over de weg en de overslag van goederen aan de terminals vereisen. De transportkosten nemen aanzienlijk toe door deze bijkomende diensten.

Vorraden kunnen ontstaan aan land (cyclische voorraad) en tijdens het vervoer (voorraad tijdens het vervoer). Beide voorraadsoorten veroorzaken kosten voor de gebruiker van vervoer. Goederen kunnen eveneens om andere redenen gestockeerd worden zoals bijvoorbeeld veiligheidsvoorraad of seizoensvoorraad. De kostprijs om goederen te stockeren, bestaat uit intrestkosten, verzekeringskosten of verzekeringsrisico, ontwaardingskosten en magazijnkosten. Deze vier kostencomponenten vormen samen de voorraadkost of 'holding cost'.

De keuze voor het transportalternatief met de laagste transportkosten leidt niet noodzakelijk tot het goedkoopste vervoersmiddel. Bij een minimalisatie van de transportkosten, moet geopteerd worden voor tragere vervoerswijzen. Door de snelheid en betrouwbaarheid van deze transportalternatieven, kunnen echter de voorraadkosten toenemen. De logistieke beslissingsnemer wordt bijgevolg geconfronteerd met twee logistieke kosten die als het ware in conflict zijn met elkaar. Welke transportwijze uiteindelijk het goedkoopst zal uitvallen qua totale logistieke kosten, hangt af van een aantal factoren zoals onder andere de waarde van de goederen die vervoerd worden, de hoogte van de voorraadkosten, de levertijden van de

verschillende vervoermodi (waarbij zowel snelheid als stiptheid van belang zijn), het jaarlijks volume dat vervoerd moet worden.

In het praktijkonderzoek wordt de theorie aan de praktijk getoetst. Aan de hand van een algoritme wordt nagegaan of de transportkosten, de gemiddelde levertermijn en de variantie in de levertermijn daadwerkelijk een invloed hebben op de ingezette transportalternatieven en op de totale logistieke kost. Het algoritme dat hiervoor gebruikt wordt, werd opgesteld door dr. Wout Dullaert en Dhr. Bert Vernimmen. Beide zijn medewerkers aan de Vakgroep Transport en Ruimtelijke Economie (van de faculteit Toegepaste Economische Wetenschappen) aan de universiteit van Antwerpen. Het algoritme bepaalt aan de hand van een aantal gegevens de optimale mix van transportalternatieven. De transportalternatieven die de totale logistieke kost minimaliseren, worden geselecteerd.

Uit het onderzoek blijkt dat de transportkosten de grootste invloed hebben op de totale logistieke kost. De gemiddelde levertermijn beïnvloedt eveneens de totale logistieke kost en de ingezette transportalternatieven. De variantie heeft weinig tot geen effect. Verder worden de interacties tussen bepaalde combinaties van deze variabelen geanalyseerd. Slechts vier variabelen worden in beschouwing genomen omdat ze zowel bij een toename als een afname een invloed hebben op de totale logistieke kost. Het betreft de transportkost van een transportalternatief van 25 ton, de transportkost en de gemiddelde levertermijn van een transportalternatief van 1000 ton en de gemiddelde levertermijn van een vervoerwijze van 600 ton. De andere variabelen hebben geen of enkel in één richting een effect op de totale logistieke kost. De interacties tussen paren van variabelen hebben in de meeste gevallen een belangrijke invloed op de totale logistieke kost. Ook een wijziging van de vier variabelen tezamen, heeft een belangrijke invloed op de totale logistieke kost. Indien slechts drie van de vier variabelen gewijzigd worden, is de invloed op de totale logistieke kost eerder klein.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	Blz.
Samenvatting	
Hoofdstuk 1: Probleemstelling en onderzoeksopzet	1
1.1 Probleemstelling	1
1.1.1 Praktijkprobleem	1
1.1.2 Centrale onderzoeksvraag	1
1.1.3 Deelvragen	2
1.2 Definiëring	3
1.2.1 Logistiek	3
1.2.2 De vijf belangrijkste vormen van transport	4
1.2.3 Intermodaal vervoer	8
1.3 Onderzoeksopzet	11
Hoofdstuk 2: Keuze tussen eigen vervoer en beroepsvervoer en de keuze van het transportmiddel	12
2.1 Keuze tussen eigen vervoer en beroepsvervoer	12
2.2 Keuze van het transportmiddel	12
2.2.1 Indeling op basis van de belangrijkste kenmerken van diensten	13
2.2.1.1 Prijs	14
2.2.1.2 Levertermijn en variabiliteit	16
2.2.1.3 Verlies en schade	17
2.2.1.4 Andere belangrijke factoren	18
2.2.2 Verkeerstechnische indeling	19
2.3 Keuze tussen unimodaal en intermodaal vervoer	20

Hoofdstuk 3: De totale logistieke kost	24
3.1 Inleiding	24
3.2 De totale logistieke kosten	25
3.2.1 Situering in de literatuur	25
3.2.2 Verschillende definities	26
3.2.3 Kostenelementen	29
3.2.3.1 Transportkosten	29
3.2.3.2 Kosten van goederenbehandeling	30
3.2.3.3 Voorraadkosten	31
a) Samenstellende delen van de voorraadkost	31
b) Soorten voorraden	35
3.2.3.4 Kosten van voorraadtekort	45
3.2.3.5 Verpakkingskosten, kosten van orderbehandeling en administratie en instelkosten	46
3.2.3.6 Kosten van klantenservice	47
3.2.3.7 Kosten van vestigingsplaats	47
3.2.4 Afruil tussen transportkosten en voorraadkosten	47
3.2.5 Kritiek op het 'inventory-theoretic' model	49
Hoofdstuk 4: Inleiding op het praktijkonderzoek	50
4.1 Inleiding	50
4.2 'Order splitting'	50
4.2.1 Definiëring	50
4.2.2 'Order splitting' in de literatuur	51
4.2.2.1 Besparingen in de kosten van de veiligheidsvoorraad en de tekortkosten	52
4.2.2.2 Besparingen in de kosten van de cyclische voorraad	53
4.2.2.3 Toenemende bestelkosten	54
4.3 Beschrijving van het algoritme en zijn implementatie	56
4.3.1 Voorwaarden	56
4.3.2 Genetisch algoritme	57

4.3.2.1 Initialisatie	58
4.3.2.2 Selectie	58
4.3.2.3 Reproductie	59
4.3.2.4 Substitutie	60
4.3.2.5 Stopconditie	60
4.3.3 Implementatie van het genetisch algoritme in het programma van dr. Dullaert en Dhr. Vernimmen	61
4.3.4 Parameters	63
4.3.4.1 Productparameters	63
4.3.4.2 Parameters van de transportalternatieven	64
4.3.4.3 Parameters van het genetisch algoritme	65
4.3.5 Beschrijving van het programma	66
4.3.5.1 Beschrijving van het inputbestand	66
4.3.5.2 Beschrijving van het outputbestand	66
4.3.5.3 Initiële oplossing	68
 Hoofdstuk 5: Praktijkonderzoek	 69
5.1 Inleiding	69
5.2 Deel 1: Wijziging van één variabele	70
5.2.1 Experimenteel opzet	70
5.2.2 Runtime	72
5.2.3 Statistische analyse van de resultaten	73
5.2.3.1 Statistische analyse	73
5.2.3.2 Resultaten	75
5.2.4 Conclusies	82
5.3 Deel 2: Wijziging van meerdere variabelen	82
5.3.1 Experimenteel opzet	82
5.3.2 Runtime	85
5.3.3 Statistische analyse van de resultaten	85
5.3.3.1 Statistische analyse	85
5.3.3.2 Resultaten	88

5.3.4 Conclusies	91
Hoofdstuk 6: Algemeen besluit	93
Lijst van geraadpleegde werken	94
Lijst van figuren	100
Lijst van tabellen	101
Lijst van symbolen	102
Bijlagen	104
Bijlage 1: Voorbeeld van een inputbestand	
Bijlage 2: Voorbeeld van een outputbestand	
Bijlage 3: Experimentele punten onderzoek deel 1	
Bijlage 4: Resultaten onderzoek deel 1	
Bijlage 5: Statistische analyse van de resultaten onderzoek deel 1	
Bijlage 6: De t -verdeling	
Bijlage 7: Experimentele punten onderzoek deel 2	
Bijlage 8: Resultaten onderzoek deel 2	
Bijlage 9: Design matrix	
Bijlage 10: Berekening hoofd- en interactie-effecten voor de eerste replicatie	
Bijlage 11: Statistische analyse van de resultaten onderzoek deel 2	

Hoofdstuk 1: Probleemstelling en onderzoeksopzet

1.1 Probleemstelling

1.1.1 Praktijkprobleem

Een onderneming die bepaalde goederen produceert, maakt gebruik van vervoer om de goederen te transporteren naar de klant. Dit bedrijf heeft de keuze tussen eigen vervoer en beroepsvervoer. In het eerste geval neemt de onderneming het transport van haar producten in eigen handen door zelf vervoersmiddelen aan te schaffen. Bij het toepassen van beroepsvervoer besteedt het bedrijf haar transport uit tegen betaling van een vervoersprijs.

De onderneming staat eveneens voor de beslissing welk type transportmiddel of combinatie van transportmiddelen ze zal hanteren om de goederen te vervoeren. Ze zal een keuze moeten maken tussen wegtransport, het vervoer via het spoor, de binnenvaart, het luchtvervoer, het zeevervoer, het vervoer via pijpleiding of een combinatie van deze alternatieven, namelijk intermodaal vervoer. Het is belangrijk dat een bedrijf de geproduceerde goederen kan vervoeren tegen een zo laag mogelijk kost zonder de kwaliteit van de dienstverlening niet uit het oog te verliezen.

1.1.2 Centrale onderzoeksvraag

In deze eindverhandeling wordt gezocht naar een optimale verzendingsstrategie bij bepaalde transportalternatieven. De bepaling gebeurt aan de hand van een aantal criteria. Deze criteria kunnen zowel van financiële als van kwalitatieve aard zijn. Voornamelijk wordt rekening gehouden met de financiële factoren. Deze financiële factoren kunnen kortweg de totale logistieke kosten genoemd worden. In de afweging tussen de verschillende transportmiddelen wordt eveneens rekening gehouden met de kwalitatieve factoren zoals de kwaliteit van de dienstverlening, de grootte van de levering en de frequentie van het leveren. De kwalitatieve

criteria kunnen eventueel in termen van kosten worden omgezet. De bepaling van een optimale strategie gebeurt vooral vanuit een logistiek kostenstandpunt. De beste afweging wordt gemaakt door na te gaan met welke kosten er rekening gehouden moet worden en door de som van deze kosten te minimaliseren.

Derhalve wordt de volgende centrale onderzoeksvraag als uitgangspunt genomen voor deze eindverhandeling:

“Welke factoren bepalen de optimale verzendingsstrategieën bij een aanbod van verschillende transportalternatieven?”

1.1.3 Deelvragen

Ter vergemakkelijking wordt de centrale onderzoeksvraag onderverdeeld in een aantal deelvragen. Op deze wijze kan het praktijkprobleem worden onderzocht aan de hand van een literatuurstudie en een onderzoek.

- Op basis van welke factoren kiest een bedrijf voor eigen vervoer of beroepsvervoer?
- Waarop baseert een onderneming zich bij de keuze van een transportalternatief?
- Passen de meeste bedrijven intermodaal vervoer toe? Waarom doen ze dit wel of waarom doen ze dit juist niet?
- Wat is de optimale transportwijze voor de vervoersgebruiker vanuit logistiek standpunt en wanneer houdt de gebruiker rekening met andere kwalitatieve factoren? Met welke logistieke kosten moet hij rekening houden?
- Met behulp van welke modellen kan de totale logistieke kost berekend worden?
- Welke variabelen beïnvloeden de totale logistieke kost en de keuze tussen transportalternatieven?

1.2 Definiëring

Vervoer kan in het algemeen gedefinieerd worden als die menselijke activiteit die voortspuit uit het ruimtelijk verplaatsen van personen, goederen en informatie. Via de vervoersector wordt aan goederen en diensten een waardevermeerdering verschaft. Eenzelfde product of een identieke activiteit neemt een gedifferentieerde nuttigheidsgraad aan naargelang de plaats waar het product zich bevindt of waar de activiteit plaatsgrijpt. De vraag naar vervoer ontleent zijn nut bijgevolg niet aan de verplaatsing zelf, echter wel aan de activiteiten die door de verplaatsingen mogelijk worden (Witlox, 2004-2005, p. 6). Dit betekent bijgevolg dat goederen, die aan de andere kant van de wereld geproduceerd worden, voor ons geen nut opleveren indien ze niet getransporteerd kunnen worden. De distributie van goederen vormt derhalve een onmisbare schakel in de logistieke keten. Wat is nu echter logistiek en uit welke elementen bestaat de logistieke keten?

1.2.1 Logistiek

Ballou (1992, p. 7) definieert logistiek als volgt: 'De logistiek heeft tot taak om op een zo doelmatig mogelijke manier de klant goederen en diensten te verschaffen, en wel zo dat de behoeften van laatstgenoemde worden bevredigd.' Of om het anders te formuleren moet de logistiek er voor zorgen dat de juiste goederen en diensten op het juiste tijdstip, de juiste plaats en in de gewenste staat worden afgeleverd, en dat de onderneming daarmee een zo hoog mogelijk rendement haalt.

De bedrijfsactiviteiten die tot de verantwoordelijkheid van de afdeling logistiek behoren, verschillen van onderneming tot onderneming. Het hangt af van de organisatiestructuur, de opvatting van het management over logistiek en het belang van logistieke activiteiten voor de werkzaamheid van een onderneming (Ballou, 1992, p. 8-13). Transport en voorraadbeheer zijn de logistieke activiteiten met de grootste kosten. Transport voegt 'plaats'-waarde toe aan producten en diensten. Deze activiteit is van groot belang omdat geen enkel bedrijf kan draaien als het niet zorgt voor de aanlevering van zijn grondstoffen en/of de verspreiding van

zijn eindproducten. Vervoer is in de loop van de geschiedenis van essentieel belang geweest voor de goede functionering van de economie en het maatschappelijke leven.

1.2.2 De vijf belangrijkste vormen van transport

Een onderneming kan een keuze maken uit een brede waaier van transportmogelijkheden om het transport van haar goederen uit te voeren. De belangrijkste transportmiddelen zijn het vervoer over de weg, per spoor, over het water, door de lucht en via de pijpleiding. Vervolgens worden deze vijf vervoerswijzen besproken en worden enkele voor- en nadelen opgesomd.

In 2000 kent het wegtransport een marktaandeel van 68% in tonkm (1 tonkm is het transport van 1 ton over 1 kilometer) in België. Deze vervoerwijze staat voor snel en betrouwbaar transport. Vooral op korte afstanden is het vervoer flexibel en goedkoop. Overslag op andere transportmiddelen is bij transport per vrachtwagen niet nodig.¹ Het wegvervoer beschikt over een ‘deur-tot-deur’ service waardoor geen laden of lossen vereist is tussen vertrek en aankomst. Andere belangrijke voordelen omvatten de frequentie en beschikbaarheid en de ‘deur-tot-deur’ snelheid en geschiktheid (Ballou, 1999, p. 142-143). Dit transportmiddel kent echter eveneens een aantal nadelen. De congestieproblematiek in België is groot, hierdoor krijgen de vervoerders steeds vaker te maken met vertragingen op de weg. Dit gaat ten koste van de betrouwbaarheid van deze transportmodaliteit. Wat betreft de snelheid zijn spoor- en wegvervoer aan elkaar gewaagd, voornamelijk vanaf de middellange afstanden. Bij wegvervoer moet echter rekening worden gehouden met rusttijdregelingen voor chauffeurs.² Naast het congestieprobleem ondervindt het wegvervoer eveneens een milieu- en veiligheidsprobleem (Vannieuwenhuyse, 2003, p. 3). De uitstoot van emissies is in vergelijking met andere modaliteiten groot. De veiligheid is eveneens in vergelijking met andere transportmiddelen kleiner. De kans op een ongeluk is groter en de gevolgen bij een ongeluk zijn ernstiger. Verder hebben vrachtwagens een beperkte capaciteit. Een vrachtauto

¹ http://www.chappin.com/docs/spm3910_totaalrapport_definitief.pdf (geraadpleegd op 6 mei 2006)

² http://www.chappin.com/docs/spm3910_totaalrapport_definitief.pdf (geraadpleegd op 6 mei 2006)

als trekker met oplegger heeft een maximale lengte van 15 meter. Een motorwagen met aanhanger heeft een maximale lengte van 18 meter. Het wegvervoer gaat gepaard met hoge kosten. De wegvoertuigen vergen relatief lage investeringen, doch kennen eveneens een lage levensduur. Bovendien zijn de arbeids-, brandstof- en belastingkosten erg hoog. Per eenheid van vervoerde ton is de verwachting dat het wegvervoer de duurste modaliteit is.³

Het Belgisch spoorvervoer had in 2000 een marktaandeel van 16% in tonkm. Deze vervoerswijze blijkt meestal geen alternatief voor het wegvervoer. Vooral op flexibiliteit en betrouwbaarheid scoort het spoorvervoer niet goed (Vannieuwenhuysse, 2003, p. 4). Het heeft tevens een beperkte capaciteit aan infrastructuur. Dit heeft als gevolg dat het vervoer van goederen per trein meestal niet tot op de eindbestemming kan plaatsvinden en dat natransport vereist is. Dit is niet wenselijk, omdat een bedrijf op deze manier meer tijd kwijt is en er meer kosten gemaakt worden door de overslag. Het vervoer per spoor is wel relatief goedkoop door de grote hoeveelheden en afstanden die kunnen worden bereikt. Het vervoer per spoor is echter een traag vervoermiddel van vooral grondstoffen zoals kolen, timmerhout en chemicaliën en van laagwaardige producten zoals voeding, papier en houtproducten (Ballou, 1999, p. 142). De infrastructuur en het benodigde materieel zoals locomotieven en wagons kennen een lange afschrijvingsperiode en er is weinig personeel nodig voor het vervoer. Dit leidt tot lage transportkosten per rit. De personeelskosten zijn daarentegen door de complexe verkeersgeleiding relatief hoog. Het kostenniveau op langere afstanden ligt tussen dat van het weg- en binnenvaartvervoer in. Ten slotte vormt het spoorvervoer een milieuvriendelijke en veilige transportmodaliteit.⁴

Een marktaandeel van 13% in tonkm in België in 2000 staat op naam van de binnenvaart. Deze vervoerswijze biedt op korte termijn meer mogelijkheden in vergelijking met het spoorvervoer. Eind jaren negentig is de binnenvaart geliberaliseerd en nu reeds blijkt deze vervoerswijze concurrentieel met het wegvervoer. Om grote volumes te vervoeren over grote afstanden, wordt de binnenvaart even hoog ingeschat als het wegvervoer (Vannieuwenhuysse, 2003, p. 5). Binnenvaart is een goedkoop, veilig en milieuvriendelijk transportalternatief. Per

³ http://www.chappin.com/docs/spm3910_totaalrapport_definitief.pdf (geraadpleegd op 6 mei 2006)

⁴ http://www.chappin.com/docs/spm3910_totaalrapport_definitief.pdf (geraadpleegd op 6 mei 2006)

rit kunnen enorme hoeveelheden goederen naar de bestemming vervoerd worden, met relatief weinig uitstoot van schadelijke stoffen. Hoewel de investeringen in schepen bijzonder hoog zijn, kunnen afschrijvingstermijnen oplopen tot meerdere decennia. Door het grote laadvermogen zijn deze afschrijvingskosten, net zoals de arbeids- en brandstofkosten zeer laag. Een ander voordeel van deze modaliteit is dat het vervoer niet gebonden is aan tijden waarop een schipper kan varen. Hierdoor spreiden de verkeersstromen zich en is het minder druk op de vaarwegen. Zo wordt de capaciteit van de vaarwegen beter benut.⁵ Het vervoer per schip kent echter ook een aantal beperkingen. Het binnenlands watertransport beperkt zich tot het binnenlands waterwegennetwerk. Dit heeft tot gevolg dat de verzenders gelokaliseerd moeten zijn op de waterwegen of dat ze een andere transportwijze moeten hanteren in combinatie met het vervoer over water. De beschikbaarheid van vervoer over water wordt eveneens sterk beïnvloed door de weersomstandigheden (Ballou, 1999, p. 144-145). Daarnaast is de vaarroute afhankelijk van het scheepstype dat gekozen wordt voor het vervoer. Niet elk schip kan door zijn afmetingen (voornamelijk bepaald door de diepgang) door de verschillende vaarwegen. De binnenvaart kenmerkt zich als erg betrouwbaar. Een nadeel is echter de lage transportsnelheid. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een lage vaarsnelheid (12 km/uur) en het frequent moeten wachten bij sluizen en bruggen.⁶

Het gebruik van luchttransport is de laatste jaren toegenomen. Doch is de luchtvrachtprijs hoger dan die van het wegvervoer en van het spoorvervoer (Ballou, 1999, p. 143-144). Het luchtvervoer komt enkel in aanmerking in bepaalde vervoerniches. Goederen met een grote waardedensiteit en waarbij de snelheid van leveren essentieel is, worden vervoerd door de lucht (Vannieuwenhuyse, 2003, p. 5). Met een gemiddelde lengte van 2092 km per traject, worden met het luchtvervoer vooral lange afstanden afgelegd. Hoewel het vervoer door de lucht gevoelig is voor mechanische defecten, weersomstandigheden en verkeersopstoppingen, is de variabiliteit in de levertermijn laag in absolute termen. Wanneer de variabiliteit echter wordt vergeleken met de gemiddelde levertermijn, kan het vervoer door de lucht gerangschikt worden als één van de minst betrouwbare transportalternatieven. De capaciteit van het luchttransport wordt beperkt door de fysieke afmetingen van de vrachtruimte in en de

⁵ http://www.chappin.com/docs/spm3910_totaalrapport_definitief.pdf (geraadpleegd op 6 mei 2006)

⁶ http://www.chappin.com/docs/spm3910_totaalrapport_definitief.pdf (geraadpleegd op 6 mei 2006)

opstijgcapaciteit van het vliegtuig. Deze beperking wordt deels opgeheven wanneer grotere vliegtuigen ingezet worden. De kosten worden verwacht af te nemen door de voordelen van nieuwe technologieën, deregulatie en productiviteitsverbeteringsprogramma's. Dit maakt het vervoer door de lucht een ernstige concurrent van de transportdiensten over het land. Het luchttransport bezit een duidelijk voordeel in termen van verlies en schade. In het algemeen is minder beschermende verpakking vereist voor het luchtvervoer, aangezien de behandeling op de grond geen hogere blootstelling aan schade veroorzaakt en omdat diefstal in de luchthavens niet overmatig voorkomt (Ballou, 1999, p. 143-144). Een nadeel van het luchtvervoer is dat meer en meer congestieproblemen optreden in de West-Europese havens. De vele vluchten, vooral 's nachts, leiden tot overlast bij de lokale bevolking (Vannieuwenhuysse, 2003, p. 5).

Ten slotte is er het transport via pijpleidingen. Het vervoer van goederen door middel van pijpleidingen betreft een geheel ander soort van transport (Ballou, 1999, p. 145). Pijpleidingen transporteren in de Europese Unie amper 5% van de goederen (in tonkm). In België bedraagt het marktaandeel 3,4% in tonkm voor het jaar 2000 (Vannieuwenhuysse, 2003, p. 5). Deze vervoerswijze biedt een zeer beperkte waaier van diensten en capaciteiten. De meest economisch haalbare producten om te vervoeren per pijpleiding zijn ruwe olie of aardolie en gezuiverde petroleumproducten. Door vermenging met water kunnen eveneens vaste producten worden getransporteerd via een pijpleiding. Dit wordt gedefinieerd als het "slurry"-transport (Ballou, 1999, p. 145). Doch kent dit transportmiddel een aantal voordelen. De ondergrondse infrastructuur is geheel afgescheiden van andere soorten infrastructuur. Dit heeft het grote voordeel dat kans op schade klein is door de afwezigheid van invloeden van buitenaf, zoals bijvoorbeeld weersomstandigheden. Het transport per pijpleiding onderscheidt zich van de andere vervoermodaliteiten omdat bij dit soort vervoer geen sprake is van vervoer met containers. De goederen kunnen direct door de pijpleiding vervoerd worden. Voordelig is tevens dat door de afgescheiden infrastructuur geen rekening hoeft gehouden te worden met enige vormen van vertraging (Ballou, 1999, p. 145). Niettegenstaande dat het vervoer via pijpleiding een heel milieuvriendelijke, goedkope en betrouwbare vervoerswijze is, staan de zware investeringskosten dit transportmiddel vaak in de weg (Vannieuwenhuysse, 2003, p. 5). Een bijkomende nadeel is dat het verplaatsen van producten via pijpleidingen zeer traag

verloopt. Ongeveer 5 tot 6 kilometer worden gemiddeld per uur afgelegd. Deze traagheid wordt gematigd door het feit dat de producten 24 uur op 24 en 7 dagen per week kunnen verscheept worden. Dit maakt de effectieve snelheid veel groter ten opzichte van andere transportwijzen. De capaciteit van pijpleidingen is eveneens zeer groot. De beschikbaarheid van de capaciteit van pijpleidingen wordt enkel beperkt doordat andere verzenders eveneens gebruik kunnen maken van deze vervoerswijze. Het is mogelijk dat de faciliteiten bezet zijn op het moment dat de verzender de infrastructuur wenst te gebruiken (Ballou, 1999, p. 145).

Om de kwaliteit van de verschillende transportalternatieven samen te vatten, toont de volgende tabel (tabel 1) een SWOT-analyse van de verschillende vervoerwijzen. Hierin worden de sterktes, zwaktes, kansen en bedreigingen weergegeven.

Tabel 1: SWOT-analyse van de verschillende transportalternatieven

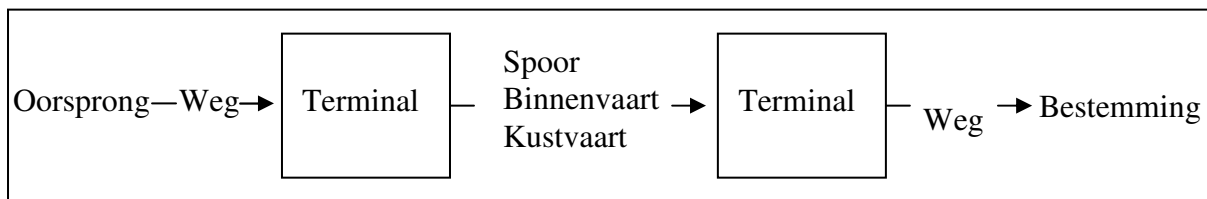
	Weg	Spoor	Binnenvaart	Luchtvaart	Pijpleiding
Sterktes	Flexibiliteit Bereikbaarheid	Bestaande netwerk	Lage operationele kost	Snelheid	Milieuvriendelijk
Zwaktes	Congestie	Gebrek aan flexibiliteit	Traagheid	Duur	Beperkte toepassingen
Kansen	Nieuwe logistieke evoluties	Liberalisatie	Politieke prioriteit	Liberalisatie	Nieuwe goederenniches
Bedreigingen	Extra regelgeving	Bedrijfscultuur	Beperkt netwerk	Congestie	Terrorisme

Bron: Vannieuwenhuyse, 2003, p. 6

1.2.3 Intermodaal vervoer

Een onderneming kan één van bovenstaande transportmogelijkheden selecteren om haar goederen op de plaats van bestemming te krijgen. Ze kan echter eveneens opteren om

meerdere vervoersmiddelen in te zetten. Wanneer een onderneming deze methode toepast, vindt intermodaal vervoer plaats. Intermodaal vervoer wordt omschreven als het vervoer van een vracht met een eenheidslading via meer dan één vervoersmiddel, waarbij de goederen zelf, tijdens de overslag niet behandeld worden. Onder eenheidsladingen vallen containers, wissellaadbakken en opleggers. In sommige gevallen worden ook paletten of volledige vrachtwagencombinaties als laadeenheid beschouwd. De intermodale keten wordt weergegeven op figuur 1.



Figuur 1: De intermodale keten. Bron: Macharis et al. (1999).

Concreet toont deze figuur dat een eenheidslading per vrachtwagen naar de dichtstbijzijnde terminal wordt gebracht om daar op een andere vervoersmodi overgeslagen te worden. Via deze transportwijze (bijvoorbeeld spoor, binnenvaart, ...) komt de eenheidslading bij een tweede terminal, waar de lading opnieuw overgeslagen wordt, zodanig dat de lading met behulp van een vrachtwagen zijn eindbestemming bereikt (Macharis et al., 1999).

In de transportketen kunnen bijgevolg drie verschillende operaties onderscheiden worden. Eerst en vooral bestaat de keten uit het voor- en natransport. Bij het voortransport wordt de laadeenheid van de verlader naar de terminal gebracht. Dit gebeurt via vervoer over de weg. Het natransport bestaat uit het vervoeren van de laadeenheid van de terminal naar de klant. Dit gebeurt eveneens over de weg. Een tweede stap bestaat uit de operaties in de terminal of de overslagplaats. In deze terminals wordt de laadeenheid overgeslagen van de ene transportwijze op de andere. Zowel verticale als horizontale overslagtechnieken zijn bekend. In het eerste geval worden de container, de wissellaadbak of de oplegger opgetild met een vorkheflift of een kraan en op deze manier overgeslagen naar een andere vervoerswijze. Opleggers kunnen echter eveneens horizontaal overgeslagen worden. Net zoals in het geval van vrachtwagencombinaties worden zij in de andere vervoerswijze gereden. Naast de

overslagfunctie vervullen de terminals andere functies. Een van de belangrijkste nevenactiviteiten is de opslagfunctie. Ten slotte bestaat gecombineerd vervoer uit het hoofdtransport tussen de terminals. Dit deel van het transport omvat de grootste afstand van het in totaal af te leggen traject en verloopt meestal via het spoor of de binnenvaart. De kustvaart of short sea shipping komt hiervoor eveneens in aanmerking. Short sea shipping vervoer wordt gedefinieerd als het maritiem vervoer op relatief korte afstand waarbij geen oceanen worden overgestoken (Witlox, 2004-2005, p. 14).

De toegenomen internationale verzendingen vormen de drijvende kracht achter intermodaal vervoer. Het belangrijkste kenmerk van intermodaliteit is de vrije uitwisseling van uitrusting tussen twee transportalternatieven. Dergelijke uitwisseling van uitrusting creëert transportdiensten die niet beschikbaar zijn wanneer slechts één transportwijze gehanteerd wordt. Het succes van intermodaal vervoer is sterk afhankelijk van de samenwerking tussen de verschillende operatoren, de coördinatie van de verschillende transportalternatieven en van de faciliteiten in de overslagpunten.

De termen “multimodaal” of “gecombineerd goederenvervoer” worden in Europa meestal gebruikt in plaats van het begrip intermodaal vervoer. Multimodaal vervoer wordt gedefinieerd als het vervoer van goederen door tenminste twee verschillende transportwijzen. Het verschil tussen intermodaal en multimodaal vervoer heeft betrekking op de transportintegratie. De transportketen wordt voor de verlader opgevat als een opeenvolging van op zichzelf bestaande vervoersdiensten wanneer het gaat om multimodaal transport. Bij intermodaal vervoer wordt de betrokken keten echter als één vervoerdienst beschouwd. Intermodaal transport kan bijgevolg gezien worden als multimodaal vervoer van eenheidsladingen.

Gecombineerd vervoer wordt door Macharis en Verbeke (1999 volgens Blauwens et al., 2002a, p. 59-60) omschreven als de combinatie van tenminste twee transportwijzen in een enkele transportketen, zonder dat de goederen van container veranderen, waarbij het grootste gedeelte van het traject wordt afgelegd per spoor, binnenvaart of kustvaart en met een zo kort mogelijk initieel en finaal traject over de weg. Bijgevolg kan dit soort vervoer beschouwd

worden als een onderdeel van intermodaal vervoer. De meest gebruikte combinatie in het gecombineerd vervoer is het gecombineerd weg/spoorvervoer.

Er bestaan tien mogelijke intermodale combinaties: (1) spoor en weg, (2) spoor en water, (3) spoor en lucht, (4) spoor en pijpleiding, (5) weg en lucht, (6) weg en water, (7) weg en pijpleiding, (8) water en pijpleiding, (9) water en lucht, en (10) lucht en pijpleiding. Het vervoer over het spoor en over de weg, ‘piggyback’ genoemd, ondervindt wijdverspreid gebruik. Weg-watercombinaties worden in de literatuur eveneens ‘fishyback’ genoemd. Deze combinaties winnen aan belang, vooral in de internationale verplaatsing van goederen met een hoge waarde. Weg-spoor- en spoor-watercombinaties zijn in mindere mate haalbaar en worden bijgevolg weinig toegepast.

1.3 Onderzoeksopzet

Om de praktijk te toetsen aan de theorie wordt aan de hand van een onderzoek nagegaan welke variabelen daadwerkelijk een rol spelen bij de keuze voor één of meerdere transportmiddelen. Het onderzoek gebeurt aan de hand van een algoritme dat werd opgesteld door dr. Wout Dullaert en Dhr. Bert Vernimmen. Beide zijn medewerkers aan de Vakgroep Transport en Ruimtelijke Economie (van de faculteit Toegepaste Economische Wetenschappen) aan de universiteit van Antwerpen. Dit algoritme bepaalt de optimale mix van transportalternatieven door de totale logistieke kost te minimaliseren.

Tijdens het onderzoek wordt de invloed van een wijziging van de transportkost, van de gemiddelde levertermijn en van de variantie van de levertermijn op de keuze tussen de verschillende transportmiddelen en op de totale logistieke kost nagegaan. Via een t-toets wordt onderzocht welke wijzigingen statistisch significante resultaten opleveren. Vervolgens worden deze wijzigingen gecombineerd om eventuele interacties tussen de variabelen te bekijken. Hieronder wordt verstaan dat meerdere variabelen tegelijkertijd een invloed kunnen uitoefenen op de totale logistieke kost en op de transportalternatieven die ingezet worden om het vervoer uit te voeren.

Hoofdstuk 2: Keuze tussen eigen en beroepsvervoer en de keuze van het transportmiddel

2.1 Keuze tussen eigen vervoer en beroepsvervoer

Een onderneming kan bij het transporteren van haar goederen opteren om het vervoer zelf uit te voeren. Ze zal dan haar vervoer zelf produceren of met andere woorden eigen vervoer toepassen. In België kan dit volledig ongereguleerd gebeuren. Iedereen is dus vrij om zijn of haar transport uit te voeren. Echter, wanneer de onderneming het vervoer van haar goederen uitbesteedt aan derden tegen betaling van een vervoersprijs, zullen een aantal regels en wetten van toepassing zijn. Beroepsvervoer of het vervoer voor rekening van derden is immers gereguleerd. Beroepsvervoerders moeten bijgevolg over de nodige vergunningen beschikken voor zover het om voertuigen gaat met een laadvermogen van meer dan 500 kilogram (Witlox, 2004-2005, p. 15).

De keuze tussen eigen en beroepsvervoer komt vooral voor bij het transport over de weg. Gedurende de voorbije decennia is het relatief belang van het eigen vervoer quasi ononderbroken afgenomen (Witlox, 2004-2005, p. 25-26). In de binnenvaart speelt het eigen vervoer, in tegenstelling tot het wegvervoer, slechts een zeer geringe rol (Witlox, 2004-2005, p. 28).

2.2 Keuze van het transportmiddel

De vervoersgebruiker heeft een zeer ruime waaier van transportmogelijkheden ter beschikking. De variëteit in de transportalternatieven vormt bijgevolg een belangrijk kenmerk van vervoer. De vijf belangrijkste vervoerswijzen waaruit een bedrijf kan kiezen om het vervoer van haar goederen uit te voeren, zijn (Witlox, 2004-2005, p. 7):

- Vervoer over de weg
- Vervoer per spoor
- Vervoer over zee en over de binnenwateren
- Vervoer door de lucht
- Vervoer per pijpleiding

Een transportdienst wordt gedefinieerd als een set van prestatiekenmerken die aangekocht worden aan een bepaalde prijs. De variëteit van transportdiensten is bijna eindeloos. De vijf belangrijkste vervoerswijzen kunnen eveneens in combinatie gehanteerd worden. De vervoersgebruiker selecteert een dienst of een combinatie van diensten die het beste evenwicht brengen tussen de aangeboden kwaliteit van de dienst enerzijds en de kost van de dienst anderzijds (Ballou, 1999, p. 137). De keuze voor een transportalternatief wordt gebaseerd op een aantal variabelen. In wat volgt, worden enkele van deze variabelen beschreven.

2.2.1 Indeling op basis van de belangrijkste kenmerken van diensten

Een transportdienst kan gezien worden in termen van karakteristieken die voor alle diensten gelden: de prijs, de gemiddelde levertermijn, de variabiliteit in de levertermijn en verlies en schade (Ballou, 1999, p. 138). De gebruiker van vervoerdiensten dient inzicht te hebben in deze karakteristieken, omdat deze factoren de meest belangrijke lijken te zijn om een keuze te maken tussen een aantal transportalternatieven. De uiteindelijke keuze hangt af van de kostprijs, die de gebruiker zo laag mogelijk wenst te houden, en van de gewenste kwaliteit van het transportmiddel (Witlox, 2004-2005, p. 7). Aangenomen wordt dat de transportdienst beschikbaar is en dat de goederen geleverd kunnen worden met een bepaalde frequentie (Ballou, 1999, p. 138).

2.2.1.1 Prijs

De prijs of de kost van een transportalternatief voor de vervoerder is het tarief om de goederen te transporteren vermeerderd met alle toeslagen voor bijkomende diensten zoals onder andere het ophalen aan de vertrekplaats, de levering op de bestemming, de verzekering, het voorbereiden van de goederen voor verzending. Indien een transportalternatief gehuurd kan worden, bestaat de totale kost van het alternatief uit het tarief om de goederen tussen de twee punten te bewegen en om het even welke additionele toeslagen. Indien de vervoerder in het bezit is van de vervoerswijze, worden de relevante kosten toegewezen aan de verzending in kwestie om de kost van dit transportmiddel te berekenen. Relevante kosten zijn onder andere brandstof, arbeid, onderhoud, afschrijving van het materiaal en administratieve kosten (Ballou, 1999, p. 138).

De kost van een transportalternatief varieert sterk over de verschillende types. Tabel 2 geeft een overzicht van de gemiddelde kost per ton-mijl voor de vijf belangrijkste vervoerswijzen.

Tabel 2: Gemiddelde kost per ton-mijl

Transportwijze	Prijs (\$/ton-mijl)
Spoor	2,50
Weg	25,08
Water	0,73
Pijpleiding	1,40
Lucht	58,75

Bron: Ballou, 1999, p. 139

De getallen in tabel 2 zijn gemiddelden die berekend worden uit de ratio van de vrachtopbrengst die door de vervoerswijzen gegenereerd wordt tot het totaal aantal ton-mijl dat verzonden wordt. Deze getallen kunnen voor een algemene vergelijking gehanteerd worden. Indien ze echter dienen om een keuze tussen transportalternatieven te maken, moet de kostvergelijking gebeuren op basis van andere elementen. Er moet rekening gehouden worden met de actuele toeslagen die het geleverde product weergeven, met de afstand en de

richting van de beweging en ten slotte met om het even welke vereiste speciale behandeling (Ballou, 1999, p. 138).

Een onderneming kan de keuze voor een bepaald transportalternatief baseren op een afweging tussen de transportkosten en de voorraadkosten. Deze kosten worden uitgebreid besproken in hoofdstuk 3.

Wanneer de vervoersgebruiker enkel de transportkosten in beschouwing neemt, opteert hij voor een verzending in grote hoeveelheden en met een trage vervoerswijze bijvoorbeeld vervoer via de binnenvaart of het spoor. Dit leidt immers tot schaalvoordelen want de kost per eenheid neemt af indien de kost per verzending een vaste kost is en indien de verscheepte hoeveelheid per verzending stijgt. Trage transportalternatieven veroorzaken echter een verhoging van de voorraadkosten. Om deze kosten tijdens het vervoer te reduceren, moet de vervoersgebruiker een snelle vervoerswijze selecteren zoals het vervoer over de weg of door de lucht. Deze snellere service leidt tot hogere vrachtprijzen in vergelijking met die van het spoor of de binnenvaart. De cyclische voorraadkosten belemmeren het vergroten van de partijgrootte. Indien de vervoersgebruiker een vervoerswijze met een kleine capaciteit hanteert, vermindert immers de gemiddeld aanwezige cyclische voorraad tussen twee verschepingen. Bijgevolg verminderen de cyclische voorraadkosten. Hoewel snelle transportwijzen meestal kleine hoeveelheden transporteren en het verschil tussen de voorraadkosten tijdens het vervoer enerzijds en de cyclische voorraadkosten anderzijds niet altijd even helder is, gaat het hier toch duidelijk over twee verschillende voorraadkosten (Vernimmen en Witlox, 2001, p. 6; Blauwens et al., 2001a, p. 248).

Wanneer de vervoersgebruiker de voorraadkosten wil minimaliseren, opteert hij voor een snelle vervoerswijze met een lage capaciteit zoals reeds in de vorige paragraaf tot uiting kwam. Bijgevolg kiest hij om de producten te transporteren over de weg of door de lucht. Welk transportalternatief uiteindelijk de laagste totale logistieke kost oplevert, hangt af van tal van factoren en van geval tot geval.

Naast de transportkosten neemt de bevrachter eveneens de betrouwbaarheid, de flexibiliteit en de gemiddelde levertermijn van het transportmiddel in beschouwing als belangrijke factoren die de keuze voor een transportwijze kunnen beïnvloeden. Deze worden in de volgende paragraaf besproken.

2.2.1.2 Levertermijn en variabiliteit

De levertermijn wordt gedefinieerd als de gemiddelde tijd om de verzending uit te voeren. De verschillende vervoerswijzen variëren naargelang ze al dan niet een directe verbinding voorzien tussen het vertrekpunt en het punt van aankomst (Ballou, 1999, p. 138).

Variabiliteit refereert naar de gebruikelijke verschillen die voorkomen tussen verzendingen door verschillende transportwijzen. Alle verzendingen die hetzelfde vertrek- en aankomstpunt hebben en die door dezelfde vervoerswijze getransporteerd worden, bezitten niet noodzakelijk dezelfde levertermijn. Het verschil in levertermijn kan te wijten zijn aan onder andere het weer, aan verkeersopstoppingen (Ballou, 1999, p. 138-139).

De levertermijn en de variabiliteit vormen een belangrijk onderdeel van wat verstaan wordt onder de kwaliteit van vervoer. De levertermijn bepaalt de snelheid van een transportalternatief, terwijl de variabiliteit een maatstaf is voor de betrouwbaarheid van een vervoerswijze. De snelheid (of de traagheid) waarmee goederen vervoerd worden, speelt in de goederenhandel een zeer belangrijke rol. Indien een partij goederen snel en vrij betrouwbaar geleverd moet worden, valt het vervoer door de lucht te overwegen (Witlox, 2004-2005, p. 7).

Eén van de meest uitgebreide studies met betrekking tot de prestaties van vervoerswijzen werd uitgevoerd op meer dan 16000 militaire en industriële verzendingen. Uit deze studie blijkt dat, over lange afstanden, verzendingen over het spoor en door de lucht constante levertermijnen opleveren, terwijl de levertermijnen van het vervoer over de weg toenemen. Gemiddeld genomen vormt het luchtvervoer het snelste transportalternatief voor afstanden van meer dan 965 kilometer, gevolgd door het wegvervoer en het vervoer over het spoor.

Voor afstanden van minder dan 965 kilometer zijn het vervoer door de lucht en deze over de weg vergelijkbaar. Voor zeer korte afstanden van minder dan 80 kilometer wordt de levertermijn meer beïnvloed door het ophalen en het leveren van de goederen dan door het vervoer zelf. In termen van variabiliteit kunnen de transportalternatieven ongeveer op dezelfde manier gerangschikt worden als bij de gemiddelde levertermijn. Het vervoer over het spoor heeft de hoogste variabiliteit in de levertermijn en het vervoer door de lucht bezit de laagste variabiliteit. De variabiliteit bij het vervoer over de weg bevindt zich tussen deze twee extremen (Ballou, 1999, p. 139).

2.2.1.3 Verlies en schade

Een derde punt waarop transportalternatieven van elkaar verschillen, ligt in hun bekwaamheid om hun vracht te vervoeren zonder verlies of schade. Daarom worden deze twee begrippen in beschouwing genomen bij het selecteren van een vervoerswijze. Alhoewel de vervoerswijzen het directe verlies oplopen, zijn er bepaalde toegeschreven kosten die de vervoerder moet erkennen vooraleer de keuze te maken. Het meest serieuze verlies dat de vervoerder kan ondergaan, heeft te maken met de klantenservice. De verzending van goederen doelt eventueel op een aanvulling van de voorraad van de klant of op onmiddellijk gebruik. Uitgestelde verzendingen of goederen die in ongebruikelijke condities arriveren betekenen een ongemak voor de klant. Het is eveneens mogelijk dat de voorraadkosten toenemen als gevolg van een groter aantal tekorten of backorders indien de geanticiperde aanvullingsvoorraden niet worden ontvangen zoals gepland. Hoe minder klachten in het nadeel van een transportalternatief, hoe gunstiger het alternatief wordt voor de gebruiker. Een mogelijke reactie van de vervoerders op een hoge waarschijnlijkheid van schade, is het voorzien van een verpakking met een grotere bescherming. Deze uitgaven moeten uiteindelijk gedragen worden door de gebruiker van het transportalternatief (Ballou, 1999, p. 139-141).

2.2.1.4 Andere belangrijke factoren

Factoren van secundair belang om het transportkeuzeprobleem te vergemakkelijken, zijn de beschikbaarheid, de frequentie, de veiligheid, de grootte of de capaciteit, de toegankelijkheid, het comfort, de variabiliteit, de dichtheid van het transportnetwerk, de wetgeving en de milieubeschouwingen. Sommige van deze elementen kunnen uitgedrukt en gemodelleerd worden in termen van logistieke kosten.

Deze factoren kunnen eveneens een aanduiding geven van de mogelijke inzetbaarheid van de verschillende vervoerswijzen. Ter verduidelijking worden enkele voorbeelden gegeven (Witlox, 2004-2005, p. 7).

De grootte of de laadcapaciteit van het transportalternatief bepaalt onmiddellijk de geschiktheid ervan. Vrachtwagens of vliegtuigen worden niet ingezet om bijvoorbeeld een partij steenkool te vervoeren. Zee- of binnenvaartschepen vormen in dit geval de aangewezen vervoermodi. De toegankelijkheid verwijst naar het al dan niet verbonden zijn van voor- en natransportkosten aan een transportalternatief. Goederen die met een vrachtwagen aan huis worden geleverd, brengen meestal geen extra kosten met zich mee. Een vervoermiddel dat daarentegen bijna altijd voor- en natransport vereist, is bijvoorbeeld het vliegtuig. De variabiliteit in de laadcapaciteit refereert naar de mogelijkheden of de flexibiliteit van de vervoerswijze om in te spelen op veranderingen in vraag en aanbod. Aangezien het niet verantwoord is om een gedeeltelijk volgeladen schip te laten varen, kennen zeeschepen een kleine flexibiliteit. Dit ligt anders bij het transport per spoor. Het aantal wagons kan immers aangepast worden aan het aanbod. Variabiliteit verwijst eveneens naar de mate waarin nog wijzigingen kunnen aangebracht worden aan bijvoorbeeld de vervoerroute en de begin- of eindbestemming (Witlox, 2004-2005, p. 7-8).

2.2.2 Verkeerstechnische indeling

Een verkeerstechnische indeling naar vervoerswijzen kan gemaakt worden op basis van het ingezette vervoermiddel en de hiervoor noodzakelijke infrastructuur. De hoeveelheid, de aard en de waarde van de te vervoeren goederen, de af te leggen afstand, de snelheid en het doordringingsvermogen van het vervoermiddel zullen de keuze van het transportalternatief mee helpen bepalen (tabel 3) (Witlox, 2004-2005, p. 12-13).

Tabel 3: Vervoerssubsystemen in het goederenvervoer

Eigenschappen van de goederen	Afstand		
	Continentaal vervoer		Intercontinentaal vervoer
	Korte afstand	Lange afstand	
Hoogwaardig Bederfbaar Kwetsbaar	Wegvervoer Spoorvervoer	Wegvervoer spoorvervoer	Zeevervoer
Laagwaardig	Wegvervoer Binnenvaart Spoorvervoer	Binnenvaart Wegvervoer Spoorvervoer Zeevervoer	Zeevervoer

Bron: Blauwens et al., 1996, p. 29 volgens Witlox, 2004-2005, p. 13

In het algemeen kan gesteld worden dat op de continentale verbindingen voor het vervoer van hoogwaardige, bederfbare en kwetsbare goederen vooral de voorkeur uitgaat naar het wegvervoer, onafhankelijk van de af te leggen afstand. Bij goederen met een hoge waarde maakt de eigenlijke vervoerskost over het algemeen niet zoveel uit, aangezien deze slechts een zeer kleine fractie uitmaakt van de totale kostprijs. Voor bederfbare goederen spelen andere factoren een rol om specifiek te kiezen voor het wegvervoer. Wanneer het transport te lang duurt, bestaat het gevaar dat de goederen bij levering reeds bedorven zijn en bijgevolg voor de klant waardeloos. Omwille van de geringe kans op beschadigingen tijdens het

transport, worden kwetsbare of breekbare goederen in de meeste gevallen eveneens met het wegvervoer verplaatst (Witlox, 2004-2005, p. 13).

Voor het vervoer van laagwaardige massa- of stortgoederen wordt de voorkeur gegeven aan de binnenvaart of het vervoer per spoor, vooral wanneer het transport over langere afstanden betreft. In tegenstelling tot de goederen met een hoge waarde speelt de kostprijs bij dit soort goederen wel een belangrijke rol. Omwille van de kleinere doordringinggraad van het vervoer via de binnenvaart en het vervoer per spoor, dient er eveneens rekening gehouden te worden met het feit dat voor- en/of natransport over de weg moet gebeuren. Door dit kostenverhogend aspect, blijft het wegvervoer een belangrijke concurrent voor de binnenvaart en het spoorvervoer, zeker als het gaat om het vervoer over korte afstanden (Witlox, 2004-2005, p. 13-14).

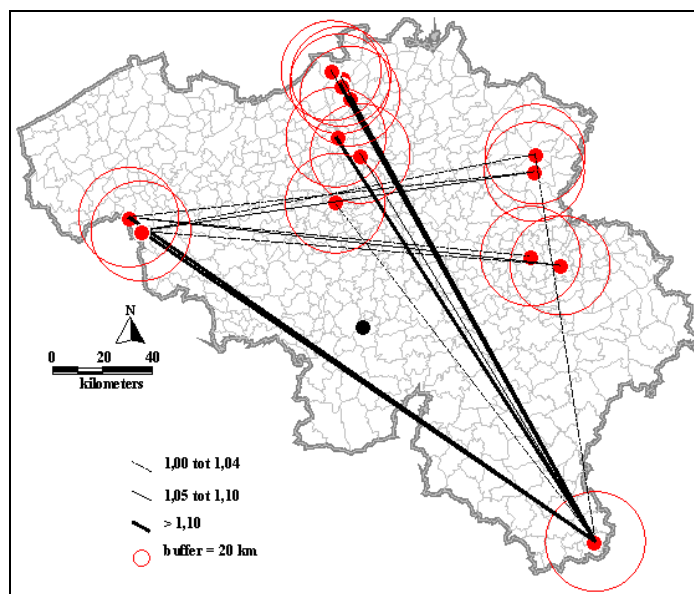
Op de intercontinentale relaties neemt het zeevervoer een dominante positie in. Het vervoer via de lucht speelt slechts een ondergeschikte rol (Witlox, 2004-2005, p. 14).

2.3 Keuze tussen unimodaal en intermodaal vervoer

Een onderneming heeft de keuze tussen verschillende transportalternatieven om het vervoer van haar producten uit te voeren. Ze kan opteren om één enkel transportmiddel te selecteren. Doch kan ze eveneens verschillende transportmiddelen inzetten om de goederen tot op de plaats van bestemming te brengen. Wanneer dit het geval is, vindt intermodaal vervoer plaats. Intermodaal vervoer wordt omschreven als het vervoer van een geünitiseerde vracht of eenheidslading via meer dan één vervoersmodaliteit, waarbij de goederen zelf, tijdens de overslag niet behandeld worden (Macharis et al, 1999). Het intermodaal vervoer combineert de voordelen van alternatieve vervoerswijzen, een lage operationele kost en weinig milieuhinder met de flexibiliteit en de deur-aan-deur diensten van het wegvervoer. De overslag van het ene transportalternatief naar het andere is cruciaal.⁷

⁷ http://www.tmlleuven.be/Logistiek/Artikel_200305.pdf (geraadpleegd op 26 mei 2006)

Bepaalde trajecten van het intermodaal vervoer op Belgisch schaalniveau zijn competitief met het unimodaal wegvervoer. Vanwege de hoge overslagkosten kan intermodaal vervoer alleen op langere afstanden concurreren met het wegtransport.⁸ Toch is het eveneens mogelijk op kortere afstanden intermodaal vervoer te laten plaats vinden. Dit kan door grotere volumes ineens te vervoeren.⁹ Om het intermodaal vervoer te vergelijken met het unimodaal wegvervoer, stelde de Katholieke Universiteit van Leuven een model op. De kostprijs bleek de doorslaggevende factor te zijn voor de keuze tussen beide vervoersmethoden. De resultaten van het onderzoek worden weergegeven op figuur 2.¹⁰



Figuur 2: Prijzen van intermodaal vervoer in vergelijking met unimodaal wegvervoer.

Bron: <http://www.kuleuven.ac.be>.

Op deze figuur staan een aantal lijnen getekend. Hoe dikker de lijn, hoe voordeliger het intermodaal vervoer wordt. Uit de figuur blijkt bijgevolg dat intermodaal vervoer in vele gevallen voordeliger is dan unimodaal wegvervoer.¹¹

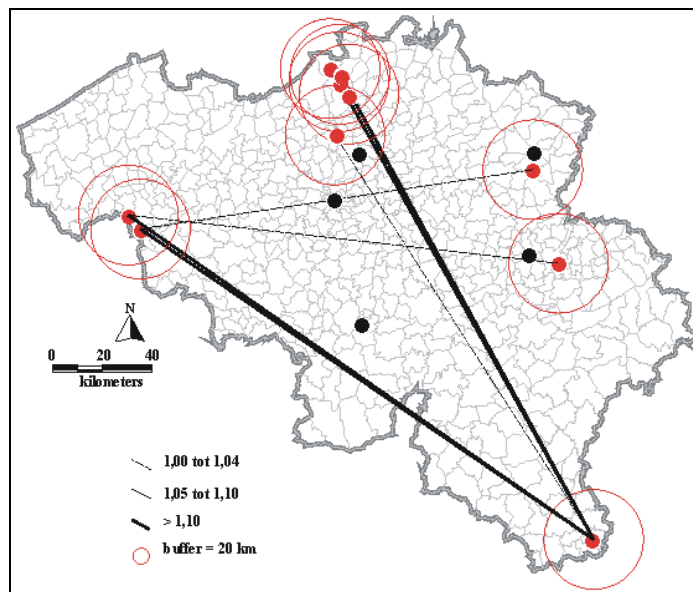
⁸ <http://ienl.wkkbi.nl/downloads/20020131112627-I12.pdf> (geraadpleegd op 26 mei 2006)

⁹ <http://www.kuleuven.ac.be/geografie/schoolverlater/onderzoek/thesis2003/bauwens/index.htm> (geraadpleegd op 16 februari 2006)

¹⁰ <http://www.kuleuven.ac.be/geografie/schoolverlater/onderzoek/thesis2003/bauwens/index.htm> (geraadpleegd op 16 februari 2006)

¹¹ <http://www.kuleuven.ac.be/geografie/schoolverlater/onderzoek/thesis2003/bauwens/index.htm> (geraadpleegd op 16 februari 2006)

Verder werden een aantal scenario's uitgewerkt die weergeven wat gebeurt met de concurrentiepositie van het intermodaal vervoer indien de prijs van het wegvervoer en het spoorvervoer per kilometer en per TEU (Twenty feet Equivalent Unit) respectievelijk stijgt en daalt. In het eerste scenario neemt de prijs van het wegvervoer per TEU toe met 0,025 euro per kilometer. De resultaten van het eerste scenario zijn weergegeven op onderstaande figuur (figuur 3).¹²



Figuur 3: Invloed van een stijging van de prijs van het wegvervoer op intermodaal vervoer.

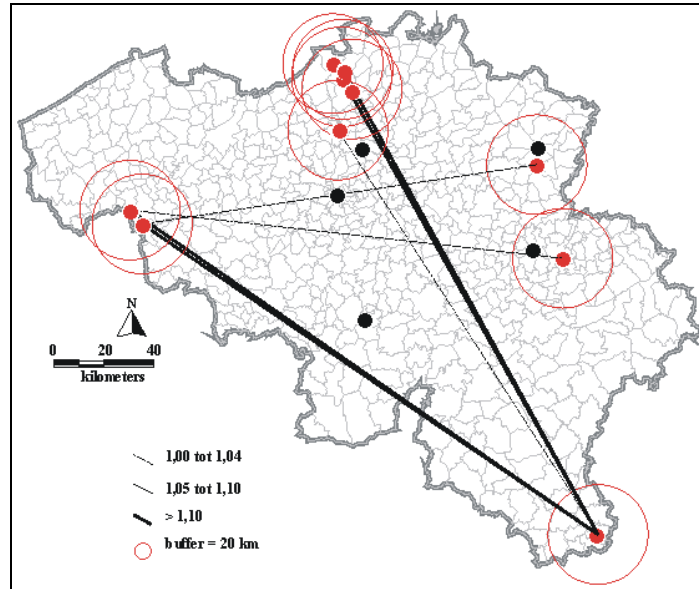
Bron: <http://www.kuleuven.ac.be>.

In vergelijking met figuur 2 toont figuur 3 dat het intermodaal vervoer beduidend minder voordelig wordt indien de prijs van het wegvervoer toeneemt.

Een tweede scenario bekijkt een daling van de prijs van het spoorvervoer per TEU met 0,025 euro per kilometer. De invloed van deze prijsdaling op de voordelen van het intermodaal vervoer ten opzichte van het unimodaal vervoer wordt op figuur 4 weergegeven.¹³

¹² <http://www.kuleuven.ac.be/geografie/schoolverlater/onderzoek/thesis2003/bauwens/index.htm> (geraadpleegd op 16 februari 2006)

¹³ <http://www.kuleuven.ac.be/geografie/schoolverlater/onderzoek/thesis2003/bauwens/index.htm> (geraadpleegd op 16 februari 2006)



Figuur 4: Invloed van een daling van de prijs van het spoorvervoer op intermodaal vervoer.

Bron: <http://www.kuleuven.ac.be>.

Een daling van de prijs van het spoorvervoer genereert gelijkaardige resultaten als een prijsstijging van het wegvervoer. Intermodaal vervoer wordt minder voordelig ten opzichte van het unimodaal wegvervoer.

Om het intermodaal vervoer te promoten is het belangrijk de knelpunten van deze vervoersmethode weg te werken. Een betere prijs-kwaliteitverhouding kan op verschillende manieren bereikt worden: onder andere een kortere transporttijd, een hogere transportfrequentie, een toename van de betrouwbaarheid, meer flexibiliteit, betere werkingstijden.¹⁴

¹⁴ <http://www.kuleuven.ac.be/geografie/schoolverlater/onderzoek/thesis2003/bauwens/index.htm> (geraadpleegd op 16 februari 2006)

Hoofdstuk 3: De totale logistieke kost

3.1 Inleiding

Een onderneming die gebruik maakt van transport, heeft de keuze tussen eigen vervoer en beroepsvervoer. Een andere belangrijke en meer complexe beslissing die de onderneming moet nemen, houdt de keuze tussen het wegvervoer, het luchtvervoer, het zeevervoer, het vervoer via het spoor, via de binnenvaart of een combinatie van deze transportwijzen in. Een combinatie van vervoerswijzen wordt eveneens intermodaal vervoer genoemd.

Wat is nu echter de optimale transportwijze voor de vervoersgebruiker? Met welke criteria houdt hij rekening om deze beslissingen te nemen? Op deze vragen kan geen eenduidig antwoord geformuleerd worden. Het thema van de keuze van een transportalternatief wordt uitgebreid behandeld in de literatuur. In McGinnis (1989) wordt een interessant overzicht van verschillende modellen gegeven die de keuze voor een transportalternatief vergemakkelijken. Deze auteur onderscheidt vier categorieën: het klassieke economische model, het 'inventory-theoretic' model, het trade-off model en ten slotte het optimalisatiemodel met beperkingen.

Het klassieke economische model evalueert de vaste en variabele kosten van concurrerende vervoerswijzen. Onder een theoretische afstand wordt het transport gedomineerd door een bepaald alternatief en boven deze afstand door een ander transportmiddel.

Het 'inventory-theoretic' model maakt gebruik van de voorraad bij de keuze tussen bepaalde transportalternatieven. Om deze keuze te optimaliseren, wordt er een afruil gemaakt tussen transportkosten, snelheid, betrouwbaarheid en mogelijk verlies tijdens het transport. De opbrengst wordt niet beïnvloed door de keuze voor een bepaalde vervoerswijze en de selectie van een transportalternatief wordt gemaakt door de kosten te minimaliseren.

In het 'trade-off' model zorgt de keuze tussen twee vervoerswijzen ervoor dat de som van twee kostcategorieën, transportkosten (TC) en niet aan transport gerelateerde kosten (NTC)

geminimaliseerd worden. De bevrachter zal indifferent zijn bij de keuze tussen twee alternatieven wanneer de som van de transportkosten en de niet aan transport gerelateerde kosten dezelfde zijn voor de twee vervoerswijzen.

$$TC_1 + NTC_1 = TC_2 + NTC_2 \quad (1)$$

Met TC = Transportkosten
 NTC = Niet aan transport gerelateerde kosten

Wanneer voorgaande formule geldt, maakt het voor de vervoerder niet uit welk transportalternatief hij zal gebruiken.

Het optimalisatiemodel met beperkingen formuleert de keuze tussen transportalternatieven als een optimalisatieproces. In dit proces worden de transportkosten geoptimaliseerd ten opzichte van een aantal beperkingen met betrekking tot de niet aan transport gerelateerde kosten.

De belangrijkste en meest gehanteerde methode is de ‘inventory-theoretic’ benadering. Dit model wordt gebruikt om de keuze voor een bepaald transportalternatief te analyseren op basis van het concept ‘totale logistieke kosten’. Deze aanpak wordt verder besproken waarbij beide termen door elkaar worden gebruikt.

3.2 De totale logistieke kosten

3.2.1 Situering in de literatuur

Op basis van het totale logistieke kostenconcept wordt de transportbeslissing van de vervoersgebruiker geanalyseerd vanuit een logistiek standpunt. Het nemen van een logistieke beslissing beïnvloedt verschillende logistieke kosten die samen de totale logistieke kostprijs bepalen. Concreet betekent dit dat, wanneer een bedrijf verschillende vervoerswijzen tegen

elkaar wil afwegen, het rekening moet houden met alle kosten binnen de logistieke keten waarop transportbeslissingen een invloed uitoefenen (Blauwens et al., 2002a, p. 59). Eerder dan te proberen om slechts één kostenelement binnen de logistieke keten, bijvoorbeeld transportkosten, te minimaliseren, wordt de invloed van een transportbeslissing op de totale logistieke keten beschouwd en dienen de totale logistieke kosten geminimaliseerd te worden (Blauwens et al., 2002a, p. 62). De bespreking in dit hoofdstuk omvat enkel de transportbeslissing, de keuze voor een bepaald transportalternatief. Beslissingen op andere gebieden uit de logistiek zoals onder andere productieplanning, voorraadbeheer komen niet aan bod.

Baumol en Vinod (1970) hebben de ‘inventory-theoretic’ benadering voor het eerst geïntroduceerd. Deze auteurs argumenteren dat het keuzeproces van een transportmiddel een afruil impliceert tussen transportkosten (‘freight rates’), snelheid (‘average delivery time’) en betrouwbaarheid (‘dependability’). De auteurs besteden expliciet aandacht aan de impact van snelheid en stiptheid van een vervoersmodus op de voorraadkosten (Vernimmen, 2004, p. 5).

Volgens Blauwens en Witlox (2002, p. 59) kunnen de verschillende transportmogelijkheden tussen een bepaald vertrek- en aankomstpunt bekeken worden zowel vanuit het standpunt van de verlader als vanuit het standpunt van de ontvanger op basis van de totale logistieke kosten. De transportkosten en de voorraadkosten vormen het grootste gedeelte van de totale kosten. In de meeste gevallen, vooral in het geval van vervoer van bulkgoederen in grote partijen, bestaat er een afruil tussen deze twee logistieke kosten. De binnenvaart bijvoorbeeld heeft lagere transportkosten dan het wegvervoer. De voorraadkosten van de binnenvaart liggen echter hoger (Blauwens et al., 2002a, p. 60).

3.2.2 Verschillende definities

In de literatuur zijn verschillende definities terug te vinden van het concept “totale logistieke kost” terug te vinden. Volgens Blauwens et al. (2002b volgens Vernimmen et al., 2005, p. 3) bestaan de totale logistieke kosten uit vier elementen: de transportkosten, de kosten van

seizoensvoorraad, de kosten van voorraad tijdens het vervoer en de kosten van veiligheidsvoorraad. In formulevorm geeft dit:

$$TLC = TC + \left(\frac{1}{R} \times \frac{Q}{2} \times v \times h \right) + \left(L \times v \times \frac{h}{365} \right) + \left(\frac{1}{R} \times v \times h \times K \times \sqrt{(L \times d) + (D^2 \times l)} \right) \quad (2)$$

Met	TLC	= Totale logistieke kosten
	TC	= Transportkosten (in euro)
	R	= Jaarlijkse volume (in ton)
	Q	= Laadcapaciteit (in ton)
	v	= Waarde van de goederen (in euro per ton)
	h	= Opslagkosten (in % per jaar)
	L	= Gemiddelde levertijd (in dagen)
	K	= Veiligheidsfactor
	d	= Variantie van dagelijkse vraag (in ton ²)
	D	= Gemiddelde dagelijkse vraag (in ton)
	l	= Variantie van de levertijd (in dagen ²)

De eerste term in de formule van Blauwens et al. (2002b) stelt de transportkosten voor. De tweede term komt overeen met de kosten van cyclische voorraad. De voorraadkosten tijdens het vervoer worden voorgesteld door de derde term. De laatste term verwijst naar de kosten van veiligheidsvoorraad.

Dullaert et al. (2005b) voegen hier de bestelkosten aan toe.

Volgens Baumol en Vinod (1970, p. 419) ziet het TLC-model er als volgt uit:

$$TLC = rT + utT + \frac{a}{s} + \frac{wsT}{2} + wK\sqrt{(s+t)T} \quad (3)$$

Met	TLC	= De totale logistieke kosten van een transportalternatief (op jaarbasis)
r		= De transportkost per eenheid (inclusief de vrachtprijs, de verzekering, laden en lossen, enzovoort)
T		= Het totaal aantal getransporteerde eenheden per jaar
u		= De kost van voorraad tijdens het vervoer per eenheid per jaar
t		= De gemiddelde leveringstijd (in jaren)
a		= De kost van orderbehandeling en administratie per verzending
s		= De gemiddelde tijd tussen twee verzendingen (in jaren)
w		= De kost van cyclische voorraad per eenheid per jaar
K		= Een constante, afhankelijk van de vooraf bepaalde kans op een voorraadtekort tijdens de levertermijn

De eerste term in deze formule refereert naar de jaarlijkse transportkosten die de vervoerder heeft opgelopen. De tweede term stelt de jaarlijkse kosten voor voorraad tijdens het vervoer voor. De volgende term geven de jaarlijkse kosten van orderbehandeling en administratie weer. De vierde term refereert naar de jaarlijkse kosten van cyclische voorraad en de laatste term komt overeen met de jaarlijkse kosten voor het aanhouden van een veiligheidsvoorraad.

Blauwens et al. (2001a) geven de meest uitgebreide definitie van de totale logistieke kost weer. De totale logistieke kost is volgens hen opgebouwd uit de transportkosten, de kosten van goederenbehandeling, de voorraadkosten (inclusief magazijnkosten), de kosten van voorraadtekort, de verpakkingskosten, de orderbehandelingskosten, de administratiekosten, de instelkosten, de kosten van klantenservice en ten slotte de kosten van vestigingsplaats. Een goede benadering van logistiek vereist dat al deze kosten in hun geheel behandeld worden.

Het is bijgevolg belangrijk na te gaan wat de globale impact van de transportbeslissing is op de totale logistieke kosten (Blauwens et al., 2001a, p. 240).

In de volgende paragrafen worden de kosten die Blauwens et al. (2001a) vooropstellen verder besproken.

3.2.3 Kostenelementen

3.2.3.1 Transportkosten

Baumol en Vinod (1970) veronderstellen dat de transportkost een constante kost r is per eenheid van lading. De transportkosten variëren bijgevolg niet met het volume per verzending of met de afstand. Deze assumptie is niet realistisch aangezien de transportkosten per eenheid, als gevolg van schaalvoordelen, afnemen wanneer het laadvermogen toeneemt. Om dit probleem op te lossen beschrijft Langley (1980 volgens Vernimmen en Witlox, 2003, p. 36) een aantal alternatieve relaties tussen de verscheepte hoeveelheid en de transportkost per eenheid lading. De transportkost per eenheid kan proportioneel of exponentieel dalen met de bestelhoeveelheid. Het is eveneens mogelijk dat de transportkost en de bestelhoeveelheid invers gerelateerd zijn. Ten slotte kan een discrete relatie bestaan tussen deze twee elementen. De transportkost per eenheid van lading blijft constant over bepaalde intervallen van de bestelhoeveelheid en begint af te nemen wanneer een bepaalde minimumhoeveelheid bereikt wordt.

Indien een bedrijf een beroepsvervoerder inhuurt om het transport uit te voeren, worden de transportkosten heel eenvoudig berekend. Ze bestaan uit de vervoerprijs die de onderneming aan de beroepsvervoerder betaalt. Indien een onderneming echter haar eigen vervoer produceert, is de berekening van de transportkosten gecompliceerder. De transportkosten zullen in geval van eigen vervoer bestaan uit tijd- en kilometerkosten en kunnen zowel een vaste als een variabele component hebben (Vernimmen, 2004, p. 8).

Wanneer het laadvermogen of de partijgrootte van een voertuig toeneemt, nemen de transportkosten eveneens toe. Deze toename blijkt echter niet proportioneel te zijn omwille van schaalvoordelen. Een verdubbeling van de capaciteit heeft een toename van de kosten tot gevolg. Het gaat echter niet om een verdubbeling. Door schaalvoordelen nemen de kostprijs per ton, per stuk of per container minder snel toe. Dit verschijnsel wordt waargenomen in het wegvervoer, in de binnenvaart en in het zee- en luchtvervoer (Blauwens et al., 2001a, p. 136).

Schaalvoordelen zijn echter niet altijd van toepassing. Sommige vervoerswijzen zoals het spoorvervoer en de binnenvaart vereisen voor- en/of natransport over de weg en de overslag van goederen aan de terminals. Door deze bijkomende diensten, nemen de transportkosten aanzienlijk toe. De vraag dient gesteld te worden of de kosten van voor- en/of na transport en deze van goederenbehandeling opwegen tegen de schaalvoordelen.

3.2.3.2 Kosten van goederenbehandeling

De kosten van goederenbehandeling ontstaan wanneer goederen worden geladen, gelost of overgeslagen. Er kunnen grote verschillen tussen de verschillende transportwijzen ontstaan. De overslag van een container op een vrachtwagen bijvoorbeeld kost beduidend minder dan de overslag van een container op een binnenschip. In sommige gevallen zijn deze kosten verwaarloosbaar. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer de overslag op een bepaald binnenschip wordt aangerekend als een constante prijs per ton binnen bepaalde laadvermogens. Indien deze grens overschreden wordt, geldt een nieuwe prijs voor een volgend interval (Blauwens et al., 2001a, p. 242).

In sommige gevallen worden de kosten van goederenbehandeling als transportkosten beschouwd. Bij gecombineerd vervoer houden de transportkosten naast de kosten van het hoofdtransport eveneens de kosten van het voor- en natransport en de kosten van goederenbehandeling in.

3.2.3.3 Voorraadkosten

Het transporteren van goederen brengt onvermijdelijk voorraad met zich mee. Goederen kunnen opgeslagen worden aan land of tijdens het vervoer. Beide voorraadsoorten veroorzaken kosten voor de gebruiker van het vervoer. Goederen kunnen eveneens om andere redenen gestockeerd worden. Een onderneming kan bijvoorbeeld een veiligheidsvoorraad of een seizoensvoorraad aanhouden. De voorraadkosten kunnen op twee manieren beïnvloed worden door de vervoertijd. Ten *eerste* wordt de voorraadtijd tijdens het vervoer zelf korter indien de vervoertijd wordt verkort. Tijdens het vervoer zijn de goederen onbeschikbaar en gedurende deze tijd ondervinden ze voorraadkosten. Ten *tweede* is de veiligheidsvoorraad van belang. Een veiligheidsvoorraad is een voorraad waarvan verwacht wordt dat deze nog aanwezig is bij aankomst van nieuwe voorraad. Een veiligheidsvoorraad wordt meestal aangehouden om een reserve te hebben om onvoorziene schommelingen in de vraag tijdens de levertermijn op te kunnen vangen. Een kortere levertijd betekent bijgevolg dat de veiligheidsvoorraad verlaagd kan worden, wat een reductie van de kosten met zich meebrengt.

De keuze van een vervoerswijze hangt bijgevolg af van de voorraadkosten tijdens het vervoer en de kosten van veiligheidsvoorraad. De cyclische voorraadkosten spelen echter eveneens een rol (Blauwens et al., 2002a, p. 62). Vooraleer deze invloeden te bespreken (zie 3.2.3.3 b), worden eerst de samenstellende delen van een voorraadkost behandeld.

a) Samenstellende delen van de voorraadkost

De kostprijs om goederen te stockeren, bestaat uit intrestkosten, verzekeringskosten of verzekeringsrisico, ontwaardingkosten en magazijnkosten. Deze vier kostencomponenten vormen samen de voorraadkost of 'holding cost' (Blauwens et al., 2001a, p. 242).

1) Intrestkosten

In de goederen die in voorraad gehouden worden, ligt geld vast dat niet kan gebruikt worden voor investeringen of beleggingen. De intrest die hierdoor gederfd wordt, vertegenwoordigt de intrestkosten (Blauwens et al., 2002a, p. 63). Intrestkosten worden berekend door intrest toe te passen op de waarde die in een eenheid van het goed geïnvesteerd is. Een correcte berekening van de intrest vereist dat de intrestvoet verrekend wordt met de verwachte prijsstijging van de goederen. De verwachte prijsstijging van de goederen wordt het best ingeschat door deze gelijk te stellen aan het algemene inflatiepercentage. Bijgevolg is het wenselijk om als intrestvoet het reële intrestpercentage te nemen. De reële intrestkost wordt gedefinieerd als de nominale intrest vermeerderd met inflatie.¹⁵ In het algemeen geldt in de meeste westerse landen een percentage van 4 à 5 procent (Blauwens et al., 2001a, p. 243). Een intrestpercentage van 4,5% lijkt bijgevolg geschikt om mee te werken.

Een belangrijk probleem hierbij is dat het inflatiepercentage per bedrijfstak kan verschillen. Daardoor kan eveneens het reële intrestpercentage verschillend zijn. Als oplossing kan het inflatiepercentage per bedrijfstak worden meegenomen in de berekening van de reële intrestkost.¹⁶

De intrestkosten gelden zowel voor de voorraad tijdens het vervoer als voor de cyclische voorraad en veiligheidsvoorraad. Of de goederen aanwezig zijn in het transport of op de plaats van bestemming, maakt voor de berekening van de intrest immers niet uit (Blauwens et al., 2002a, p. 63).

2) Verzekeringskosten of verzekeringsrisico

Goederen in voorraad worden in vele gevallen verzekerd tegen brand of diefstal. Wanneer de premie die voor deze verzekering betaald moet worden afhankelijk is van de in voorraad

¹⁵ <http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=2261> (geraadpleegd op 07 april 2006)

¹⁶ <http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=2261> (geraadpleegd op 07 april 2006)

zijnde goederen, dan is de premie een element in de kostprijs van de vervoertijd.¹⁷ Om de verzekeringskost per opgeslagen goed te bekomen, dient de jaarlijkse premiekost gedeeld te worden door het gemiddelde aantal opgeslagen goederen. Een ander soort verzekering is de transportverzekering. Hierbij worden de goederen beschermd tegen de risico's die de goederen lopen tijdens het transport. Vaak is het echter zo dat de genoemde transportverzekering niet afhangt van de vervoertijd. Indien dit het geval is, moet de transportverzekering niet worden meegenomen in de kostprijs van vervoertijd. Tegenover een verzekering staat risico.¹⁸ Indien een bedrijf besluit zich niet te verzekeren tegen bepaalde risico's, dan moet rekening gehouden worden met het risico dat de ondernemer zelf loopt tijdens de vervoertijd (Blauwens et al., 2001a, p. 243). Dit risico is echter zeer moeilijk te operationaliseren, waardoor de praktische toepasbaarheid in het geding komt.

3) Ontwaardingkosten

Ontwaarding van goederen kan ontstaan door bederf of door het minder waard worden van goederen. In het eerste geval is er sprake van fysieke aftakeling. In het tweede geval is er sprake van economische ontwaarding. De economische ontwaarding is een veel belangrijker element in de voorraadkosten dan de fysieke ontwaarding.¹⁹

Economische ontwaardingkosten kunnen zeer sterk verschillen afhankelijk van het soort goederen. Vaak worden deze kosten berekend op basis van de gemiddelde levensduur. Wanneer een product bijvoorbeeld een levensduur van vijf jaar heeft, bedragen de economische ontwaardingkosten één vijfde van de waarde van het product indien dit product één jaar op voorraad ligt.²⁰ Goederen zoals computeronderdelen en modekleding hebben een zeer korte levenscyclus. Deze goederen verliezen na enkele maanden of jaren hun volledige waarde. Ze worden incurant of onverkoopbaar. Deze goederen ondervinden bijgevolg hoge ontwaardingkosten (Blauwens et al., 2002a, p. 63-64). Goederen met een zeer lange

¹⁷ <http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=2261> (geraadpleegd op 07 april 2006)

¹⁸ <http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=2261> (geraadpleegd op 07 april 2006)

¹⁹ <http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=2261> (geraadpleegd op 07 april 2006)

²⁰ <http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=2261> (geraadpleegd op 07 april 2006)

levenscyclus daarentegen kennen weinig of geen ontwaardingkost. Een goed dat praktisch geen ontwaardingkost kent, is bijvoorbeeld zand of ijzererts.

Voor zowel de voorraad in het magazijn als voor de voorraad tijdens het vervoer bestaan er ontwaardingkosten. Deze kosten zullen echter nagenoeg hetzelfde zijn. Dat wil zeggen dat er geen verschil is in economische ontwaardingkosten tussen de goederen die op voorraad liggen en in transport zijn.²¹ Vaak is de schatting van deze ontwaardingkosten geen gemakkelijke opdracht (Blauwens et al., 2001a, p. 244).

4) Magazijnkosten of huur van een container

Wanneer goederen worden opgeslagen in een publiek magazijn, huurt de vervoersgebruiker een deel van de ruimte. Deze kosten zijn bijgevolg makkelijk te berekenen. De vervoersgebruiker moet voor de huur een tarief betalen dat de magazijnuitbater vraagt voor een eenheid goederen (per m³ of per ton). Deze prijs bepaalt de magazijnkosten per ton, stuk, container, enzovoort.

Indien de vervoersgebruiker over een eigen (privaat) magazijn beschikt, dient hij de jaarlijkse kostprijs te berekenen. Deze kostprijs houdt onder andere huur, intrestkosten, verlichting, verwarming, onderhoud in. De vervoersgebruiker deelt vervolgens deze kostprijs door de gemiddeld aanwezige voorraad opdat de magazijnkost per eenheid van het goed bekomen wordt.

Voor de voorraad tijdens het vervoer kan dezelfde methode worden toegepast, doch voor een container. De huur van een container moet gedeeld worden door het aantal goederen dat tijdens het transport opgeslagen ligt in die container. Deze berekeningsmethode heeft bij een privaat magazijn duidelijkheid als voordeel, doch praktische toepasbaarheid als nadeel. Bij een privaat magazijn is het ondoenlijk om alle kosten en de in voorraad aanwezig zijnde goederen te berekenen. Bij een publiek magazijn geldt dit nadeel niet en is de

²¹ <http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=2261> (geraadpleegd op 07 april 2006)

berekeningsmethode nauwkeurig. Voor de voorraad tijdens het vervoer worden bijgevolg niet de magazijnkosten opgenomen in de voorraadkost, maar wel de huurprijs van een container. Deze prijs wordt beschouwd als magazijnkost (Blauwens et al., 2001a, p. 244).

b) Soorten voorraden

Afhankelijk van de bestaansredenen, noteren Lambrecht en Stock (1993, p. 403-407) zes verschillende voorraadtypes:

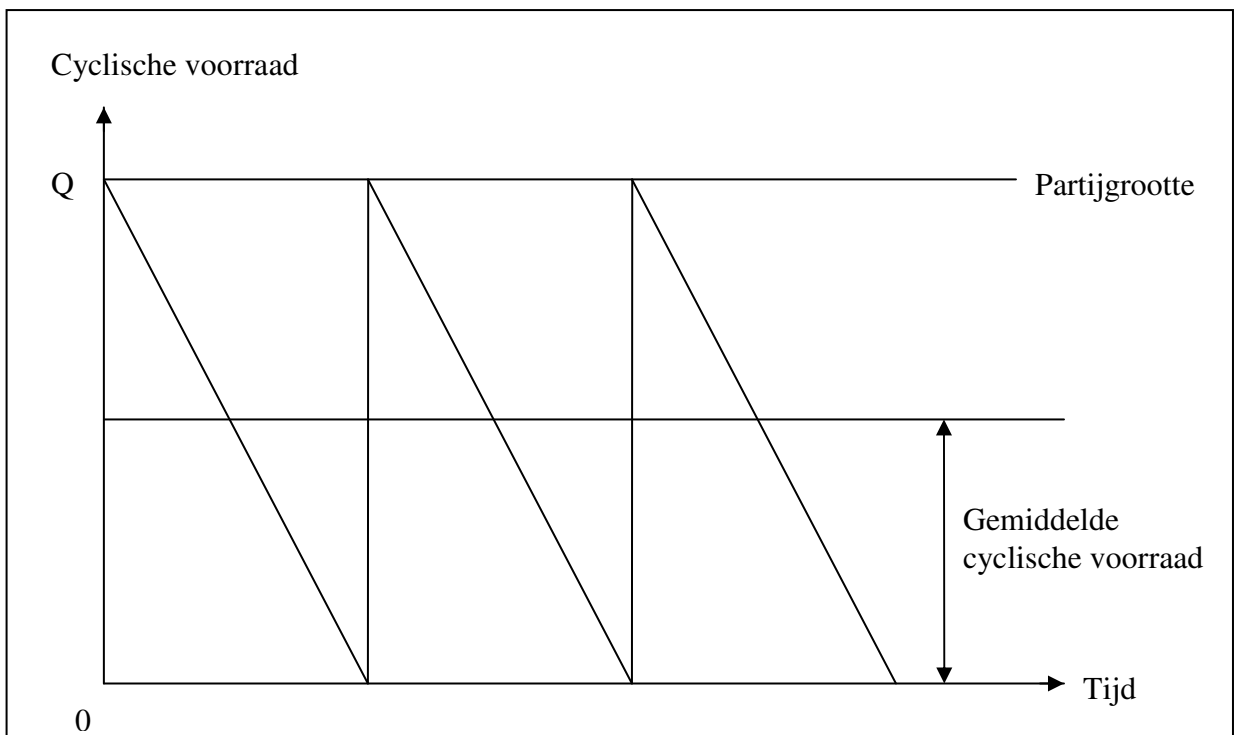
- Cyclische voorraad
- Voorraad tijdens het vervoer
- Veiligheidsvoorraad
- Speculatieve voorraad
- Seizoensvoorraad
- Dode voorraad

Aangezien de keuze van een vervoerswijze een weerslag heeft op de cyclische voorraadkosten, de voorraadkosten tijdens het vervoer en de kosten van veiligheidsvoorraad (Blauwens et al., 2002a, p. 62), worden enkel deze drie types besproken.

1) Cyclische voorraad

Wanneer goederen getransporteerd worden, worden ze bij aankomst op de plaats van bestemming in voorraad opgeslagen. Hoeveel goederen per keer worden aangevoerd hangt af van het verbruik tussen dit tijdstip en de volgende bevoorrading of met andere woorden de vraag tijdens de levertermijn. Een onderneming zal ervoor zorgen dat de aangevoerde goederen gedurende een bepaalde tijd haar behoeften dekt. Deze goederen zullen bijgevolg een tijd in voorraad liggen. Het verloop van deze voorraad gebeurt cyclisch. Bij aankomst van de partij goederen bedraagt de cyclische voorraad de totale bestelhoeveelheid. Vervolgens

wordt het voorraadpeil afgebouwd volgens een bepaald verbruiksritme. Tegen het einde van de bestelcyclus, op het moment dat de volgende voorraadaanvulling plaats vindt, is de cyclische voorraad gelijk aan nul. Indien een constant verbruiksritme wordt verondersteld, geeft de volgende figuur (figuur 5) het verloop van de voorraad weer. Hieruit blijkt dat, gemiddeld genomen, de helft van de aangevoerde hoeveelheid in voorraad ligt. De gemiddelde cyclische voorraad bedraagt de helft van de verzendingshoeveelheid. $s.T$ eenheden worden per keer geleverd waarbij s staat voor de gemiddelde tijd tussen twee verzendingen in jaren en T staat voor het totaal aantal getransporteerde eenheden per jaar. Deze hoeveelheid wordt geleidelijk aan opgebruikt tot de volgende zending arriveert. De gemiddelde cyclische voorraad $\frac{s.T}{2}$ vermenigvuldigen met de kost per eenheid per jaar w resulteert in de jaarlijkse cyclische voorraadkosten op de bestemming.



Figuur 5: Cyclische voorraad bij bestelhoeveelheid Q. Bron: Blauwens et al. (2001a).

Op de plaats van productie of met andere woorden de herkomst van afvoer of op plaatsen van tussenopslag bij overlading van de goederen kunnen eveneens cyclische voorraden ontstaan.

Wanneer dit het geval is, verloopt de grafische voorstelling in figuur 5 net omgekeerd op voorwaarde dat het verbruiksritme constant wordt verondersteld. Op deze plaatsen is de voorraad eerst nul en wordt deze vervolgens langzaam opgebouwd door de productie. Op het ogenblik dat de hoeveelheid wordt afgevoerd, neemt de cyclische voorraad af tot deze opnieuw het niveau nul bereikt. Bij de vorming van dit soort voorraad, ligt, gemiddeld genomen, eveneens de halve partijgrootte in cyclische voorraad. De kost van deze voorraad zal gelijk zijn aan $\frac{w.s.T}{2}$ waarbij w staat voor de kost van de cyclische voorraad per eenheid per jaar.

Indien zowel op de plaats van bestemming als op de plaats van productie cyclische voorraad aanwezig is, bedraagt de totale cyclische voorraadkost wsT . Indien er meerdere bestemmingen zijn, zal de frequentie van de uitgaande verzendingen veel hoger zijn dan de frequentie van inkomende zendingen op elke bestemmingsplaats. Wanneer dit het geval is, is de cyclische voorraad op de plaats van vertrek verwaarloosbaar (Sheffi et al., 1988, p. 144-145).

De kosten van de cyclische voorraad moedigt het gebruik van transportalternatieven aan met een kleine capaciteit. Het gebruik van vervoersmiddelen met een kleinere capaciteit, verlaagt de gemiddelde tijd tussen twee verzendingen s . Deze daling reduceert op zijn beurt de kosten van cyclische voorraad.

De grootte van de cyclische voorraad wordt berekend uitgaande van een constant verbruiksritme. De gemiddeld aanwezige voorraad bedraagt bijgevolg de helft van de partijgrootte van de transportwijze. Indien er toevallige schommelingen optreden in het verbruiksritme blijft deze veronderstelling geldig. De veronderstelling is niet langer valabel zodra deze schommelingen een systematisch verband vertonen. De cyclische voorraad is bijvoorbeeld gelijk aan nul wanneer de lading na aankomst onmiddellijk wordt geconsumeerd.

2) Voorraad tijdens het vervoer

Tijdens het vervoer zelf zijn de goederen in principe eveneens “in stock” ondanks het feit dat ze niet in het magazijn zijn opgeslagen. De goederen blijven gedurende de volledige transporttijd onbeschikbaar en veroorzaken gedurende deze tijd voorraadkosten (Blauwens et al., 2002a, p. 66). Vracht in stock kan gezien worden als bijvoorbeeld voorraad op wielen.

Het is duidelijk dat voorraadkosten tijdens het vervoer aansporen tot het gebruik van snelle vervoerswijzen om de kosten te drukken, daar waar cyclische voorraadkosten aanzetten tot het vervoer in kleine partijen. Omdat de snelste vervoerswijzen vaak goederen vervoeren in kleine partijen, zoals bijvoorbeeld het luchtvervoer, wordt het onderscheid soms uit het oog verloren. In wezen betreft het echter elementen van totaal andere aard (Blauwens et al., 2001a volgens Blauwens et al., 2002a, p. 66).

De kost van voorraad tijdens vervoer per verzending wordt weergegeven door de kost van voorraad tijdens vervoer per eenheid per jaar u te vermenigvuldigen met de gemiddelde tijd t om een verzending te volbrengen. Door dit getal opnieuw te vermenigvuldigen met het aantal verzendingen per jaar wordt de kost van voorraad tijdens vervoer op jaarbasis berekend.

3) Veiligheidsvoorraad

Een derde soort voorraadkosten die moeten beschouwd worden in de logistieke analyse, zijn de kosten van de veiligheidsvoorraad die bij de bestemming wordt aangehouden.

3.1) Definities

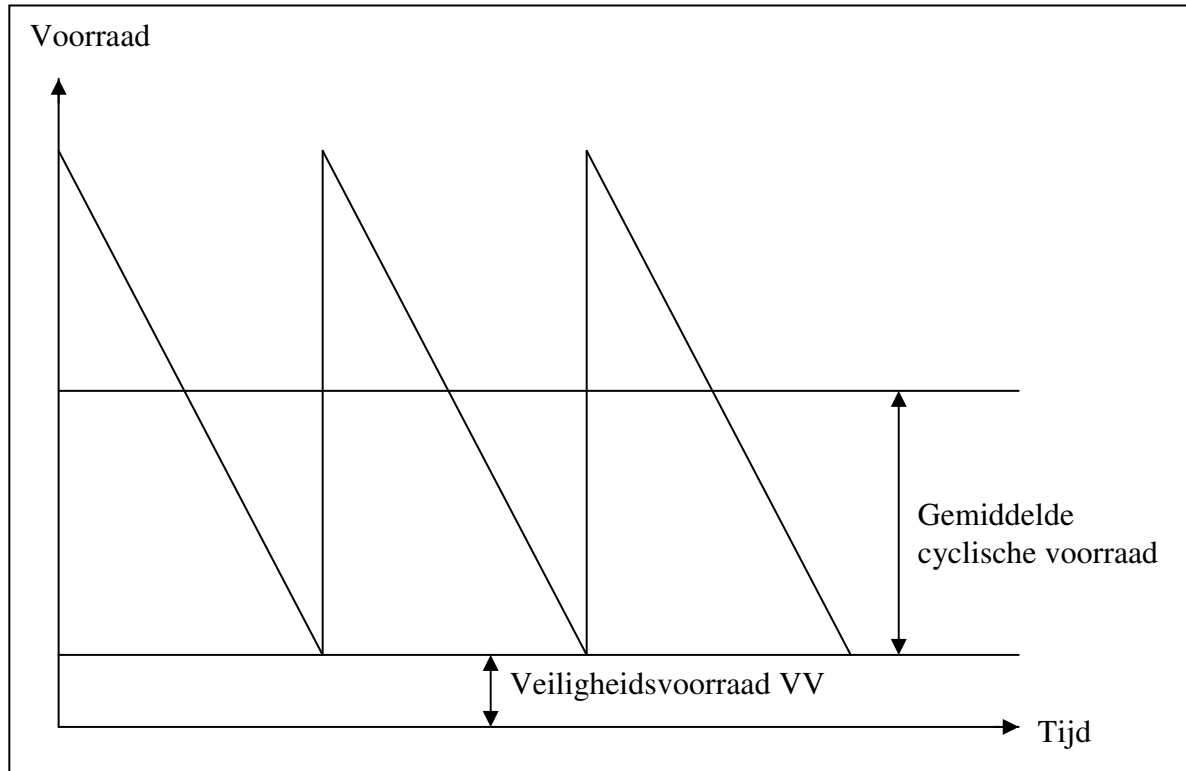
Onder veiligheidsvoorraad, eveneens buffervoorraad genoemd, wordt de hoeveelheid goederen verstaan die gemiddeld genomen nog in voorraad ligt bij aankomst van een voorraadaanvulling (Blauwens et al., 2002a, p. 67).

“Het is de voorraad die bovenop de cyclische voorraad wordt aangehouden omdat het bedrijf onzeker is over de vraag vanwege de klanten of over de leveringstijd die zal verstrijken vooraleer een bestelling toekomt” (Blauwens et al., 2001a, p. 248). Veiligheidsvoorraad biedt aldus een bescherming tegen fouten in voorraadvoorspellingen.

Bedrijven leggen een veiligheidsvoorraad aan indien er onzekerheid bestaat over de vraag vanwege de klanten of over de tijd die zal verstrijken eer een bestelling arriveert. Omwille van de schommelingen die hierin kunnen optreden, wenst een bedrijf voorraadaanvullingen niet zo te plannen, dat zij zouden arriveren precies op het moment waarop de verwachte voorraad nul wordt. Het bedrijf wil een reserve aanhouden.

3.2) Voorstelling van de cyclische voorraad en de veiligheidsvoorraad

Onderstaande figuur (figuur 6) geeft de cyclische voorraad en de veiligheidsvoorraad weer indien een vast verbruiksritme wordt verondersteld zodat het voorraadverloop lineair gebeurt. Levering vindt niet plaats wanneer de voorraad volledig uitgeput is. Er wordt echter wel geleverd indien een vooraf bepaald niveau wordt bereikt. Dit vooraf bepaald niveau van voorraad wordt gedefinieerd als de veiligheidsvoorraad. De voorstelling in figuur 6 vormt slechts een gemiddelde. In de realiteit bestaan er verschillende toevalligheden en schommelingen waardoor de afbouw van de voorraad schommelt. Gemiddeld genomen neemt de veiligheidsvoorraad de grootte VV aan.



Figuur 6: Cyclische voorraad en veiligheidsvoorraad. Bron: Blauwens et al. (2001a).

3.3) Invloeden op de veiligheidsvoorraad

Bij de berekening van de veiligheidsvoorraad spelen een aantal elementen een belangrijke rol. Ten *eerste* wordt de leveringstijd opgebouwd uit twee componenten. De reactietijd van de leverancier is de eerste component en wordt gedefinieerd als de tijd die verstrijkt tussen het moment van de bestelling en de afgifte van de goederen door de leverancier aan de vervoerder. De tweede component wordt gevormd door de eigenlijke transporttijd. De vereiste veiligheidsvoorraad wordt groter indien de gemiddelde leveringstijd langer wordt en indien de voorraad meer onderhevig is aan schommelingen. Volgens Tyworth (1991, p. 311) vertegenwoordigt de reactietijd van de leverancier 40 procent of meer van de totale leveringstijd. Wanneer enkel de eigenlijke vervoerstijd in beschouwing wordt genomen als leveringstijd, wordt deze leveringstijd onderschat. Dit leidt tot een lagere veiligheidsvoorraad. Bijgevolg worden eveneens de kosten van veiligheidsvoorraad onderschat.

Een *tweede* belangrijk element is de vraag tijdens de levertermijn. Deze vraag, waarmee het verbruiksritme van de voorraad wordt bedoeld, heeft eveneens een invloed op de veiligheidsvoorraad. Des te groter en wisselvalliger de vraag tijdens de levertermijn, des te groter de vereiste veiligheidsvoorraad.

Ten slotte wordt de veiligheidsvoorraad beïnvloed door de mate waarin voorraadtekorten worden getolereerd. Indien de vervoersgebruiker slechts een lage kans op tekorten aanvaardt, moet de veiligheidsvoorraad groter zijn dan in het geval waarin hij een hogere kans op tekorten toelaat.

3.4) Berekening van de veiligheidsvoorraad

In situaties waarin zowel de vraag vanwege de klanten als de levertermijn niet met zekerheid gekend zijn, wordt de veiligheidsvoorraad berekend op basis van de statistische verdeling van de vraag tijdens de levertermijn. Hiermee wordt het verbruik uit de voorraad bedoeld tijdens de periode die verstrijkt tussen het plaatsen van een bestelling en de aankomst van de goederen in het magazijn (Blauwens et al., 2002a, p. 68).

Volgens Baumol en Vinod (1970 volgens Vernimmen en Witlox, 2003, p. 39) zijn deze onzekerheden stochastische elementen die een Poisson verdeling volgen. De veiligheidsvoorraad kan bijgevolg als volgt geformuleerd worden:

$$VV = K \cdot \sqrt{(s + t) \cdot T} \quad (4)$$

Met	VV	= Veiligheidsvoorraad
	K	= Poisson multiplicator
	s	= Gemiddelde tijd tussen twee verzendingen
	t	= Gemiddelde levertermijn
	T	= Het totaal aantal getransporteerde eenheden per jaar

Twee belangrijke parameters die de veiligheidsvoorraad bepalen, zijn de gemiddelde levertermijn t en de gemiddelde tijd tussen twee verzendingen s . Hoe groter deze twee variabelen, ceteris paribus, hoe groter de veiligheidsvoorraad. De parameter K wordt de Poisson-multiplier genoemd (Vernimmen en Witlox, 2003, p. 39).

De Poissonassumptie kan onnauwkeurig zijn en kan resulteren in een overschatting van de vereiste veiligheidsvoorraad. Hierdoor is een alternatieve berekeningswijze vereist. De veiligheidsvoorraad wordt verondersteld afhankelijk te zijn van de verdeling van de vraag tijdens de levertermijn. Deze verdeling hangt op zijn beurt af van de verdeling van de levertermijn en van de verdeling van de vraag gedurende een vast interval (Cawdery, 1976, p. 971 volgens Vernimmen en Witlox, 2003, p. 39)

In hetgeen volgt, wordt verondersteld dat de vraag tijdens de levertermijn een normale verdeling aanneemt. Het is eveneens de bedoeling om de kans op een voorraadtekort onder een bepaalde waarde p te houden. Onder deze assumpties kan de veiligheidsvoorraad op een andere manier berekend worden:

$$VV = K \cdot \sigma \quad (5)$$

Met	VV	= Het niveau van de veiligheidsvoorraad
	K	= De veiligheidsfactor zodat het gebied onder de standaardnormale verdeling rechts van K gelijk is aan p, deze constante is bijgevolg afhankelijk van het toegelaten risico op een voorraadtekort tijdens de levertermijn (Blauwens et al., 2002a, p. 68)
	σ	= De standaardafwijking van de vraag gedurende de levertermijn

De veiligheidsvoorraad wordt bepaald door de parameters K en σ te berekenen zodat het vooraf gedefinieerde serviceniveau gehaald wordt. Hoe hoger de K-waarde wordt, hoe meer veiligheidsvoorraad wordt aangehouden en hoe kleiner het risico op een voorraadtekort wordt. Zodra het risico gekozen wordt, kan de waarde van K terug gevonden worden in een tabel van

de normale verdeling (Blauwens et al., 2002a, p. 68). Tabel 4 geeft een aantal waarden weer voor p en K .

Tabel 4: Enkele waarden van K en p

p	K	p	K
50%	0,00	4%	1,75
40%	0,25	3%	1,88
30%	0,52	2%	2,05
20%	0,84	1%	2,33
10%	1,28	0,5%	2,58
5%	1,64	0,05%	3,30

Bron: Vernimmen en Witlox (2003)

Uit deze tabel blijkt dat de veiligheidsvoorraad toeneemt met dalende kansen op een voorraadtekort gedurende de levertermijn en omgekeerd. Wanneer de kans op een voorraadtekort 50% mag zijn, is er geen veiligheidsvoorraad nodig. Indien deze kans slechts 0,05% mag zijn, moet een veiligheidsvoorraad van 3,3 keer de standaardafwijking van de vraag gedurende de levertermijn aangehouden worden.

De standaardafwijking van de vraag gedurende levertermijn bestaat uit vier elementen: de gemiddelde levertermijn L , de variantie van de levertermijn l , de gemiddelde vraag D en de variantie van de vraag d . De berekening van de standaardafwijking hangt af van de relatie tussen de levertermijn en de vraag. Wanneer de levertermijn onafhankelijk is van de vraag en op voorwaarde dat de vraag geen autocorrelaties bevat, kan de standaardafwijking als volgt berekend worden (Das, 1974 volgens Vernimmen en Witlox, 2003, p. 41):

$$\sigma = \sqrt{Ld + D^2l} \quad (6)$$

De parameter L hangt af van de snelheid van de vervoerswijze, terwijl l afhangt van de stiptheid van de vervoerswijze. Deze beide parameters worden gewogen met respectievelijk de variantie van de vraag d en de gemiddelde vraag D .

Wanneer de levertermijn afhankelijk is van de vraag breidt bovenstaande formule uit tot (Allen et al., 1985):

$$\sigma = \sqrt{Ld + D^2l + \sigma_l \sigma_d} \quad (7)$$

waar σ_l en σ_d de standaardafwijking van de levertermijn respectievelijk de vraag voorstellen. Voorgaande formules tonen duidelijk de impact van snelheid en betrouwbaarheid van een transportmiddel op de veiligheidsvoorraad. Hoe sneller en betrouwbaarder het vervoermiddel (hoe kleiner L en l), ceteris paribus, hoe kleiner de veiligheidsvoorraad indien de kans op een voorraadtekort dezelfde blijft. Hoe langer en wisselvalliger de levertermijn van een bepaalde vervoerswijze (hoe groter L en l), ceteris paribus, hoe groter σ en hoe hoger de veiligheidsvoorraad die aangelegd moet worden, indien een bedrijf niet wil dat de kans op een voorraadtekort toeneemt. In het extreme onrealistische geval zijn L en l beide gelijk aan nul. Bijgevolg is er geen veiligheidsvoorraad nodig. Dit concept komt overeen met het 'just-in-time' principe (Vernimmen en Witlox, 2003, p. 41). Het 'just-in-time' principe veronderstelt dat er geen veiligheidsvoorraden worden aangehouden. Dit is enkel mogelijk wanneer L en l gelijk zijn aan nul (Vernimmen en Witlox, 2001, p. 10). De parameters D en d hangen enkel af van de vraag vanwege de klanten en verschillen bijgevolg niet voor de verschillende transportwijzen (Blauwens et al., 2002a, p. 68).

3.5) De assumptie van een normale verdeling van de vraag gedurende de levertermijn

Het modelleren van de verdeling van de vraag tijdens de levertermijn vormt een essentiële voorwaarde om de effecten van de snelheid en de betrouwbaarheid van een transportalternatief op de voorraadkosten te kunnen evalueren (Tyworth, 1991, p. 304). In vele gevallen uit de literatuur wordt automatisch aangenomen dat de vraag gedurende de levertermijn een normale verdeling volgt en dat L , l , D en d gekend zijn of kunnen geschat worden. Onjuist veronderstellen dat het om een normale verdeling gaat, kan kostelijk zijn. Wanneer incorrect wordt verondersteld dat de vraag tijdens de levertermijn normaal verdeeld is, zal de veiligheidsfactor K te laag worden ingeschat. Dit resulteert in een serviceniveau dat

onder het niveau ligt dat de vervoerder vooropstelt (Vernimmen et al., 2005). Het gebruik van eender welke verdelingsfunctie om de vraag tijdens de levertermijn te karakteriseren is onverantwoord vermits er geen theoretische of empirische verantwoording achter schuilt. Hiertegenover staat dat het schatten en evalueren van de verdelingsfunctie van de vraag tijdens de levertermijn die niet normaal verdeeld is, vrij complex is. Dit verklaart bijgevolg waarom de normale verdeling in de meeste gevallen toegepast wordt (Tyworth, 1991, p. 309-311).

3.2.3.4 Kosten van voorraadtekort

Onder kosten van voorraadtekort vallen de nadelen die ontstaan door het ontbreken van voorraad. Deze kosten ontstaan als gevolg van een volledige uitputting van de voorraad. Indien de voorraad volledig uitgeput is, wordt onder andere de bediening van de klanten niet meer mogelijk, machines kunnen niet meer ingezet worden, vertragingen treden op, de productie moet worden aangepast.

De directe schatting van de kosten van één voorraadtekort is vaak moeilijk en afhankelijk van verschillende factoren zoals onder andere het imago van de verkoper, seizoensproducten. Daarom kan de kostprijs van een voorraadtekort eveneens op een indirecte manier berekend worden. Een methode die voorgesteld wordt door Blauwens, berekent niet de kosten van een tekort als zodanig. In plaats daarvan worden de voorraadkosten berekend die gemaakt moeten worden om de tekorten uit te schakelen. Bij een extra vervoertijd kan de ondernemer nu een extra voorraad aanleggen waardoor er geen voorraadtekorten meer optreden. Op deze manier worden de kosten van een voorraadtekort op een andere manier benaderd, doch wel op een heldere en toepasbare manier.²²

²² <http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=2261> (geraadpleegd op 23 mei 2006)

3.2.3.5 Verpakkingskosten, kosten van orderbehandeling en administratie en instelkosten

Verpakkingskosten, kosten van orderbehandeling en administratie en instelkosten worden vaak samen behandeld als één enkele kostprijs per verzending. Deze kosten nemen toe indien het aantal verzendingen toeneemt en spelen bijgevolg een belangrijke rol bij de bepaling van de optimale verzendkwaliteit.

De verpakkingskosten worden door zowel de soort als de gekozen vervoerwijze beïnvloed. Stukvervoer in colli vereist een duurder verpakking dan bulk- of tankvervoer. Containervervoer drukt de verpakkingskosten van de goederen in de container. De wettelijk voorgeschreven verpakking kan verschillen per vervoerwijze. Op deze manier kan de verpakking een invloed uitoefenen op de kostprijs, bijvoorbeeld voor het vervoer van gevaarlijke stoffen (Blauwens et al., 2001a, p. 263).

De berekening van de jaarlijkse kosten van orderbehandeling en administratie is eerder ongecompliceerd. Het interval tussen twee zendingen is gelijk aan s en bijgevolg geeft $1/s$ het aantal verzendingen per jaar weer. Deze kosten kunnen gereduceerd worden door het jaarlijks aantal verzendingen laag te houden. Dit betekent dat de goederen in grote hoeveelheden verzonden moeten worden. Indien het verzenden in grote partijen niet mogelijk is, kunnen verschillende orders gegroepeerd worden tot grote partijen om aldus de orderkosten te drukken. De geaggregeerde orderkost wordt op deze manier kleiner dan de som van de individuele orderkosten indien er niet wordt gegroepeerd. De vervoerder moet voor ogen houden dat het groeperen van verzendingen eveneens een impact heeft op andere logistieke kosten, zoals de transport- en de voorraadkosten (Vernimmen en Witlox, 2001, p. 5).

Hoge instelkosten ontstaan als gevolg van een productie in korte reeksen. Productie in lange(re) reeksen leidt tot lage(re) instelkosten. De instelkosten worden bijgevolg beïnvloed door de transport- en voorraadbeslissingen. De instelkosten dalen indien het vervoer in grote partijen wordt uitgevoerd. De cyclische voorraadkosten daarentegen nemen toe zoals reeds eerder vermeld. De vraag is of de lagere instelkosten opwegen tegen de hogere cyclische voorraadkosten (Blauwens et al., 2001a, p. 264).

3.2.3.6 Kosten van klantenservice

Vandaag de dag is service belangrijker dan ooit. Een gebrek aan dienst na verkoop leidt tot een onvermijdelijk klantenverlies. Daarom opteren bedrijven voor eigen vervoer of beperken ze zich tot slechts een aantal beroepsvervoerders die specifieke kennis bezitten over de betreffende producten. Een gevolg hiervan is dat naast vervoer eveneens hulpverlening kan aangeboden worden. Naast de levertijd en de voorraadtekorten wordt eveneens het niveau van klantenservice beïnvloed door transportbeslissingen (Blauwens et al., 2001a, p. 264). Voorbeelden van criteria waarop beroepsvervoerders worden beoordeeld, houden onder andere de financiële gezondheid, de staat en de beschikbaarheid van de uitrusting en de reputatie in (McGinnis, 1989).

3.2.3.7 Kosten van vestigingsplaats

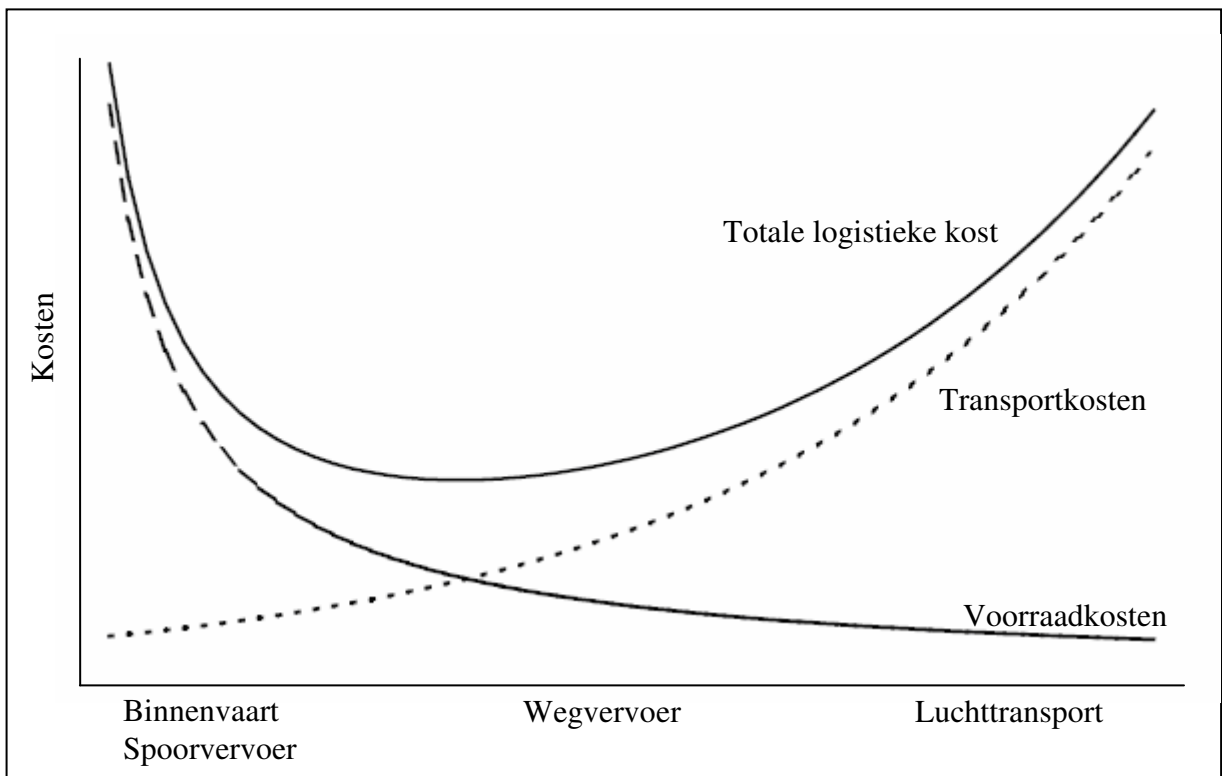
De plaats waar een onderneming zich wenst te vestigen, heeft eveneens een belangrijke invloed op de toekomstige kosten. Daarom zijn de totale kosten van belang en niet alleen de transportkosten. Het is belangrijk voor ogen te houden dat het om een beslissing gaat die, eens genomen, voor lange tijd vast ligt. Op korte termijn vormt de vestigingsplaats een gegeven en moeten hierover geen beslissingen genomen worden (Blauwens et al., 2001a, p. 265).

3.2.4 Afruil tussen transportkosten en voorraadkosten

Het 'inventory-theoretic' model erkent dat er afruilen bestaan in de aanbodketen. Hieronder wordt verstaan dat verschillende logistieke kosten met elkaar in conflict zijn. Een voorbeeld van dergelijk conflict is de afruil tussen de transportkosten en de voorraadkosten (Blauwens et al., 2002c, p. 4).

Louter vanuit het oogpunt van de transportkosten kiest een bedrijf best voor een trage vervoersmodus die grote hoeveelheden kan vervoeren, zoals de binnenvaart, het spoorvervoer

of het zeevervoer, aangezien dit tot schaalvoordelen leidt. Keerzijde van de medaille is dat zulke transportalternatieven aanleiding geven tot hoge voorraadkosten. De snelheid en betrouwbaarheid van tragere vervoerswijzen doen de voorraadkosten toenemen. Hierdoor wordt het aanbieden van een hoog niveau van klantenservice niet meer mogelijk. Wanneer een onderneming enkel de voorraadkosten in beschouwing neemt en deze wil minimaliseren, zijn snelle vervoerswijzen met een kleine capaciteit, zoals het wegvervoer of het luchtvervoer te verkiezen. Deze vervoerswijzen zorgen voor een snellere service. Ze worden echter gekenmerkt door hoge transportkosten. (Vernimmen en Witlox, 2003, p. 43-44 en Blauwens et al. 2002c, p. 4). De verschillende transportalternatieven hebben bijgevolg een invloed op de voorraadkosten, wat leidt tot een afruil tussen transportkosten en voorraadkosten. De logistieke beslissingsnemer wordt geconfronteerd met twee logistieke kosten die als het ware in conflict zijn met elkaar. Deze afruil wordt weergegeven in figuur 7.



Figuur 7: Afruil tussen transportkosten en voorraadkosten. Bron: Ballou (1999).

Welke transportwijze uiteindelijk het goedkoopst zal uitvallen qua totale logistieke kosten, kan niet op voorhand gezegd worden. Eén en ander zal afhangen van een aantal factoren zoals

onder andere de waarde van de goederen die vervoerd worden, de hoogte van de voorraadkosten, de levertijden van de verschillende vervoermodi (waarbij zowel snelheid als stiptheid van belang zijn), het jaarlijks volume dat vervoerd moet worden (Blauwens et al., 2002c, p. 4).

3.2.5 Kritiek op het ‘inventory-theoretic’ model

Het ‘inventory-theoretic’ model veronderstelt dat de verlader de kosten tegen de kwaliteit van service afweegt om op deze wijze het meest optimale transportalternatief te selecteren. Omwille van het feit dat het model de factoren die de verlader normaal beschouwt bij het nemen van een beslissing incorporeert, kan het model resultaten bereiken die het best aansluiten bij de realiteit in vergelijking met andere modellen (Cunningham, 1982, p. 73).

Toch zijn er een aantal beperkingen verbonden aan het model. Het model vereist grote hoeveelheden aan gegevens over specifieke verzendingen. Het is vaak moeilijk om de procedure uit te oefenen op een voldoende grote hoeveelheid aan gegevens opdat bevredigende statistische besluiten kunnen getrokken worden (Cunningham, 1982, p. 73). Ten tweede wordt in het model enkel rekening gehouden met kwantificeerbare gegevens. Bepaalde kwalitatieve beperkingen zoals productkarakteristieken (onder andere de mate van bederfbaarheid, waarde van de goederen, verpakkingsvereisten), en de vervoersmarkt (onder andere de veranderende klantenbehoeften, klantentevredenheid, externe marktinvloeden) worden niet in beschouwing genomen (McGinnis, 1989, p. 41-43). Verder zijn sommige kosten zoals tekortkosten moeilijk of zelfs onmogelijk te meten omwille van de aanwezigheid van vele vage en eventueel niet-kwantificeerbare elementen. Een derde probleem houdt in dat de meeste bedrijven de transport- en de niet-transportkosten tegelijkertijd trachten te minimaliseren. Naargelang de doelstelling van het bedrijf, moeten andere analyses uitgevoerd worden. Ten slotte incorporeert het model de gedragsfactoren niet die de selectie van een transportalternatief beïnvloeden. Het model houdt geen rekening met de percepties die de verlader heeft met betrekking tot de geleverde service, terwijl deze de verlader en bijgevolg de selectie van een transportwijze sterk kunnen beïnvloeden (Cunningham, 1982, p. 73).

Hoofdstuk 4: Inleiding op het praktijkonderzoek

4.1 Inleiding

Om de vertaalslag van de theorie naar de praktijk te kunnen maken, wordt een onderzoek uitgevoerd. Dit onderzoek gebeurt aan de hand van een algoritme, dat opgesteld werd door dr. Wout Dullaert en Dhr. Bart Vernimmen. Het algoritme heeft tot doel de optimale mix van transportalternatieven te bepalen zodat de totale logistieke kost geminimaliseerd wordt. In paragraaf 4.3 wordt uitgelegd hoe het algoritme werkt. Een belangrijk begrip hierbij is ‘order splitting’. Dit begrip kan vertaald worden als “splitsing van levering”. In het vervolg van dit hoofdstuk, wordt verkozen om de Engelse term te behouden. Bij het plaatsen van een bestelling, is het mogelijk deze te splitsen over een aantal leveranciers. Elke leverancier levert zijn deel van de bestelling ten gepaste tijde. Hierbij kunnen verschillende transportmiddelen ingezet worden. Het is tevens mogelijk dat elke leverancier hetzelfde vervoermiddel hanteert om de goederen bij de klant te brengen. Op het begrip ‘order splitting’ wordt in de volgende paragraaf verder in gegaan.

Het praktijkonderzoek wordt in hoofdstuk 5 behandeld. In dit hoofdstuk wordt het effect van een wijziging in een (aantal) parameter(s) op de totale logistieke kost en de ingezette transportmiddelen nagegaan. Wanneer bijvoorbeeld de transportkost van het wegvervoer toeneemt, zal een onderneming dan nog voor deze transportwijze kiezen om haar vervoer uit te voeren of zal ze opteren voor (een) ander(e) vervoerswijze(n)?

4.2 ‘Order splitting’

4.2.1 Definiëring

‘Order splitting’ wordt gedefinieerd als het splitsen van een bestelling over een aantal leveranciers. Elke leverancier levert zijn deel van de bestelling ten gepaste tijde. Deze

methode wordt vooral toegepast om de voorraad aan te vullen. Het gaat bijgevolg om producten die een bedrijf nodig heeft om de voorraad op een bepaald peil te houden (Hill, 1996, p. 53). Wanneer de levertermijn onzeker is, kan de gelijktijdige verwerving van producten uit twee bronnen besparingen opleveren in de voorraad- en tekortkosten. Schaalvoordelen worden behaald indien deze besparingen groter zijn dan de toename in de bestelkosten (Ramasesh et al., 1991, p. 428).

Een andere reden om 'order splitting' toe te passen, ontstaat wanneer een bedrijf werkt met slechts één betrouwbare leverancier. Wanneer deze betrouwbare bron niet beschikbaar is, kan het bedrijf opteren om de bestelling te splitsen over een aantal leveranciers totdat een betrouwbare leverancier opduikt (Kelle en Miller, 2001, p. 408).

Er bestaan een aantal voordelen verbonden aan de samenwerking met slechts één leverancier. Door deze unieke samenwerking ontstaat er wederzijds vertrouwen en afhankelijkheid. Beide partijen hebben de mogelijkheid om op voorhand samen een planning op te stellen. Hoe groter de bestelhoeveelheden en hoe gemakkelijker de toekomstplanning langs de leverancierszijde, hoe voordeliger de aankoopvoorwaarden zullen zijn. De nadelen verbonden aan de samenwerking met één leverancier vormen de voordelen van 'order splitting'. Deze nadelen houden in dat een overeenkomst met slechts één leverancier tot zelfgenoegzaamheid kan leiden inzake levertermijnen en aankoopvoorwaarden die niet overeenstemmen. Indien de gekozen leverancier een ernstig probleem ondervindt, bestaat er geen alternatieve bron van aanbod die onmiddellijk beschikbaar is (Hill, 1996, p. 53).

4.2.2 'Order splitting' in de literatuur

In de literatuur werd reeds veel onderzoek verricht naar het toepassen van 'order splitting'. Dit onderzoek kan opgesplitst worden in twee stromen. De eerste stroom focust op statistische theorieën en methoden om het effect van het splitsen van een bestelling op de verdeling van de effectieve levertermijnen, en op zijn beurt de kosten van de veiligheidsvoorraad en de tekortkosten, te schatten. De tweede stroom concentreert zich op de economische analyse en

meer specifiek op de ontwikkeling van modellen met een gemiddelde kost op lange termijn. Deze analyses beoordelen de prestaties van modellen waarin bestellingen gesplitst worden in vergelijking met modellen waarin dit niet gebeurt. De theorie dat ‘order splitting’ de cyclische voorraad reduceert, heeft een belangrijke rol gespeeld in de economische analyse (Thomas en Tyworth, 2006, p. 246).

Het merendeel van dit onderzoek besluit dat het splitsen van een bestelling resulteert in een daling van de veiligheidsvoorraad en bijgevolg de voorraad- en tekortkosten. Het voordeel van ‘order splitting’ is afhankelijk van de mate waarin de besparingen in de voorraadkosten groter zijn dan de toename in de bestelkosten. Om de potentiële voordelen van ‘order splitting’ te bepalen, moet de toepassing van deze methode vergeleken worden met een beleid waarin overeenkomende kleinere bestellingen worden geplaatst bij één leverancier (Hill, 1996, p. 60-61).

Het belangrijkste punt dat in de verschillende onderzoeken naar voren komt, betreft of de besparingen in de voorraad- en tekortkosten opwegen tegen de toegenomen bestelkosten (Thomas en Tyworth, 2006, p. 247). Redenen waarom ‘order splitting’ toegepast moet worden, zijn een daling in de veiligheidsvoorraad, een daling in de cyclische voorraad en een stijging in de bestelkost die telkens kleiner wordt naarmate het aantal bestellingen toeneemt (Thomas en Tyworth, 2006, p. 245). De laatste reden houdt in dat de stijgende bestelkost van de tweede en volgende bestellingen relatief klein zal zijn.

4.2.2.1 Besparingen in de kosten van de veiligheidsvoorraad en de tekortkosten

‘Order splitting’ zal het gemiddelde en de variantie van de levertermijn reduceren. Bijgevolg wordt de veiligheidsvoorraad die vereist is om een vooraf bepaald serviceniveau te behalen of de verwachte totale tekortkost voor een vastgelegd niveau aan veiligheidsvoorraad gereduceerd (Thomas en Tyworth, 2006, p. 247-248). Sculli en Wu (1981 volgens Thomas en Tyworth, 2006, p. 248) beweren dat een bedrijf hogere serviceniveaus kan bereiken voor om het even welke hoeveelheid veiligheidsvoorraad door de bestellingen te splitsen over

meerdere leveranciers. Dit komt omdat het bedrijf geconfronteerd wordt met de levertermijnen van verschillende leveranciers in plaats van de levertermijn van een individuele leverancier. De goederen zullen op verschillende tijdstippen aankomen. Een deel van de bestelling komt vroeger aan waardoor het bedrijf beter en sneller kan inspelen op de behoeften van de klant.

Hayya et al. (1987 volgens Thomas en Tyworth, 2006, p. 248) beweren dat het belangrijkste voordeel van 'multiple sourcing' een reductie is van de totale kosten, naast een verbeterde competitie en betere relatieopbouw. Volgens Kelle en Silver (1990a, b volgens Thomas en Tyworth, 2006, p. 248) vormt 'order splitting' een voordeel indien de onzekerheid van de levertermijn middelmatig tot hoog is en indien de bestelhoeveelheid groot is ten opzichte van de gemiddelde levertermijn. Pan et al. (1991 volgens Thomas en Tyworth, 2006, p. 248) beweren dat een grote kostenbesparing bereikt kan worden door te switchen naar een beleid met multiple sourcing indien de levertermijn veranderlijk is. Tyworth en Ruiz-Torres (2000, p. 141) stellen dat de voorkeur wordt gegeven aan twee leveranciers indien de levertermijn zeer onbetrouwbaar is.

4.2.2.2 Besparingen in de kosten van de cyclische voorraad

De studies door Pan en Liao (1989), Ramasesh (1990) en Gupta en Kini (1995) breiden het EOQ model uit om de hoeveelheid om de voorraad aan te vullen en het aantal leveringen van n leveranciers met grootte Q/n te berekenen zodat de totale kost geminimaliseerd wordt. Door bestellingen gelijk te splitsen over n leveranciers reduceert de cyclische voorraad van de helft van de totale hoeveelheid van de bestelling (Q) tot de helft van de gesplitste hoeveelheid (Q/n). De cyclische voorraad daalt bijgevolg van $Q/2$ tot $Q/2n$ (Thomas en Tyworth, 2006, p. 248). Zhou en Lau (1992 volgens Thomas en Tyworth, 2006, p. 248) bewezen dat de kosten van de cyclische voorraad dalen in een omgeving met een stochastische levertermijn. Een ander belangrijk voordeel is volgens hen een daling in de gemiddelde voorraad. Dit voordeel kan enkel gerealiseerd worden indien een tweede leverancier wordt geselecteerd met een langere gemiddelde levertermijn dan de eerste leverancier. In latere studies van de twee

auteurs, beweren ze dat de besparingen in de kosten van de cyclische voorraad door 'order splitting' groter zijn dan de besparingen in de kosten van de veiligheidsvoorraad en de tekortkosten (Thomas en Tyworth, 2006, p. 248).

Volgens Chiang resulteren meerdere leveringen in een daling van de gemiddelde cyclusvoorraad en bijgevolg van de totale kosten, vooral als de verzendingskost van een order niet klein is. Een optimaal aantal leveringen per cyclus bestaat zodat de laagste totale kost wordt bereikt (Chiang, 2001, p. 75).

In de literatuur wordt eveneens verondersteld, maar niet bewezen, dat voor een bepaald voorraadserviceniveau van de klanten en een bepaalde geaggregeerde bestelhoeveelheid het plaatsen van kleinere bestellingen bij één leverancier resulteert in een significant lagere gemiddelde voorraad dan bij 'order splitting'. Wanneer dit het geval is, zal het plaatsen van kleinere bestellingen bij één leverancier altijd goedkoper zijn dan het splitsen van een bestelling over meerdere leveranciers. Hill is bijgevolg tegen het splitsen van een order puur vanuit een voorraadstandpunt. Ook andere kost/winstfactoren dienen in de vergelijking in aanmerking genomen te worden (Hill, 1996, p. 60).

4.2.2.3 Toenemende bestelkosten

De eerste onderzoeken met betrekking tot 'order splitting' van Pan en Liao (1989) en Sculli en Shum (1990) geven aan dat het aantal leveringen geen of weinig invloed hebben op de geaggregeerde bestelkost omdat de individuele elementen, zoals specificaties, veilingevaluaties, en contractdocumentatie, grotendeels vast liggen. Bijgevolg wordt een enkele parameter A gebruikt om de geaggregeerde bestelkost aan te geven in zowel modellen met 'order splitting' als modellen waarin bestellingen niet gesplitst worden (Thomas en Tyworth, 2006, p. 248).

Ramasesh (1990, p. 73) verdedigt de methode waarin één enkele parameter wordt vastgelegd om de bestelkost aan te duiden. De transport- en inspectiekosten nemen toe met het aantal

verzendingen per bestelling, terwijl de opportuniteitskosten en de kosten geassocieerd met het ontvangen, behandelen en opslaan van goederen dalen. De exacte mathematische vormen van deze wijzigingen zijn te complex om te modelleren. Daarom wordt aangenomen dat deze wijzigingen in de kosten elkaar uitbalanceren en dat de geaggregeerde kost per verzending als een constante wordt behandeld. Deze veronderstelling is nuttig en bruikbaar omdat het veel makkelijker is een betrouwbare schatting van de geaggregeerde kost per verzending te maken dan te speculeren over de wiskundige vorm van de wijzigingen in de kosten.

Later werd de veronderstelling dat de bestelkost geen invloed ondervindt van het aantal bestellingen door verschillende auteurs opgeheven, waaronder Ramasesh (1991, p. 430). Verschillende studies na 1990 gebruikten multiplicatieve of additionele modellen om te bepalen hoe de bestelkosten beïnvloed worden door 'order splitting' (Thomas en Tyworth, 2006, p. 249).

Sedarage et al. (1999) bepalen in hun onderzoek de hoeveelheid die bij elke leverancier moet besteld worden wanneer het bedrijf 'order splitting' toepast. Ze proberen eveneens het bestelpunt van de gestockeerde items te bepalen door de totale kosten te minimaliseren. Ze besluiten dat de veronderstelling 'hoe meer leveranciers, hoe beter' niet van toepassing is. Doch bestaat er een optimaal aantal leveranciers. Een toename van het aantal leveranciers doet het bestelpunt en de bestelhoeveelheid bij elke leverancier afnemen. De totale bestelhoeveelheid neemt echter toe. Een toename van de standaardafwijking van de levertermijn en een toename van de gemiddelde levertermijn doen het optimaal aantal leveranciers en de kostenbesparingen van een leveringssysteem met meerdere leveranciers toenemen ten opzichte van een systeem met slechts één leverancier.

In een aantal situaties kan 'order splitting' met een duurdere leverancier en een goede levertermijn de kosten verlagen. Hierdoor wordt vermeden dat een deel of de volledige bestelling geplaatst wordt bij een goedkope leverancier. De resultaten uit de verschillende studies en onderzoeken vormen een belangrijke beschouwing bij de keuze tussen dure, doch snelle leveranciers en goedkopere doch minder betrouwbare leveranciers (Mishra en Tadikamalla, 2005, p. 24).

4.3 Beschrijving van het algoritme en zijn implementatie

4.3.1 Voorwaarden

Dr. Wout Dullaert en Dhr. Bert Vernimmen hebben een algoritme ontwikkeld om de optimale mix van transportalternatieven te bepalen zodat de totale logistieke kost geminimaliseerd wordt. De analyse die ze uitvoeren, verschilt op twee vlakken van het traditionele ‘order splitting’ probleem.

Ten *eerste* wordt er verondersteld dat de volledige capaciteit van een transportalternatief wordt benut. Dit betekent dat enkel die bestelhoeveelheden worden beschouwd die een lineaire combinatie vormen van de totale capaciteiten van de verschillende transportmiddelen. Wanneer een bepaald transportmiddel wordt geselecteerd om het transport uit te voeren, wordt de volledige capaciteit benut. De beweegreden achter deze assumptie is de volgende: voor een groot aantal goederen zoals vloeibare bulkgoederen vormen de transportkosten tussen een gegeven bron en een gegeven bestemming een vaste hoeveelheid per verzending, onafhankelijk van de verzonden hoeveelheid. Wanneer een vrachtwagen of een binnenschip het vervoer van de leverancier tot aan de klant uitvoert, worden er sowieso een deel kosten gemaakt. Deze kosten ontstaan onafhankelijk of de volledige capaciteit of slechts een deel van de capaciteit van het vervoermiddel wordt benut. Daarom is het onder deze omstandigheden meer rendabel om de volledige capaciteit van het transportalternatief te gebruiken (Dullaert et al., 2005b, p. 202).

De veronderstelling van ‘full capacity utilisation’ of “volledige capaciteitsbenutting” heeft een zeer belangrijke implicatie. Het aantal mogelijke bestelhoeveelheden is beperkt en het probleem om de optimale mix van transportalternatieven te bepalen, kan geformuleerd worden als een combinatorisch optimalisatieprobleem. Om dit probleem op te lossen, wordt er eerst een Genetisch of Evolutionair Algoritme ontwikkeld. Een genetisch of evolutionair algoritme wordt gebruikt om optimalisatieproblemen op te lossen (Pirlot, 1996, p. 439). Dergelijk algoritme tracht oplossingen te vinden voor moeilijk op te lossen problemen door de beginselen van de evolutionaire biologie zoals bijvoorbeeld natuurlijke selectie en mutatie

toe te passen.²³ Omdat een evolutionair algoritme een metaheuristiek is, zal de bekomen oplossing niet noodzakelijk de best mogelijke oplossing zijn. Het algoritme zal echter een goed haalbare oplossing genereren in een aanvaardbare hoeveelheid tijd (Dullaert et al., 2005b, p. 202). De werking van een genetisch of evolutionair algoritme wordt in de volgende paragraaf besproken. Hoe dergelijk algoritme geïmplementeerd wordt in het programma van dr. Dullaert en Dhr. Vernimmen, wordt in paragraaf 4.3.3 behandeld.

Het *tweede* vlak waarop de analyse verschilt van het traditionele probleem betreft het concept ‘fastest transport alternative’ of “snelste transportalternatief”. Dit concept wordt geïntroduceerd bij het berekenen van de kosten van de veiligheidsvoorraad. De berekening van deze voorraad is gebaseerd op de levertermijn van het snelste transportalternatief. Het snelste transportalternatief is dat vervoersmiddel met de kortste gemiddelde levertermijn. Een extra voorwaarde is wel dat deze transportwijze er voor zorgt dat ten minste een vooraf bepaalde minimumhoeveelheid geleverd wordt aan de klant (Dullaert et al., 2005b, p. 202). Door expliciet te vereisen dat een minimumvolume moet geleverd worden aan de klant, wordt een voorraadtekort kort na de aankomst van het snelste transportalternatief vermeden. Wanneer slechts een kleine hoeveelheid geleverd wordt, is de kans op een voorraadtekort zeer groot. Door op voorhand een minimumhoeveelheid te specificeren, wordt de kans op een voorraadtekort gereduceerd. Indien bijgevolg een bepaald transportalternatief niet het vereiste minimum levert, wordt de berekening van de veiligheidsvoorraad gebaseerd op de levertermijn van een andere vervoerswijze. Dit vervoermiddel zal een langere levertermijn hebben. Aan de volumevereiste zal daarentegen wel voldaan zijn (Dullaert et al., 2005b, p. 203).

4.3.2 Genetisch algoritme

Genetische algoritmen (GA's) werden ontwikkeld door John Holland als een zoektechniek gebaseerd op de evolutie volgens Darwin.²⁴

²³ <http://www.ethesis.net/intelligentie/AI-Lab.pdf> (geraadpleegd op 21 mei 2006)

²⁴ <http://grid.let.rug.nl/~kleiweg/papers/scriptie.pdf> (geraadpleegd op 21 mei 2006)

Een genetisch algoritme start met een initiële populatie die bestaat uit een aantal oplossingen. De grootte van de populatie blijft dezelfde na elke iteratie. De beste oplossingen uit een populatie worden geselecteerd. Vervolgens worden telkens twee oplossingen genomen, waarop cross-over bewerkingen worden uitgevoerd. Hierdoor ontstaan “kinderoplossingen” die de slechte oplossingen uit de oorspronkelijke populatie vervangen. Ten slotte kan mutatie toegepast worden op een aantal “kinderen” (Pirlot, 1996, p. 501).

Meer in detail doorloopt een genetisch algoritme de volgende stappen om tot een oplossing te komen.

4.3.2.1 Initialisatie

Initieel worden verschillende oplossingen gegenereerd. Deze oplossingen zijn, afhankelijk van het probleem, één of meerdere getallen die meestal willekeurig gekozen zijn. Door de evolutie evolueren deze willekeurige oplossingen tot optimalere oplossingen.²⁵

4.3.2.2 Selectie

Elke oplossing in de bestaande populatie wordt geëvalueerd door de zogeheten fitness waarde (Pirlot, 1996, p. 501). Deze waarde geeft aan hoe goed de oplossing is in vergelijking met de anderen en een beoogde optimale oplossing. Net zoals in de evolutietheorie is het idee dat de beteren overleven.²⁶ De selectie van de beste oplossingen gebeurt op basis van deze fitnesswaarden. De kans dat een oplossing wordt geselecteerd, neemt toe met zijn fitnesswaarde (Pirlot, 1996, p. 501). De selectie van de beste oplossingen kan gebeuren door de beste 25 of 50% te nemen en de anderen weg te gooien of door onderling telkens twee oplossingen met elkaar te vergelijken en de beste van die twee te nemen.²⁷

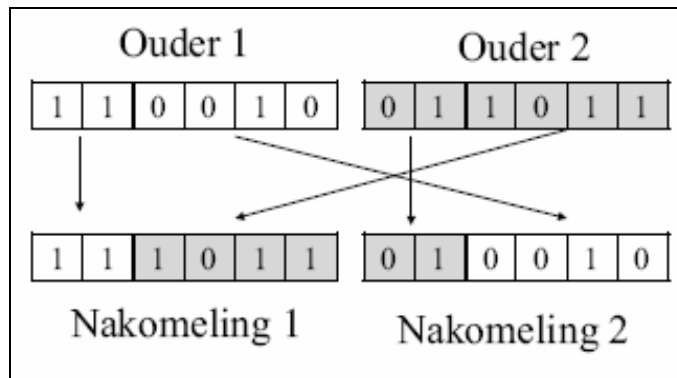
²⁵ http://nl.wikipedia.org/wiki/Genetisch_algoritme (geraadpleegd op 21 mei 2006)

²⁶ http://nl.wikipedia.org/wiki/Genetisch_algoritme (geraadpleegd op 21 mei 2006)

²⁷ http://nl.wikipedia.org/wiki/Genetisch_algoritme (geraadpleegd op 21 mei 2006)

4.3.2.3 Reproductie

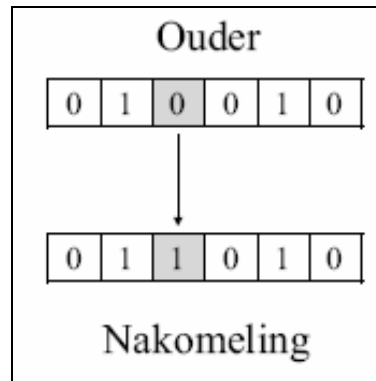
Om de populatie weer op de oude grootte te krijgen, dienen de oplossingen zich te reproduceren. Deze reproductie kan met behulp van mutatie en recombinitie. Bij recombinitie worden twee oplossingen gecombineerd om twee nieuwe oplossingen te maken. Dit kan bijvoorbeeld door cross-over (Dullaert et al., 2005b, p. 205). Paren van geselecteerde oplossingen worden onderworpen aan de cross-over bewerking (Pirlot, 1996, p. 502). Door de “staarten” van twee oplossingen te wisselen, ontstaan twee nieuwe (“kinderen”) oplossingen (Dullaert et al., 2005b, p. 205). Op figuur 8 wordt een voorbeeld van cross-over gegeven.



Figuur 8: Cross-over. Bron: <http://users.ugent.be/~heekhou/cambrain/Thesistekst.pdf>.

Een aantal van de “kinderoplossingen” worden vervolgens onderworpen aan mutatie. De meest eenvoudige mutatie bewerking houdt in dat een willekeurige positie gekozen wordt. Het karakter dat op die positie staat wordt vervangen door een ander karakter uit het alfabet (Pirlot, 1996, p. 502). Bij mutatie worden bijgevolg bij een aantal “kinderoplossingen” in de populatie één of meerdere getallen gemuteerd. Hierdoor kunnen oplossingen (lichtelijk) veranderen in vergelijking met de populatie in de vorige generatie.²⁸ Een voorbeeld van mutatie wordt weergegeven op figuur 9.

²⁸ http://nl.wikipedia.org/wiki/Genetisch_algorithme (geraadpleegd op 21 mei 2006)



Figuur 9: Mutatie. Bron: <http://users.ugent.be/~heeckhau/cambrain/Thesistekst.pdf>.

4.3.2.4 Substitutie

De laatste stap in de generatie van een nieuwe populatie van oplossingen is de substitutie van de “slechte” oplossingen door de eventueel gemuteerde kinderoplossingen. De “slechte” oplossingen worden geselecteerd in overeenstemming met hun fitnesswaarde zoals dit eveneens het geval was bij de selectie van de “beste” oplossingen (Pirlot, 1996, p. 502).

4.3.2.5 Stopconditie

Het stoppen van de evolutie kan op verschillende manieren. Enkele veelgebruikte stopcondities zijn:²⁹

- Na het berekenen van een vooraf vastgesteld aantal generaties
- Na een toegewezen computertijd of geldverbruik (vanwege het budget)
- Na het lang gelijk blijven van de beste fitness waarde of het convergeren naar een bepaalde waarde toe
- Een combinatie van de bovenstaande condities

Samengevat ziet de werking van een genetisch algoritme er als volgt uit:

²⁹ http://nl.wikipedia.org/wiki/Genetisch_algoritme (geraadpleegd op 21 mei 2006)

Kies initiële populatie
Bepaal voor elk individu de fitness
Herhaal tot de stopconditie vervuld is:
 Selecteer de individuen uit de huidige populatie
 Reproductie beste individuen
 Bepaal voor elk individu de fitness
 Vervang slechte individuen

4.3.3 Implementatie van het genetisch algoritme in het programma van dr. Dullaert en Dhr. Vernimmen

Het algoritme dat door dr. Dullaert en Dhr. Vernimmen werd opgesteld, start met een populatie van mogelijke oplossingen voor het transportkeuzeprobleem. Een oplossing voor het optimalisatieprobleem is een vector van geheelgetallen. Zo'n vector ziet er als volgt uit: $\langle 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \rangle$. Elk geheelgetal staat voor een bepaald transportalternatief en geeft het aantal keer dat het transportmiddel ingezet wordt aan. In het programma van dr. Dullaert en Dhr. Vernimmen worden twee vrachtwagens en drie binnenschepen vergeleken. Wanneer het programma een oplossing $\langle 2 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \rangle$ genereert, betekent dit dat twee vrachtwagens met een capaciteit van 10 ton, één vrachtwagen met een capaciteit van 25 ton en één binnenschip met een capaciteit van 1000 ton ingezet worden.

Om de initiële populatie van oplossingen te construeren, kunnen twee constructiealgoritmen gehanteerd worden. Het eerste algoritme genereert de geheelgetallen in de oplossing door zich te baseren op de opslagcapaciteit van de klant en de draagcapaciteit van het transportalternatief dat in beschouwing genomen wordt. Dit gebeurt onafhankelijk van hoeveel opslagcapaciteit er reeds benut wordt door de andere vervoerswijzen. Het maximaal aantal keer dat een transportalternatief i kan gebruikt worden in een oplossing (n) wordt als volgt gespecificeerd: $n_i = \left\lfloor \frac{\text{opslagcapaciteit}}{\text{draagcapaciteit}} \right\rfloor$. Voor elk transportalternatief kan een oplossing vervolgens bepaald worden door een getal n_i op toevallige wijze te selecteren uit $[0, n_i]$ (Dullaert et al., 2005b, p. 204).

Aangezien het eerste constructiealgoritme geen rekening houdt met de reeds bezette opslagcapaciteit bij de klant, werd een tweede algoritme geconstrueerd. Dit algoritme selecteert eerst willekeurig een transportalternatief. Vervolgens bepaalt het algoritme hoeveel keer het alternatief wordt gebruikt door zich te baseren op een maximaal aantal en door de opslagcapaciteit die reeds door andere vervoerswijzen benut wordt in rekening te brengen. Het maximaal aantal keer dat een transportmiddel kan gebruikt worden, wordt bijgevolg anders gedefinieerd in vergelijking met het eerste constructiealgoritme (Dullaert et al., 2005b, p. 204-205).

$$n_i = \frac{\text{opslagcapaciteit} - \text{reeds_gebruikte_capaciteit}}{\text{draagcapaciteit}} \quad (8)$$

Voor elk transportalternatief wordt opnieuw een oplossing bepaald door een getal n_i op toevallige wijze te selecteren uit $[0, n_i]$.

Nadat de populatie met mogelijke oplossingen geconstrueerd werd en de ‘slechte’ verwijderd werden, worden nieuwe oplossingen gegenereerd door cross-over of mutatie toe te passen.

Bij cross-over worden de staarten van twee oplossingen verwisseld tot twee nieuwe oplossingen. Een voorbeeld zal dit duidelijk maken. Stel dat twee oplossingen genereert werden die er als volgt uitzien:

<1 2 | 0 1 1>
<3 0 | 2 0 1>

In de eerste oplossing wordt één kleine vrachtwagen, twee grote vrachtwagens, één medium binnenschip en één groot binnenschip ingezet. De tweede oplossing geeft aan dat drie kleine vrachtwagens, twee medium binnenschepen en één groot binnenschip gebruikt worden. Wanneer cross-over toegepast wordt, worden de staarten van deze oplossingen met elkaar verwisseld. Dit geeft twee nieuwe oplossingen:

<1 2 2 0 1>

<3 0 0 1 1>

De oplossing met de laagste totale logistieke kost wordt geselecteerd.

De methode mutatie werkt verder met de twee bekomen cross-over oplossingen. Met een waarschijnlijkheid van 10% wordt een mutatieoperator toegepast op de oplossing. Deze operator selecteert willekeurig een transportalternatief. De capaciteit die door dit alternatief gebruikt wordt, komt terug vrij en kan dus opnieuw benut worden. De operator genereert vervolgens een nieuw geheelgetal voor de oplossingsvector door zich te baseren op de maximale hoeveelheid capaciteit die door de andere vervoerswijzen in de oplossing kan benut worden (Dullaert et al., 2005b, p. 205). Opnieuw wordt nagegaan of er een verbetering ontstaat in de jaarlijkse totale logistieke kost. Wanneer dit het geval is, wordt deze laatste oplossing aanvaard als betere oplossing.

4.3.4 Parameters

4.3.4.1 Productparameters

Het programma van dr. Wout Dullaert en Dhr. Bert Vernimmen definieert een aantal productparameters die nodig zijn om de totale logistieke kost te berekenen. De experimenten van het onderzoek die in het volgende hoofdstuk aan bod komen, passen deze constanten toe. In tabel 5 zijn de verschillende constanten terug te vinden.

Tabel 5: Productparameters

Productparameters	
Jaarlijkse vraag (ton)	36.000
Opslagcapaciteit bij de klant (ton)	2.250
Opslagkost (% van waarde van het product per ton per jaar)	0,3
Bestelkost (€)	10
Waarde van het product (€ per ton)	500
Service niveau (%)	99
Veiligheidsfactor	2,33
Gemiddelde vraag (ton)	100
Variantie van de vraag (ton ²)	30
Werkelijke vraag (ton)	100

Bron: Dullaert et al. (2005b)

4.3.4.2 Parameters van de transportalternatieven

Naast deze productparameters worden enkele parameters gedefinieerd met betrekking tot de verschillende transportalternatieven. Vijf vervoerswijzen worden met elkaar vergeleken. Het gaat om twee vrachtwagentypes en drie binnenvaartschepen. In tabel 6 worden de parameters van deze vijf vervoermiddelen weergegeven.

Tabel 6: Parameters van de transportalternatieven

Parameters van de transportalternatieven (TA)					
	TA 1 (kleine vrachtwagen)	TA 2 (grote vrachtwagen)	TA 3 (klein binnenschip)	TA 4 (medium binnenschip)	TA 5 (groot binnenschip)
Capaciteit (ton)	10	25	300	600	1.000
Transport-kost (€)	150	250	2.700	4.800	7.000
Gemiddelde levertermijn (dagen)	2	2	6	6	6
Variantie levertermijn (dagen ²)	0,4	0,4	1	1	

Bron: Dullaert et al. (2005b)

De verschillende transportalternatieven vertonen alle een dalende transportkost per ton bij toenemende capaciteiten. Dit fenomeen staat bekend als schaalvoordelen. Een verdubbeling van de capaciteit heeft een toename van de transportkost tot gevolg. Deze toename is echter minder groot dan een verdubbeling. Door de schaalvoordelen nemen de transportkosten minder snel toe bij een toename van de capaciteit. Er wordt verondersteld dat indien meer dan één transportalternatief gebruikt wordt in een oplossing, de bestellingen tegelijkertijd worden geplaatst (Dullaert et al., 2005b, p. 205).

4.3.4.3 Parameters van het genetisch algoritme

De parameters van het genetisch algoritme zijn de volgende. De populatiegrootte vormt een belangrijk gegeven in een genetisch algoritme. De beste oplossing (bestSolution) vertrekt van een hele hoge waarde. Indien door cross-over of mutatie een lagere waarde wordt gevonden, wordt de hoge waarde vervangen. De parameter “maxNoImprovement” zorgt er voor dat het

algoritme stopt indien bij een aantal generaties geen verbetering is gevonden. Alleszins stopt het algoritme na een aantal vooraf bepaalde generaties. De parameter “elitism” duidt aan dat de beste oplossing steeds in de populatie wordt behouden en bijgevolg niet door cross-over kan verdwijnen.

4.3.5 Beschrijving van het programma

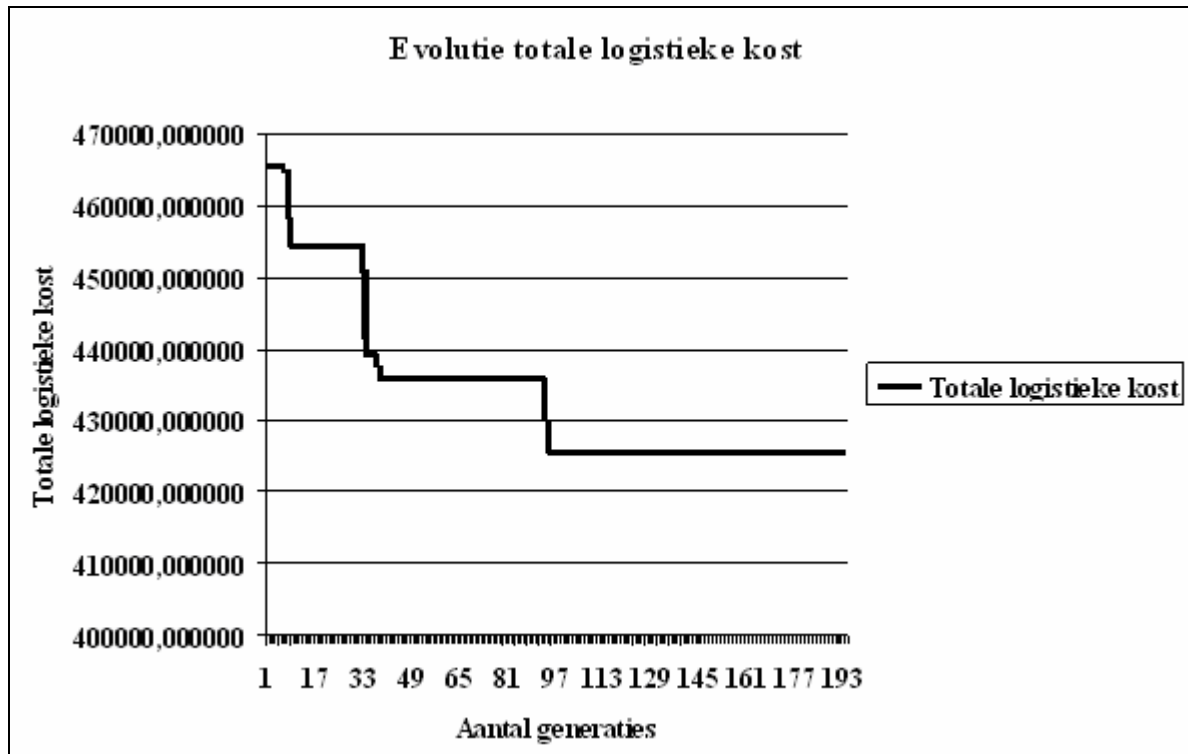
4.3.5.1 Beschrijving van het inputbestand

Het programma heeft een gegevensbestand nodig om het algoritme op toe te passen. Elk inputbestand, waarvan een voorbeeld terug te vinden is in bijlage 1, bestaat uit een aantal parameters. Eerst wordt de populatiegrootte weergegeven. Vervolgens zijn het aantal transportalternatieven terug te vinden. Per alternatief wordt een lijn in het bestand weergegeven met volgende informatie: de capaciteit (capacity), het transporttarief (freighRate), de gemiddelde waarde van de levertermijn (averageLT) en de variantie van de levertermijn (varianceLT).

De parameters uit tabellen 5 en 6 dienen als input voor het programma. Door het programma vervolgens uit te voeren, ontstaat een nieuw bestand met de outputgegevens.

4.3.5.2 Beschrijving van het outputbestand

In bijlage 2 wordt een voorbeeld gegeven van een outputbestand. Het voorbeeld heeft betrekking op een toename van de transportkost van een vrachtwagen met een capaciteit van 10 ton. In het outputbestand wordt per generatie de totale logistieke kost bijgehouden tot dat het algoritme stopt. Op onderstaande figuur (figuur 10) wordt een voorbeeld van dergelijke evolutie ter illustratie weergegeven. Het voorbeeld dat getoond wordt, heeft eveneens betrekking op een toename van de transportkost bij een transportalternatief met een capaciteit van 10 ton.



Figuur 10: Evolutie van de totale logistieke kost. Bron: Eigen verwerking.

Na de evolutie van de totale logistieke kost worden in het outputbestand de inputgegevens weergegeven. Naast de inputgegevens bevindt zich een extra kolom die het maximaal aantal transportalternatieven weergeeft die gebruikt kan worden. Deze informatie wordt als volgt gedefinieerd:

$$\max N_{Veh} = \left\lfloor \frac{\text{opslagcapaciteit}}{\text{capaciteit}_{\text{transportalternatief}}} \right\rfloor \quad (9)$$

Vervolgens wordt in het outputbestand de oplossing als een vector weergegeven. Een voorbeeld van zo'n vector is <1 1 0 0 1>. Elk geheelgetal in de vector stelt een bepaald transportalternatief voor en geeft het aantal keer dat het transportmiddel ingezet wordt aan. Daarna wordt er informatie verschaft over het snelste alternatief. Vervolgens wordt de kostfunctie in al zijn termen weergegeven. De totale logistieke kost is de som van de transportkost, de kost van de veiligheidsvoorraad, de kost van de voorraad tijdens vervoer, de kost van de cyclusvoorraad en de bestelkost. Deze totale logistieke kost geeft de totale kost

per bestelling weer. Verder wordt in het outputbestand het volume van de levering weergegeven. Dit getal wordt bekomen door de capaciteiten van de transportalternatieven die gebruikt worden samen te tellen. Naast het volume van de levering wordt de scaled totale logistieke kost weergegeven. De scaled totale logistieke kost wordt gedefinieerd als de totale logistieke kost vermenigvuldigd met het quotiënt van de jaarlijkse vraag met het volume van de levering. De waarde “fitness” geeft aan hoe goed de oplossing is in vergelijking met de andere oplossingen en een beoogde optimale oplossing. Op de laatste lijn is de “duration” terug te vinden. Deze parameter is een prestatie maatstaf die de tijd weergeeft om het algoritme uit te voeren.

4.3.5.3 Initiële oplossing

Op basis van de gegevens uit tabellen 5 en 6 bepaalt het programma dat een goede oplossing de vector $\langle 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \rangle$ is en dat de totale logistieke kost 424634,76 € bedraagt. Dit betekent dat een bedrijf gebruik zal maken van een vrachtwagen met een capaciteit van 10 ton, één vrachtwagen van 25 ton en één binnenschip van 1000 ton om haar vervoer uit te voeren.

De gegevens uit tabellen 5 en 6 en de gevonden oplossing vormen de basis voor de onderzoeken die in het volgende hoofdstuk aan bod komen. Om een vergelijking te maken met wijzigende parameters, worden steeds tabel 5 en 6 en de totale logistieke kost van 424634,76 € als vertrekpunt genomen.

Hoofdstuk 5: Praktijkonderzoek

5.1 Inleiding

Zoals blijkt uit de literatuurstudie, wordt de keuze voor één of meerdere transportalternatieven door heel wat parameters beïnvloed. De transportkost of het tarief van een transportmiddel speelt een zeer belangrijke rol in dit keuzeprobleem. Verder vormen de gemiddelde levertermijn en de variabiliteit in deze levertermijn parameters die eveneens een invloed hebben op de selectie van één of meerdere vervoerswijzen. De mate waarin een transportmiddel de goederen zonder verlies en schade kan vervoeren kan eveneens in beschouwing genomen worden om een keuze te maken tussen verschillende vervoerswijzen. Andere mogelijkheden waarop de keuze tussen verschillende transportalternatieven kan gebaseerd worden, zijn de beschikbaarheid, de frequentie, de grootte of de capaciteit, de toegankelijkheid, het comfort, de flexibiliteit en de veiligheid van de vervoermiddelen. Ten slotte spelen de af te leggen afstand, de aard en de waarde van de te vervoeren goederen een rol in het keuzeprocess.

In het onderzoek wordt nagegaan of deze parameters daadwerkelijk een invloed hebben op de keuze voor een bepaald transportalternatief. Een belangrijke methode om het keuzeprobleem op te lossen, is het 'inventory-theoretic' model waarbij het probleem geanalyseerd wordt vanuit het concept "totale logistieke kost". Een bedrijf selecteert één of meerdere transportmiddelen om haar goederen te vervoeren indien de totale logistieke kost van deze keuze geminimaliseerd wordt. Bijgevolg wordt in het onderzoek nagegaan welke parameters een invloed hebben op de totale logistieke kost.

Het onderzoek wordt uitgevoerd aan de hand van een algoritme dat dr. Dullaert en Dhr. Vernimmen hebben opgesteld. Dit algoritme bepaalt de optimale mix van transportalternatieven door de totale logistieke kost te minimaliseren. In dit algoritme worden de verschillende transportalternatieven aangeduid aan de hand van de parameters capaciteit, transportkost, gemiddelde levertermijn en variantie in deze levertermijn. Het onderzoek

bekijkt bijgevolg enkel deze parameters en gaat na wat het effect is op de totale logistieke kost indien één of meerdere van deze variabelen wijzigen.

Het onderzoek bestaat uit twee delen. In het eerste deel wordt telkens slechts één parameter gewijzigd. Nagegaan wordt wat het effect is van deze wijziging op de totale logistieke kost en op het aantal ingezette transportalternatieven. Vervolgens wordt een volgorde van belang opgesteld die bepaalt welke parameters de meeste invloed hebben op de totale logistieke kost. Het opstellen van dergelijke rangschikking wordt gedaan om het tweede deel van het onderzoek te vereenvoudigen.

In het tweede deel van het onderzoek worden meerdere parameters gewijzigd om het effect op de totale logistieke kost en op het aantal ingezette transportmiddelen te bekijken. Niet alle combinaties van variabelen worden nagegaan. Dit zou te omslachtig zijn. Enkel die parameters die de meeste invloed uitoefenen op het resultaat worden in beschouwing genomen. Bij een combinatie van wijzigingen, kunnen interacties tussen de variabelen optreden. Een wijziging van meerdere variabelen tegelijkertijd kan een invloed uitoefenen op de totale logistieke kost en op de ingezette transportalternatieven, terwijl een wijziging in slechts één van de variabelen geen invloed heeft. Ook deze mogelijke interacties worden in dit hoofdstuk bekeken.

5.2 Deel 1: Wijziging van één variabele

5.2.1 Experimenteel opzet

In het onderzoek worden vijf transportalternatieven met elkaar vergeleken. Het gaat om twee vrachtwagens en drie binnenvaartschepen. Beurtelings wordt één parameter van de verschillende transportmiddelen gewijzigd. De parameters van deze vervoerswijzen zijn terug te vinden in tabel 6. In het onderzoek wordt de waarde van de transportkost, de gemiddelde levertermijn en de variantie van de levertermijn van elk van de vijf transportalternatieven gewijzigd. Aangezien het niet logisch is dat de capaciteit van bijvoorbeeld een vrachtwagen

met een bepaald percentage toe- of afneemt, wordt deze variabele buiten beschouwing gelaten. Geopteerd wordt om de variabelen telkens met 20% te doen toe- of afnemen. Dit resulteert in volgende cijfers (tabel 7).

Tabel 7: Wijziging van de parameters

	Wijziging	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
TA 1	+ 20%	180	2,4	0,48
	- 20%	120	1,6	0,32
TA 2	+ 20%	300	2,4	0,48
	- 20%	200	1,6	0,32
TA 3	+ 20%	3.240	7,2	1,2
	- 20%	2.160	4,8	0,8
TA 4	+ 20%	5.760	7,2	1,2
	- 20%	3.840	4,8	0,8
TA 5	+ 20%	8.400	7,2	1,2
	- 20%	5.600	4,8	0,8

Bron: Eigen verwerking

Aangezien de drie parameters voor de vijf verschillende vervoerswijzen zowel toe- als afnemen, resulteert dit in 30 experimentele punten. De parameterwaarden van deze experimentele punten worden weergegeven in bijlage 3. Deze 30 experimentele punten worden aan de hand van het programma verwerkt. Op deze manier worden 30 nieuwe oplossingen gegenereerd. Om een statistische analyse mogelijk te maken, wordt de uitvoering van het algoritme een vijftal keer herhaald. Vervolgens wordt bepaald of de verschillen tussen de resultaten van de verschillende herhalingen ten opzichte van de oorspronkelijke oplossing statistisch significant zijn. Dit gebeurt aan de hand van een *t*-test.

Wanneer uit de *t*-test blijkt dat er een aantal resultaten statistisch significant zijn, betekent dit dat deze oplossingen niet op toeval berusten. De parameters die de statistisch significante

resultaten teweeg brengen, zullen bijgevolg een belangrijk invloed hebben op de totale logistieke kost.

5.2.2 Runtime

De runtime wordt gedefinieerd als de tijd dat het programma nodig heeft om de verschillende experimenten uit te voeren. De runtime vormt een belangrijke prestatie maatstaf voor het algoritme. Deze prestatie maatstaf wordt beïnvloed door het aantal generaties, de populatiegrootte en de variabele die het algoritme doet stoppen indien na 100 opeenvolgende generaties geen verbetering is gevonden. Het aantal generaties en de populatiegrootte worden op voorhand vastgelegd. De waarde van de variabele die het algoritme doet stoppen indien na 100 opeenvolgende generaties geen verbetering is gevonden, wordt tijdens de uitvoering van het programma bepaald en kan bijgevolg niet op voorhand voorspeld worden.

Om een statistische analyse te kunnen maken, wordt het programma vijf keer uitgevoerd. De runtimes van deze vijf uitvoeringen zijn weergegeven in bijlage 4. Het totaal en het gemiddelde van de runtimes zijn terug te vinden in onderstaande tabel (tabel 8).

Tabel 8: Runtime van het eerste deel van het onderzoek (seconden)

Runtime	Totaal	Gemiddelde per replicatie	Gemiddelde per experiment
1^e replicatie	5,670	///	0,189
2^e replicatie	4,822	///	0,161
3^e replicatie	7,719	///	0,257
4^e replicatie	7,578	///	0,253
5^e replicatie	8,375	///	0,279
Totaal	34,164	6,833	0,228

Bron: Eigen verwerking

De totale runtime van een replicatie wordt gedefinieerd als de som van de individuele runtimes van de 30 experimenten die per replicatie uitgevoerd worden. Het totaal geeft per replicatie aan hoelang het duurt om de 30 experimenten te verwerken. Het programma heeft bijvoorbeeld 5,670 seconden nodig om de eerste replicatie van 30 experimenten uit te voeren. De totale runtime bedraagt 34,164 seconden en wordt bepaald door de som te maken van de runtimes van de vijf uitvoeringen. De totale runtime vormt een indicatie van de tijd die het programma nodig heeft om de verschillende replicaties uit te voeren. Elke replicatie duurt gemiddeld 6,833 seconden. Het gemiddelde per experiment is 0,228 seconden en geeft aan hoeveel tijd het programma nodig heeft om een experiment te verwerken.

5.2.3 Statistische analyse van de resultaten

5.2.3.1 Statistische analyse

De resultaten van de verschillende herhalingen van het programma zijn terug te vinden in bijlage 4. Om te bepalen of de totale logistieke kosten significant verschillen van de oorspronkelijke totale logistieke kost, wordt een *t*-toets uitgevoerd. De toetsingsgrootte of de *t*-waarde van een *t*-toets wordt gedefinieerd als:

$$TG = \frac{\bar{x} - \mu_0}{S / \sqrt{n}} \quad (10)$$

Met	TG	= Toetsingsgrootte
	\bar{x}	= Gemiddelde van de totale logistieke kosten
	μ_0	= Populatiegemiddelde
	S	= Standaarddeviatie
	n	= Aantal herhalingen

De test op statistische significantie gebeurt aan de hand van volgende hypothesen:

$$H_0: \mu_0 = 424634,76 \text{ €}$$

$$H_1: \mu_0 \neq 424634,76 \text{ €}$$

In deze hypothesen heeft μ_0 de betekenis van totale logistieke kost. Er wordt voorlopig aangenomen dat de nulhypothese waar is. Dit wil zeggen dat het programma een totale logistieke kost zal genereren van 424634,76 €, onafhankelijk van de inputgegevens. Wanneer de nulhypothese echter verworpen wordt, betekent dit dat de totale logistieke kost wijzigt indien de inputgegevens wijzigen. Deze wijziging in de totale logistieke kost kan zowel in positieve als in negatieve zin gebeuren. Indien de alternatieve hypothese aanvaard wordt, is het verschil tussen de oorspronkelijke totale logistieke kost en de nieuwe statistisch significant. Dit wil zeggen dat de wijziging in de totale logistieke kost niet op toeval berust. Aangezien de hypothesen een '='- en '≠'-teken bevatten, gaat het om een tweezijdige *t*-toets.

De berekening van de *t*-waarden voor de verschillende uitvoeringen van het programma, is terug te vinden in bijlage 5. Uit de tabel van de *t*-verdeling, die terug te vinden is in bijlage 6, kunnen de waarden van $-t_{\alpha/2}$ en $t_{\alpha/2}$ gehaald worden. Wanneer uitgegaan wordt van een significantieniveau van 95%, zijn de waarden van $-t_{0,025}$ en $t_{0,025}$ respectievelijk -2,776 en 2,776.

Tabel 9 toont vervolgens welke resultaten statistisch significant zijn en welke niet op basis van bovenstaande verwerpingregels en op basis van een significantieniveau van 95%. De nummering van de data komt overeen met de nummering van de 30 experimentele punten.

Tabel 9: Statistische analyse van de resultaten van het eerste deel van het onderzoek

Data	t-waarde	$t < -2,776$ of $t > 2,776$?	Statistisch significant?	Data	t-waarde	$t < -2,776$ of $t > 2,776$?	Statistisch significant?
1	2,674	Nee	Nee	16	3,079	Ja	Ja
2	22,164	Ja	Ja	17	3,246	Ja	Ja
3	1,432	Nee	Nee	18	4,903	Ja	Ja
4	3,322	Ja	Ja	19	6,660	Ja	Ja
5	15,539	Ja	Ja	20	-8,357	Ja	Ja
6	2,796	Ja	Ja	21	1,970	Nee	Nee
7	-81,099	Ja	Ja	22	2,149	Nee	Nee
8	-1,211	Nee	Nee	23	1,850	Nee	Nee
9	-13,506	Ja	Ja	24	5,249	Ja	Ja
10	-21,623	Ja	Ja	25	5,158	Ja	Ja
11	0,850	Nee	Nee	26	1,633	Nee	Nee
12	7,800	Ja	Ja	27	2,766	Nee	Nee
13	1,500	Nee	Nee	28	2,144	Nee	Nee
14	6,790	Ja	Ja	29	2,795	Ja	Ja
15	12,771	Ja	Ja	30	-2,001	Nee	Nee

Bron: Eigen verwerking

Uit bovenstaande tabel blijkt dat in 18 van de 30 experimenten het verschil tussen de oorspronkelijke totale logistieke kost van 424634,76 € en de nieuwe totale logistieke kost statistisch significant is en dat de nulhypothese verworpen wordt.

5.2.3.2 Resultaten

De gegenereerde resultaten worden in deze paragraaf verder besproken.

a) Wijziging van de transportkosten

Een wijziging in de transportkost heeft een belangrijke invloed op de resultaten. Zeven van de 10 oplossingen zijn statistisch significant bij een significantieniveau van 95%. Dit betekent dat een wijziging van de transportkost in de meeste gevallen een invloed heeft op de totale logistieke kost.

Een toename van de transportkost van de vrachtwagen met een capaciteit van 10 ton zal geen statistisch significante totale logistieke kost opleveren. Dit geldt eveneens voor zowel een toename als een afname van de transportkost van het binnenvaartschip met een capaciteit van 300 ton.

De gegenereerde resultaten zijn statistisch significant bij een toename van de transportkost van een vrachtwagen met een capaciteit van 25 ton of een binnenvaartschip met een capaciteit van 100 ton of 600 ton. Bij een afname van de transportkost van een vrachtwagen van 10 ton of 25 ton of een binnenvaartschip van 600 ton of 1000 ton, zijn de oplossingen eveneens statistisch significant. Indien de transportkost toeneemt, zal de totale logistieke kost toenemen. Een afname van de transportkost zorgt voor een afname van de totale logistieke kost. Deze resultaten kwamen eveneens naar voren in de literatuur.

b) Wijziging van de gemiddelde levertermijn

Een wijziging van de gemiddelde levertermijn heeft eveneens een belangrijke invloed op de totale logistieke kost. Acht van de 10 oplossingen zijn statistisch significant bij een significantieniveau van 95%.

Indien de gemiddelde levertermijn van een vrachtwagen met een capaciteit van 10 ton of een binnenvaartschip met een capaciteit van 300 ton toeneemt, zal de totale logistieke kost niet statistisch verschillen van de oorspronkelijke kost van 424634,76 €.

Een daling van de gemiddelde levertermijn, ongeacht de capaciteit van het transportalternatief, zorgt er voor dat de totale logistieke kost statistisch significant verschilt van de oorspronkelijke kost. Bij een toename van de gemiddelde levertermijn van een vrachtwagen met een capaciteit van 25 ton of een binnenvaartschip met een capaciteit van 600 ton of 1000 ton, zullen de gegenereerde oplossingen eveneens statistisch significant zijn. De totale logistieke kost zal telkens toenemen, behalve indien de gemiddelde levertermijn van een binnenvaartschip met een capaciteit van 100 ton afneemt.

Een toename van de totale logistieke kost indien de gemiddelde levertermijn toeneemt, is vrij logisch. De levertermijn heeft een invloed op de cyclische voorraad, de voorraad tijdens het vervoer en de veiligheidsvoorraad. Indien de gemiddelde levertermijn toeneemt, stijgt de gemiddelde tijd tussen twee verzendingen waardoor de cyclische voorraad en de hiermee gepaard gaande kosten toenemen. Een toename van de gemiddelde levertermijn heeft een rechtstreekse invloed op de voorraadkosten tijdens het vervoer. Hoe langer het duurt om een verzending te volbrengen, hoe meer voorraad er ontstaat tijdens het vervoer en hoe hoger de kosten van deze voorraad zullen zijn. Ten slotte beïnvloedt de levertermijn de veiligheidsvoorraad. Een stijging van de gemiddelde levertermijn doet de standaardafwijking van de vraag gedurende de levertermijn toenemen, waardoor de kosten van de veiligheidsvoorraad toenemen. Bij een toename van deze drie voorraadkosten, zal de totale logistieke kost eveneens verhogen. De bevindingen uit het onderzoek komen bijgevolg overeen met de literatuur in het geval van een toename van de gemiddelde levertermijn.

Bij een daling van de gemiddelde levertermijn ligt dit anders. Uit het onderzoek blijkt dat slechts in één geval de totale logistieke kost afneemt bij een afname van de levertermijn. In alle andere gevallen neemt de totale logistieke kost toe wat niet overeenkomt met de besluiten uit de literatuur.

c) Wijziging van de variantie van de levertermijn

Indien de variantie in de levertermijn wijzigt, heeft dit zeer weinig invloed op de totale logistieke kosten. In slechts 3 van de 10 gevallen is het verschil met de oorspronkelijke logistieke kost statistisch significant bij een significantieniveau van 95%.

Bij een significantieniveau van 95% bestaat er een significant verschil tussen de oorspronkelijke en de nieuwe totale logistieke kost in het geval van een vermeerdering van de variantie van de gemiddelde levertermijn van een binnenvaartschip met een capaciteit van 1000 ton. Deze statistisch significante relatie bestaat eveneens in het geval van zowel een toename als een afname van de variantie van een binnenvaartschip met een capaciteit van 600 ton.

Indien de variantie van de levertermijn toeneemt, zal de totale logistieke kost toenemen en omgekeerd. Deze resultaten komen bijgevolg overeen met de resultaten uit de literatuur. De variantie van de levertermijn beïnvloedt de standaardafwijking van de vraag tijdens de levertermijn die op zijn beurt een invloed heeft op de veiligheidsvoorraad. Indien de variantie toeneemt, nemen de kosten van de veiligheidsvoorraad toe, waardoor eveneens de totale logistieke kosten vermeerderen. Een afname van de variantie zorgt er voor dat de totale logistieke kosten afnemen.

d) Ingezette transportalternatieven

Een wijziging in de parameters heeft eveneens een invloed op de transportalternatieven die ingezet worden. In het onderzoek worden vijf transportmiddelen met elkaar vergeleken. Het gaat om twee vrachtwagens waarvan de ene een capaciteit van 10 ton heeft en de andere 25 ton kan vervoeren. Verder zijn er drie binnenvaartschepen beschikbaar met een capaciteit van 300 ton, 600 ton en 1000 ton. De initiële oplossing bepaalt dat beide vrachtwagens en een binnenvaartschip met een capaciteit van 1000 ton ingezet worden. Deze oplossing wordt aangeduid met de vector $\langle 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \rangle$. In bijlage 4 worden de ingezette transportalternatieven

van alle oplossingen getoond. In tabel 10 worden de ingezette transportalternatieven weergegeven voor de oplossingen die statistisch significant zijn.

Tabel 10: Ingezette transportalternatieven

Data	Replicatie 1	Replicatie 2	Replicatie 3	Replicatie 4	Replicatie 5
2	<0 0 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<1 2 0 0 1>
4	<0 0 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<3 1 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<1 1 0 0 1>
5	<1 2 0 1 0>	<1 3 0 1 0>	<1 1 0 1 0>	<0 2 0 0 0>	<0 1 0 1 0>
6	<0 0 0 0 1>	<1 1 0 0 1>	<1 4 0 0 1>	<3 1 0 0 1>	<1 3 0 0 1>
7	<0 2 2 0 0 0>	<0 2 1 0 0 0>	<0 2 1 0 0 0>	<0 2 0 0 0 0>	<0 2 3 0 0 0>
9	<1 2 0 1 0>	<1 1 0 1 0>	<0 1 0 1 0>	<0 1 0 1 0>	<1 1 0 1 0>
10	<1 1 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<2 3 0 0 1>
12	<1 2 0 0 1>	<1 3 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<2 2 0 0 1>
14	<2 4 0 0 1>	<1 3 0 0 1>	<1 3 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<2 2 0 0 1>
15	<2 1 0 0 1>	<1 1 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<1 1 0 0 1>	<1 3 0 0 1>
16	<0 0 0 0 1>	<1 1 0 0 1>	<1 5 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<1 1 0 0 1>
17	<1 1 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<2 2 0 0 1>
18	<0 0 0 0 1>	<2 3 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<1 2 0 0 1>
19	<0 0 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<1 3 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<2 3 0 0 1>
20	<1 1 0 0 1>	<1 1 0 0 1>	<1 1 0 0 1>	<3 1 0 0 1>	<0 0 0 0 1>
24	<0 0 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<2 1 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<0 0 0 0 1>
25	<1 1 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<1 1 0 0 1>	<1 3 0 0 1>
29	<1 1 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<1 2 0 0 1>	<0 0 0 0 1>	<1 2 0 0 1>

Bron: Eigen verwerking

Uit de tabel blijkt dat het aantal en de soort ingezette transportalternatieven heel erg kan verschillen. De vijf replicaties geven telkens andere resultaten voor de verschillende inputgegevens. In de meeste gevallen wordt geopteerd om een mix van transportalternatieven in te zetten. Deze vaststelling komt overeen met wat Dullaert et al. beweren. Zij bepaalden de optimale mix van transportalternatieven met dezelfde gegevens. Ze deden dit echter voor

verschillende waarden van goederen. De beste manier om goederen met een lage of hoge waarden te vervoeren, gebeurt niet door een mix van transportalternatieven in te zetten. Voor goederen met een lage waarde bestaat de beste strategie erin om enkel een groot binnenschip in te zetten. Goederen met een hoge waarde worden het best vervoerd met een vrachtwagen met een capaciteit van 25 ton (Dullaert et al., 2005a, p. 206).

In dit praktijkonderzoek wordt uitgegaan van goederen met een waarde van 500 euro. Deze waarde komt overeen met de waarde die Dullaert et al. plakken op goederen met een medium waarde. Voor deze goederen vormt de beste oplossing wel een mix van transportalternatieven (Dullaert et al., 2005a, p. 206). Bijgevolg komen de besluiten uit het onderzoek overeen met deze uit het onderzoek van Dullaert et al.

Verder blijkt uit de literatuur dat trage transportmiddelen met een grote capaciteit ingezet moeten worden om de transportkost te minimaliseren. Deze veronderstelling komt in een aantal gevallen naar voren in het onderzoek. Bij een toename van de transportkost van een vervoerwijze van 25 ton, wordt in de eerste replicatie een binnenvaartschip ingezet om het vervoer uit te voeren. Om de hogere transportkosten te drukken wordt bijgevolg een traag transportalternatief ingezet met een grote capaciteit.

Indien de voorraadkosten dienen geminimaliseerd te worden, is het belangrijk om een snel transportmiddel met een kleinere capaciteit in te zetten. Ook dit wordt in het onderzoek aangetoond. Bij een toename van de gemiddelde levertermijn van een transportalternatief van 25 ton bijvoorbeeld, wordt in de eerste replicatie toch geopteerd om dit alternatief in te zetten. Het blijkt voordeliger te zijn om een snelle vervoerwijze in te zetten met een kleine capaciteit, ook al zullen de voorraadkosten door de toename van de gemiddelde levertermijn toenemen.

e) Volgorde van belang

Aan de hand van de t -waarden kan een volgorde opgesteld worden die de invloeden van de verschillende wijzigingen rangschikken. Deze volgorde is van belang voor het onderzoek met

een wijziging van meerdere parameters. Meer hierover volgt in paragraaf 5.3. De wijziging die de grootste afwijking teweegbrengt tussen de berekende t -waarde (zie bijlage 5) en de waarden van $t_{\alpha/2}$ of $-t_{\alpha/2}$ (zie bijlage 6) heeft eveneens de grootste invloed op de totale logistieke kost. De wijzigingen in de variabelen die statistisch een invloed hebben op de totale logistieke kosten, worden in tabel 11 in dalende volgorde gerangschikt.

Tabel 11: Volgorde van belang van de wijzigingen in de variabelen

Plaats	Data	Wijziging
1	7	Afname transportkost van transportalternatief met capaciteit van 25 ton
2	2	Toename transportkost van transportalternatief met capaciteit van 25 ton
3	10	Afname transportkost van transportalternatief met capaciteit van 1000 ton
4	5	Toename transportkost van transportalternatief met capaciteit van 1000 ton
5	9	Afname transportkost van transportalternatief met capaciteit van 600 ton
6	15	Toename gemiddelde LT van transportalternatief met capaciteit van 1000 ton
7	20	Afname gemiddelde LT van transportalternatief met capaciteit van 1000 ton
8	12	Toename gemiddelde LT van transportalternatief met capaciteit van 25 ton
9	14	Toename gemiddelde LT van transportalternatief met capaciteit van 600 ton
10	19	Afname gemiddelde LT van transportalternatief met capaciteit van 600 ton
11	24	Toename variantie LT van transportalternatief met capaciteit van 600 ton
12	25	Toename variantie LT van transportalternatief met capaciteit van 1000 ton
13	18	Afname gemiddelde LT van transportalternatief met capaciteit van 300 ton
14	4	Toename transportkost van transportalternatief met capaciteit van 600 ton
15	17	Afname gemiddelde LT van transportalternatief met capaciteit van 25 ton
16	16	Afname gemiddelde LT van transportalternatief met capaciteit van 10 ton
17	29	Afname variantie LT van transportalternatief met capaciteit van 600 ton
18	6	Afname transportkost van transportalternatief met capaciteit van 10 ton

Bron: Eigen verwerking

Uit de tabel blijkt dat de transportkost de grootste invloed heeft op de totale logistieke kost. Deze variabele neemt de eerste vijf plaatsen in in de rangschikking. Het betreft zowel een toe-

als een afname van de transportkost van een vervoerwijze van 25 ton en 1000 ton en een toename van de transportkost bij een capaciteit van 600 ton. Op de volgende vijf plaatsen staat de gemiddelde levertermijn. Ook deze parameter heeft een invloed op de totale logistieke kost, doch in mindere mate dan de transportkost. De belangrijkste wijzigingen in de gemiddelde levertermijn zijn een toename van de levertermijn bij een capaciteit van 1000 ton, 25 ton en 600 ton en een afname van de levertermijn van een transportmiddel van 1000 ton en 600 ton. Vervolgens heeft de variantie van de levertermijn een invloed op de totale logistieke kost. De invloed van een toename van de variantie is het grootst bij een binnenvaartschip van 600 ton, gevolgd door een binnenvaartschip van 1000 ton. De laatste plaatsen in de rangschikking worden door wijzigingen in de drie variabelen ingenomen.

5.2.4 Conclusies

De transportkost vormt de belangrijkste variabele die een invloed heeft op de totale logistieke kost. Zowel een toename als een afname van deze variabele zorgt ervoor dat de totale logistieke kost wijzigt. De gemiddelde levertermijn is eveneens een variabele waarmee rekening gehouden moet worden bij de keuze voor één of meerdere transportalternatieven. Deze besluiten komen overeen met wat in de literatuur terug te vinden is. Wat betreft de variantie van de levertermijn, blijkt uit het onderzoek dat het in mindere mate een invloed heeft op de totale logistieke kost. Wanneer een wijziging in de variantie leidt tot een statistisch significant verschil, blijkt de wijziging in de totale logistieke kost overeen te komen met de resultaten uit de literatuur.

5.3 Deel 2: Wijziging van meerdere variabelen

5.3.1 Experimenteel opzet

Het onderzoek met meerdere variabelen gaat de invloeden van wijzigingen in een aantal parameters tegelijkertijd na. Welke parameters gewijzigd worden, wordt bepaald naargelang

de statistisch significantie die ze vertonen in het onderzoek met een wijziging van slechts één factor. In de vorige paragraaf werd een rangschikking van belang opgesteld die aanduidt welke wijziging in variabelen de meeste invloed heeft op de totale logistieke kost. Uit de top tien van deze volgorde blijkt dat vier variabelen zowel bij een toename als een afname een significante invloed hebben op de totale logistieke kost. Het betreft de transportkost van een transportalternatief van 25 ton en van 1000 ton en de gemiddelde levertermijn bij een transportmiddel van 600 ton en 1000 ton. In dit onderzoek worden de invloeden van deze vier variabelen tezamen bekeken door ze te laten toe- en afnemen met 20%. Dit resulteert in 16 combinaties (tabel 12). In deze tabel wordt een minteken gegeven aan een afname van een bepaalde variabele. Een plusteken staat voor een toename in de variabele. De 16 combinaties worden genummerd van 31 tot en met 46 zodat de nummering van de experimentele punten verder gezet kan worden en geen verwarring ontstaat met de experimentele punten uit het eerste deel van het onderzoek.

Tabel 12: Combinaties van wijzigingen van de variabelen

Data	TK 25 ton	TK 1000 ton	Gemiddelde LT 600 ton	Gemiddelde LT 1000 ton
31	+	+	+	+
32	-	+	+	+
33	+	-	+	+
34	-	-	+	+
35	+	+	-	+
36	-	+	-	+
37	+	-	-	+
38	-	-	-	+
39	+	+	+	-
40	-	+	+	-
41	+	-	+	-
42	-	-	+	-
43	+	+	-	-
44	-	+	-	-
45	+	-	-	-
46	-	-	-	-

Bron: Eigen verwerking

In de tabel staat TK voor transportkost en LT voor levertermijn. De parameterwaarden van deze 16 experimentele punten worden in bijlage 7 weergegeven. Opnieuw verwerkt het programma deze 16 nieuwe experimentele punten waardoor 16 nieuwe oplossingen ontstaan. De verwerking van deze 16 punten wordt vijf keer herhaald zodat een statistische analyse mogelijk wordt. Vervolgens worden de hoofd- en interactie-effecten berekend. Door de hoofdeffecten te berekenen, wordt de invloed van een bepaalde variabele op de totale logistieke kost gemeten. Interactie-effecten bepalen of de invloed van een bepaalde variabele afhankelijk is van een andere variabele. De hoofd- en interactie-effecten worden ten slotte getest op statistische significantie.

5.3.2 Runtime

De runtimes voor de experimenten uit het tweede deel van het onderzoek worden in bijlage 8 weergegeven. In onderstaande tabel (tabel 13) worden het totaal en het gemiddelde van de runtimes aangeduid.

Tabel 13: Runtime van het tweede deel van het onderzoek (seconden)

Runtime	Totaal	Gemiddelde per replicatie	Gemiddelde per experiment
1^e replicatie	4,015	///	0,251
2^e replicatie	3,936	///	0,246
3^e replicatie	4,766	///	0,298
4^e replicatie	4,374	///	0,273
5^e replicatie	4,222	///	0,264
Totaal	21,313	4,263	0,266

Bron: Eigen verwerking

De totale runtime van een replicatie geeft aan hoeveel tijd het programma nodig heeft om de 16 experimenten te verwerken. De eerste replicatie neemt bijvoorbeeld 4,015 seconden in beslag. De totale runtime van de vijf replicaties geeft weer dat het programma 21,313 seconden nodig heeft om de 16 experimenten vijf keer te verwerken. De duur van een replicatie bedraagt gemiddeld 4,263 seconden, terwijl de verwerking van een experiment gemiddeld 0,266 seconden in beslag neemt.

5.3.3 Statistische analyse van de resultaten

5.3.3.1 Statistische analyse

De resultaten van de verschillende replicaties van het tweede deel van het onderzoek worden in bijlage 8 weergegeven. Om de invloeden van de verschillende variabelen op de totale

logistieke kost na te gaan, worden de hoofd- en interactie-effecten berekend. Ten eerste wordt een design matrix opgesteld. Deze matrix is in bijlage 9 weergegeven. In deze matrix worden eveneens de resultaten per replicatie weergegeven, die de totale logistieke kost aanduiden bij een wijziging van de variabelen.

Vervolgens worden de hoofdeffecten berekend. Een hoofdeffect van een bepaalde variabele wordt gedefinieerd als de gemiddelde wijziging in de resultaten doordat de variabele van het “-“-niveau naar het “+“-niveau beweegt, terwijl de andere variabelen constant blijven. Het hoofdeffect van een variabele i wordt aangeduid als e_i . Voor de eerste replicatie wordt de berekening van de hoofdeffecten van de vier variabelen in bijlage 10 ter illustratie weergegeven. De resultaten van de andere replicaties zijn in bijlage 11 terug te vinden. Het hoofdeffect wordt berekend door het teken van de variabele te vermenigvuldigen met het bijhorende resultaat en deze op te tellen en vervolgens te delen door 2^{k-1} (waarbij k staat voor het aantal factoren of variabelen). Uit bijlage 10 blijkt dat het hoofdeffect van de transportkost van een transportalternatief van 25 ton in de eerste replicatie 32869,163 € bedraagt. Dit betekent dat een toename van de transportkost van het transportalternatief van 25 ton er voor zorgt dat de totale logistieke kost met 32.869,13 € toeneemt.

In een derde stap worden de interactie-effecten berekend. De interacties tussen twee, drie en vier variabelen kunnen berekend worden. Deze berekeningen zijn eveneens terug te vinden in bijlage 10 voor de eerste replicatie. In bijlage 11 worden de resultaten van de overige replicaties weergegeven. Een interactie-effect bedraagt de helft van het verschil tussen het gemiddelde effect van factor j indien factor i op zijn “+“-niveau is enerzijds en het gemiddelde effect van factor j indien factor i op zijn “-“-niveau is anderzijds. Een interactie-effect tussen twee variabelen i en j wordt aangeduid als e_{ij} . Het effect tussen drie variabelen i , j en k wordt weergegeven aan de hand van e_{ijk} . e_{ijkl} ten slotte duidt het interactie-effect aan tussen de variabelen i , j , k en l . Een alternatieve wijze voor de berekening van een interactie-effect is de volgende. De tekens van de variabelen waarvan het interactie-effect moet berekend worden, worden met elkaar vermenigvuldigd zodat een bijkomende kolom gecreëerd wordt. De resultaten worden vervolgens vermenigvuldigd met de tekens uit deze extra kolom. Door deze producten te delen door 2^{k-1} , wordt het interactie-effect berekend. Het

interactie-effect van de wijzigingen in de transportkosten bijvoorbeeld bedraagt 29029,188 €. De interactie tussen de transportkosten is bijgevolg positief. Dit houdt in dat een lagere totale logistieke kost wordt geobserveerd door de transportkosten van de transportalternatieven van 25 ton en 1000 ton in tegengestelde richting te wijzigen.

Een laatste stap in dit onderzoek gaat na of de hoofd- en interactie-effecten statistisch significant zijn met behulp van een t -test. Hiervoor wordt eveneens formule (10) gehanteerd.

De test op statistisch significantie gebeurt aan de hand van volgende hypothesen:

$$H_0: \mu_0 = 0$$

$$H_1: \mu_0 \neq 0$$

In deze hypothesen staat μ_0 voor het effect van een variabele op de totale logistieke kost. Voorlopig wordt aangenomen dat de nulhypothese waar is. Dit wil zeggen dat de variabelen geen invloed zullen hebben op de totale logistieke kost. Indien de alternatieve hypothese aanvaard wordt, zijn de effecten van de variabelen op de totale logistieke kost statistisch significant. Dit wil zeggen dat de wijziging in de totale logistieke kost niet op toeval berust. Ook in dit onderzoek gaat het om een tweezijdige t -toets.

De berekening van de t -waarden voor de verschillende uitvoeringen van het programma, is terug te vinden in bijlage 11. Uit de tabel van de t -verdeling, die terug te vinden is in bijlage 6, kunnen de waarden van $-t_{\alpha/2}$ en $t_{\alpha/2}$ gehaald worden. Wanneer uitgegaan wordt van een significantieniveau van 95%, zijn de waarden van $-t_{0,025}$ en $t_{0,025}$ respectievelijk -2,776 en 2,776.

Tabel 14 toont vervolgens welke effecten statistisch significant zijn en welke niet op basis van bovenstaande verwerpingregels en op basis van een significantieniveau van 95%.

Tabel 14: Statistische analyse van de resultaten van het tweede deel van het onderzoek

Data	t-waarde	t < -2,776 of t > 2,776?	Statistisch significant?
e1	54,838	Ja	Ja
e2	96,434	Ja	Ja
e3	6,785	Ja	Ja
e4	29,952	Ja	Ja
e12	47,616	Ja	Ja
e13	12,538	Ja	Ja
e14	3,665	Ja	Ja
e23	14,172	Ja	Ja
e24	-18,785	Ja	Ja
e34	1,351	Nee	Nee
e123	7,520	Ja	Ja
e124	-1,534	Nee	Nee
e134	2,670	Nee	Nee
e234	2,686	Nee	Nee
e1234	3,321	Ja	Ja

Bron: Eigen verwerking

Uit de tabel blijkt dat alle hoofdeffecten statistisch significant zijn. Ook alle tweefactor interactie-effecten hebben een statistisch significante invloed, behalve het interactie-effect van de levertermijnen van 600 ton en 1000 ton. Het enige driefactor interactie-effect dat statistisch significant is, is het effect van de transportkosten van 25 ton en van 1000 ton en de gemiddelde levertermijn van 600 ton. Het interactie-effect van de vier variabelen tegelijkertijd is eveneens statistisch significant.

5.3.3.2 Resultaten

In deze paragraaf worden de hoofd- en interactie-effecten besproken die een statistisch significante invloed vertonen op de totale logistieke kost.

a) Hoofdeffecten

De hoofdeffecten van de vier variabelen blijken allen statistisch significant te zijn. Dit betekent dat de variabelen een duidelijke invloed hebben op de totale logistieke kost. Verder blijkt dat de hoofdeffecten positief zijn voor de vier variabelen. Dit houdt in dat een afname van elke variabele een afname van de totale logistieke kost tot gevolg heeft. Deze resultaten komen overeen met het eerste deel van het onderzoek en met de literatuurstudie.

b) Tweefactor interactie-effecten

De tweefactor interactie-effecten hebben eveneens een statistisch significante invloed behalve het interactie-effect tussen de twee levertermijnen. Bijgevolg wordt niet bewezen dat de levertermijnen van de transportalternatieven van 600 ton en 1000 ton tezamen een effect hebben op de totale logistieke kost. Zoals blijkt uit bijlage 11 verandert het interactie-effect per replicatie van teken. Het is bijgevolg niet duidelijk of de levertermijnen interageren met elkaar. De andere tweefactor interactie-effecten zijn wel statistisch significant.

De interactie tussen de twee transportkosten is positief. Lagere totale logistieke kosten zullen optreden indien de twee transportkosten samen op het “-“-niveau liggen. Dit wordt bereikt indien de transportkosten in tegengestelde richting gewijzigd worden. Indien de transportkost bij 1000 ton afneemt en de transportkost bij 25 ton toeneemt, neemt de totale logistieke kost af. Deze redenering is logisch aangezien de transportkost bij 1000 ton hoger is dan deze van 25 ton. De afname in de kost bij 1000 ton is belangrijker dan de kosttoename bij 25 ton. Indien echter de transportkost bij 1000 ton toeneemt en de transportkost bij 25 ton afneemt, neemt de totale logistieke kost eveneens af. Dit lijkt niet logisch aangezien de transportkost bij 1000 ton veel hoger is dan deze bij 25 ton. Toch blijkt de toename minder erg door te wegen.

Dezelfde positieve interacties treden op tussen de transportkost van een transportalternatief van 25 ton en de levertermijn bij 600 ton, tussen de transportkost bij 25 ton en de levertermijn

bij 1000 ton en tussen de transportkost bij 1000 ton en de levertermijn bij 600 ton. De totale logistieke kost neemt af indien de variabelen in tegengestelde richting wijzigen. In deze drie gevallen moet de ene variabele toenemen (afnemen) en de andere afnemen (toenemen) opdat de totale logistieke kost afneemt. De afname in de ene variabele zorgt er voor dat de afname in de totale logistieke kost groter is dan de toename in deze kost door een toename in de andere variabele.

De interactie tussen de transportkost en de levertermijn bij 1000 ton is negatief. Dit heeft tot gevolg dat de totale logistieke kosten dalen indien de transportkost en de levertermijn samen op het “+”-niveau liggen en bijgevolg in dezelfde richting wijzigen. Een afname van de transportkost en van de levertermijn van een transportalternatief van 1000 ton doet de totale logistieke kost dalen. Dit is een logische redenering. Indien echter beide variabelen toenemen, neemt de totale logistieke kost eveneens af. Dit lijkt niet logisch aangezien een toename van één van de variabelen zorgt voor een toename van de totale logistieke kost terwijl de gelijktijdige toename van beide variabelen een daling van de totale logistieke kost tot gevolg heeft.

c) Driefactor interactie-effecten

Vervolgens worden de driefactor interactie-effecten nagegaan. Het enige effect dat statistisch significant is, is de interactie tussen de transportkost bij een capaciteit van 25 ton, de transportkost bij een capaciteit van 1000 ton en de levertermijn bij een capaciteit van 600 ton. De interactie tussen deze drie variabelen is positief. Bijgevolg moet het effect van de drie variabelen samen op het “-“-niveau liggen opdat de totale logistieke kost afneemt. Dit is het geval indien één van de drie variabelen op het “-“-niveau ligt en dus afnemen en indien ze alle drie op het “-“-niveau liggen. Indien de transportkost bij 25 ton afneemt en de transportkost bij 1000 ton en de levertermijn bij 600 ton toenemen, zal de totale logistieke kost dalen. Een afname van de transportkost bij 25 ton zal een grotere invloed hebben op de totale logistieke kost dan de toename in de transportkost bij 1000 ton en de gemiddelde levertermijn van 600 ton. Hetzelfde geldt voor een toename van de transportkost van 25 ton en de levertermijn van

600 ton en een afname van de transportkost bij 1000 ton. Deze afname zal eveneens een grotere invloed hebben op de totale logistieke kost dan de toenames in de twee andere variabelen. De totale logistieke kost zal toch dalen, ook al nemen twee van de drie variabelen toe. Ook een toename van de twee transportkosten en een afname van de levertermijn bij 600 ton resulteren in een reductie van de totale logistieke kost. Het meest logische resultaat doet zich voor bij een afname van de drie variabelen. In dit geval zal de totale logistieke kost eveneens afnemen. De overig driefactor interactie-effecten zijn niet statistisch significant en worden bijgevolg niet besproken.

d) Vierfactor interactie-effecten

Het vierfactor interactie-effect bekijkt de interactie tussen de vier variabelen en de gezamenlijke invloed op de totale logistieke kost. Uit tabel 14 blijkt dat dit interactie-effect statistisch significant is. Verder blijkt uit bijlage 11 dat dit interactie-effect positief is. De totale logistieke kost zal bijgevolg afnemen indien de vier variabelen tezamen op het “-“-niveau liggen. Dit is het geval indien drie variabelen afnemen en de vierde variabele toeneemt. De daling in de drie variabelen heeft een grotere invloed op de totale logistieke kost dan de toename in de vierde variabele. De totale logistieke kost zal tevens afnemen indien drie variabelen toenemen en de vierde variabele afneemt. Deze redenering is minder logisch. Indien drie van de vier variabelen toenemen, wordt verwacht dat de totale logistieke kost zal toenemen. Toch neemt de totale logistieke kost af doordat de vier variabelen met elkaar interageren. Een voorbeeld kan dit duidelijk maken. Een afname van de transportkost van 25 ton en een toename van de overige drie variabelen, zullen er voor zorgen dat de totale logistieke kost gereduceerd wordt.

5.3.4 Conclusies

Zowel de transportkost bij 25 ton als de transportkost bij 1000 ton hebben een belangrijke invloed op de totale logistieke kost. Hetzelfde geldt voor de levertermijn bij 600 ton en de

levertermijn bij 1000 ton. De meeste variabelen hebben een interactie-effect met een andere variabele.

Wat betreft de tweefactor interacties hebben enkel de levertermijn bij 600 ton en de levertermijn bij 1000 ton geen gezamenlijke significante invloed op de totale logistieke kost. De overige tweefactor interacties zijn daarentegen wel statistisch significant. De transportkost en de levertermijn bij 1000 ton moeten in dezelfde richting wijzigen opdat de totale logistieke kost afneemt. In het geval van de twee transportkosten, de transportkost bij 25 ton en de levertermijn bij 600 ton, de transportkost bij 25 ton en de levertermijn bij 1000 ton, de transportkost bij 1000 ton en de levertermijn bij 600 ton dienen de variabelen in tegengestelde zin te wijzigen zodat de totale logistieke kost gereduceerd wordt.

De driefactor interactie-effecten hebben weinig invloed op de totale logistieke kost. Enkel de interactie tussen de twee transportkosten en de levertermijn bij 600 ton beïnvloeden de totale logistieke kost. De interactie tussen deze drie variabelen is positief. De totale logistieke kost zal afnemen indien één van de drie variabelen afneemt en de andere variabelen toenemen of indien de drie variabelen afnemen.

Ten slotte heeft een wijziging van de vier variabelen tezamen een statistisch significante invloed op de totale logistieke kost. Deze interactie is eveneens positief. De totale logistieke kost wordt gereduceerd indien drie variabelen toenemen terwijl de vierde afneemt of omgekeerd.

Hoofdstuk 6: Algemeen besluit

De bepaling van de optimale mix van transportalternatieven en de minimalisatie van de totale logistiek kost wordt door verschillende factoren beïnvloed. De transportkost blijkt de belangrijkste factor te zijn in dit probleem. Verder moet met de gemiddelde levertermijn rekening gehouden worden om een selectie te maken uit de verschillende transportmiddelen. De variantie in deze gemiddelde levertermijn is minder van belang om het transportkeuzeprobleem op te lossen.

Indien meerdere variabelen tegelijkertijd wijzigen, kunnen interacties tussen deze variabelen optreden. De wijzigingen in meerdere variabelen kan een andere invloed hebben op de totale logistieke kost dan verwacht wordt. Indien bijvoorbeeld de transportkost toeneemt, neemt de totale logistieke kost toe. Indien echter dezelfde variabele toeneemt samen met een afname in een andere variabele, kan dit resulteren in een afname van de totale logistieke kost. Om dit te onderzoeken, worden de transportkosten van een transportalternatief van 25 ton en 1000 ton en de gemiddelde levertermijnen van een transportmiddel van 600 ton en 1000 ton in beschouwing genomen. Deze variabelen hebben zowel bij een toename als een afname een significante invloed op de totale logistieke kost. Uit het onderzoek blijkt dat een wijziging van twee van deze variabelen een significante invloed heeft op de totale logistieke kost. Enkel een gelijktijdige wijziging van de levertermijnen beïnvloedt de totale logistieke kost niet. Hetzelfde geldt voor de meeste driefactor interactie-effecten. Een wijziging van de vier variabelen tezamen speelt dan weer wel een belangrijke rol in het minimaliseren van de totale logistieke kost.

Algemeen kan besloten worden dat het van belang is om bij het transportkeuzeprobleem verschillende parameters in beschouwing te nemen die een invloed kunnen uitoefenen op de totale logistieke kost. Verder is het eveneens belangrijk rekening te houden met wijzigingen in meerdere parameters, omdat deze de totale logistieke kost op een andere manier kan beïnvloeden dan verwacht wordt.

Lijst van de geraadpleegde werken

Internetadressen

<http://www.kuleuven.ac.be/geografie/schoolverlater/onderzoek/thesis2003/bauwens/index.htm> [16 februari 2006]

http://www.chappin.com/docs/spm3910_totaalrapport_definitief.pdf [6 mei 2006]

<http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=2261> [7 april 2006]

<http://www.ethesis.net/intelligentie/AI-Lab.pdf> [21 mei 2006]

<http://www.science.uva.nl/research/pwrs/papers/archive/Dam2002a.pdf> [21 mei 2006]

<http://grid.let.rug.nl/~kleiweg/papers/scriptie.pdf> [21 mei 2006]

http://nl.wikipedia.org/wiki/Genetisch_algorithme [21 mei 2006]

<http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=2261> [23 mei 2006]

<http://ienl.wkkbi.nl/downloads/20020131112627-I12.pdf> [26 mei 2006]

http://www.tmleuven.be/Logistiek/Artikel_200305.pdf [26 mei 2006]

<http://users.ugent.be/~heeckhau/cambrain/Thesistekst.pdf> [29 mei 2006]

Boeken, tijdschriften en papers

Allen, W.B., Mahmoud, M.M. en McNeil, D. (1985), 'The importance of time in transit and reliability of transit time for shippers, receivers and carriers', *Transportation Research Part B*, Vol. 19:5, pp. 447-456

Ballou, R.H., *Logistiek Management*, Schoonhoven (Nederland), Prentice-Hall; Academic Service, 1992, 816 p.

Ballou, R.H., *Business Logistics Management: Planning, Organizing and Controlling the Supply Chain*, Upper Saddle River (New Jersey), Prentice-Hall, 1999, 681 p.

Baumol, W.J. en Vinod, H.D. (1970), 'An inventory theoretic model of freight transport demand', *Management Science*, Vol. 16:7, pp. 413-421

Blauwens, G. (1991), 'De logistieke keuze tussen weg en binnenvaart voor het containervervoer van en naar de zeehavens', *Economisch en Sociaal Tijdschrift* 45 (3), pp. 445-459

Blauwens, G., Janssens, S., Vernimmen, B. en Witlox, F., (2001), 'Modale keuze in het goederenvervoer op basis van een vergelijking van de totale logistieke kostprijs: twee concrete gevalstudies', Research Paper 2001-016, UFSIA-RUCA Faculteit TEW, Universiteit Antwerpen, 34 p.

Blauwens, G., De Baere, P. en Van de Voorde, E., *Vervoerseconomie*, Standaard Uitgeverij, Antwerpen, 2001a, 555p.

Blauwens, G., Janssens, S., Vernimmen, B. en Witlox, F. (2001b), 'De keuze tussen vervoerswijzen op basis van het 'total cost concept': een gevalstudie', *Tijdschrift Vervoerswetenschap/Connexie Magazine*, Vol. 37:3, pp. 28-32

Blauwens, G., Janssens, S., Vernimmen, B. en Witlox, F. (2002a), 'Een logistieke kostenvergelijking tussen het wegvervoer en het gecombineerd vervoer voor het transport van containers vanuit de Antwerpse haven naar het hinterland', in Blauwens, G. en Witlox, F. (ed.), *Multimodaal vervoer: zoektocht naar synergie tussen de modi?*, Garant, Leuven, pp. 59-78

Blauwens, G., Janssens, S., Vernimmen, B. and Witlox, F. (2002b), 'Het belang van frequentie in het gecombineerd vervoer van containers van een zeehaven naar het hinterland', in: Ruijgrok, C.J. and R.H.J. Rodenburg (eds.), *Bijdragen Vervoerslogistieke Werkdagen 2002 – Deel 1*, Delft, Connekt, pp. 41-59

Blauwens, G., Janssens, S., Vernimmen, B. and Witlox, F. (2002c), 'The importance of frequency for combined transport of containers', Research Paper 2002-030, UFSIA-RUCA Faculteit TEW, Universiteit Antwerpen, 21 p.

Blauwens, G. en Witlox, F., *Multimodaal vervoer: zoektocht naar synergie tussen de modi?*, Garant, Antwerpen, 2002, 154 p.

Blauwens, G., Vandaele, N., Van de Voorde, E., Vernimmen, B. en Witlox, F. (2006), 'Towards a modal shift in freight transport? A business logistics analysis of some policy measures', *Transport Reviews*, Vol. 26:2, pp. 239-251

Chiang, C. (2001), 'Order splitting under periodic review inventory systems', *International Journal Production Economics* 70, pp. 67-76

Cunningham, W.H.J. (1982), 'Freight modal choice and competition in transportation: a critique and categorization of analysis techniques', *Transportation Journal*, Vol. 21, pp. 66-75

Dullaert, W., Raa, B., Vernimmen, B. en Witlox, F. (2005a), 'A hybrid approach to designing inbound resupply strategies', paper submitted to *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 20:4, pp. 31-36

Dullaert, W., Maes, B., Vernimmen, B. en Witlox, F. (2005b), 'An evolutionary algorithm for order splitting with multiple transport alternatives', *Expert Systems with Applications* 28 (2), pp. 201-208

Dullaert, W., Raa, B., Vernimmen, B. en Witlox, F. (2005c), 'Single and multiple sourcing for stochastic inbound resupply', *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, IESM 2005, Mei 16-19, Marrakech (Marokko), pp. 1-9

Hill, R.M. (1996), 'Order splitting in continuous review (Q, r) inventory models', *European Journal of Operational Research* 95, pp. 53-61

Kelle, P. and Miller, P.A. (2001), 'Stockout risk and order splitting', *International Journal Production Economics* 71, pp. 407-415

Lambrecht, D.M. en Stock, J.R., *Strategic Logistics Management*, Irwin, Homewood-Boston, 1993, 862 p.

Macharis, C. en Verbeke, A., *Intermodaal vervoer - Economische en strategische aspecten van het intermodaal vervoer in Vlaanderen*, Garant, Leuven-Apeldoorn, 1999, 221 p.

McGinnis, M.A. (1989), 'A comparative evaluation of freight transportation models', *Transportation Journal*, Vol. 29:2, pp. 36-46

Mishra, A.K. and Tadikamalla, P.R. (2005), 'Order splitting in single sourcing with scheduled-release orders', *Journal of the operational Research Society* advance publication 23 March 2005, doi:10.1057/palgrave.jors.2601974

Pirlot, M. (1996), 'General local search methods', *European Journal of Operational Research* 92, pp. 493-511

Ramasesh, R.V., Ord, J.K., Hayya, J.C. and Pan, A. (1991), 'Sole versus dual sourcing in stochastic lead-time (s, Q) inventory models', *Management Science*, Vol. 32, No. 4, pp. 428-443

Sculli, D. and Wu, S. (1981), 'Stock control with two suppliers and normal lead times', *Journal of the Operational Research Society* 32 (11), pp. 1003-1009

Sedarage, D., Fujiwara, O. and Luong, H.T. (1999), 'Determining optimal order splitting and reorder level for N-supplier inventory systems', *European Journal of Operational Research* 116, pp. 389-404

Sheffi, Y., Eskandari, B. en Koutsopoulos, H.N. (1988), 'Transportation mode choice based on total logistics costs', *Journal of Business Logistics*, Vol. 9:2, pp. 137-154

Sheridan, J. (1988), 'Betting on a single source', *Industry Week* 236 (3), pp. 31-36

Thomas, D.J. and Tyworth, J.E. (2006), 'Pooling lead-time risk by order splitting: A critical review', *Transportation Research Part E* 42, pp. 245-257

Tyworth, J.E. (1991), 'The inventory-theoretic approach in transportation selection models: a critical review', *The Logistics and Transportation Review* 27 (4), pp. 299-318

Tyworth, J.E. en Ruiz-Torres, A. (2000), 'Transportation's role in the sole- versus dual-sourcing decision', *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 30, No. 2, pp. 128-144

Vannieuwenhuyse, B. (2003), 'De vervoerwijzekeuze: drijfveren, hefboomen en katalysatoren in een bedrijfseconomische context', Working Paper 2003-05, Transport & Mobility Leuven, 23 p.

Vernimmen, B. en Witlox, F. (2001), 'Using an inventory theoretic approach for modal choice; a case study', Research Paper 2001-030, UFSIA-RUCA Faculteit TEW, Universiteit Antwerpen, 33 p.

Vernimmen, B. and 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), pp. 33-58

Vernimmen, B. (2004), 'Een logistieke analyse van de modale keuze in het goederenvervoer', *Logistiek: laatste front in de concurrentieslag: referatenboek van het 26ste Vlaams Wetenschappelijke Economisch Congres*, e.a., Antwerpen, Garant, pp. 205-229

Vernimmen et al. (2004), 'A logistical analysis of modal choice in freight transport: a case study with non-normally distributed demand during lead time', in: C. Ruijgrok and R. Rodenburg (Eds.), *Bijdragen Vervoerslogistieke Werkdagen 2004 – Deel 2*, Delft, Connekt, pp. 515-527

Vernimmen, B., Bleuzé, S., Dullaert, W., Willemé, P. en Witlox, F. (2005), 'Optimizing inbound shipping strategies in hinterland transportation: A case of non-normally distributed demand during lead time', *Papers presented at the 2005 NECTAR Conference*, June 2-4, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, Las Palmas

Witlox, F. (2004-2005), *Vervoersbeleid: expeditie – verzending van goederen*, cursus 2^e jaar HI-OML, Faculteit TEW, Limburgs Universitair Centrum, Diepenbeek, 190p.

Lijst van figuren

Figuur 1: De intermodale keten	9
Figuur 2: Prijzen van intermodaal vervoer in vergelijking met unimodaal wegvervoer	21
Figuur 3: Invloed van een stijging van de prijs van het wegvervoer op intermodaal vervoer	22
Figuur 4: Invloed van een daling van de prijs van het spoorvervoer op intermodaal vervoer	23
Figuur 5: Cyclische voorraad bij bestelhoeveelheid Q	36
Figuur 6: Cyclische voorraad en veiligheidsvoorraad	40
Figuur 7: Afruil tussen transportkosten en voorraadkosten	48
Figuur 8: Cross-over	59
Figuur 9: Mutatie	60
Figuur 10: Evolutie van de totale logistieke kost	67

Lijst van tabellen

Tabel 1: SWOT-analyse van de verschillende transportalternatieven	8
Tabel 2: Gemiddelde kost per ton-mijl	14
Tabel 3: Vervoerssubsystemen in het goederenvervoer	19
Tabel 4: Enkele waarden van K en p	43
Tabel 5: Productparameters	64
Tabel 6: Parameters van de transportalternatieven	65
Tabel 7: Wijziging van de parameters	71
Tabel 8: Runtime van het eerste deel van het onderzoek (seconden)	72
Tabel 9: Statistische analyse van de resultaten van het eerste deel van het onderzoek	75
Tabel 10: Ingezette transportalternatieven	79
Tabel 11: Volgorde van belang van de wijzigingen in de variabelen	81
Tabel 12: Combinaties van wijzigingen van de variabelen	84
Tabel 13: Runtime van het tweede deel van het onderzoek (seconden)	85
Tabel 14: Statistische analyse van de resultaten van het tweede deel van het onderzoek	88

Lijst van symbolen

TLC	= Totale logistieke kosten (euro)
TC	= Transportkosten (euro)
R	= Jaarlijkse volume (ton)
Q	= Laadcapaciteit (ton)
v	= Waarde van de goederen (euro per ton)
h	= Voorraadkosten (% van de waarde van de goederen per jaar)
L	= Gemiddelde levertijd (dagen)
K	= Veiligheidsfactor, afhankelijk van de vooraf bepaalde kans op een voorraadtekort tijdens de levertermijn
d	= Variantie van dagelijkse vraag (ton ²)
D	= Gemiddelde dagelijkse vraag (ton)
l	= Variantie van de levertijd (dagen ²)
NTC	= Niet aan transport gerelateerde kosten
r	= De transportkost per eenheid (inclusief de vrachtprijs, de verzekering, laden en lossen, ...)
T	= Het totaal aantal getransporteerde eenheden per jaar
u	= De kost van de voorraad tijdens het vervoer per eenheid per jaar
t	= De gemiddelde leveringstijd (in jaren)
a	= De kost van orderbehandeling en administratie per verzending
s	= De gemiddelde tijd tussen twee verzendingen (in jaren)
w	= De kost van de cyclische voorraad per eenheid per jaar
VV	= Het niveau van de veiligheidsvoorraad
σ	= De standaardafwijking van de vraag gedurende de levertermijn
σ_l	= De standaardafwijking van de levertermijn
σ_d	= De standaardafwijking van de vraag
TG	= Toetsingsgrootheid
\bar{x}	= Gemiddelde van de totale logistieke kosten
μ_0	= Populatiegemiddelde

S	= Standaarddeviatie
n	= Aantal herhalingen van het programma
e1	= Hoofdeffect van de transportkost bij capaciteit van 25 ton
e2	= Hoofdeffect van de transportkost bij capaciteit van 1000 ton
e3	= Hoofdeffect van de levertermijn bij capaciteit van 600 ton
e4	= Hoofdeffect van de levertermijn bij capaciteit van 1000 ton
e12	= Tweefactor interactie-effect tussen transportkost bij 25 ton en transportkost bij 1000 ton
e13	= Tweefactor interactie-effect tussen transportkost bij 25 ton en levertermijn bij 600 ton
e14	= Tweefactor interactie-effect tussen transportkost bij 25 ton en levertermijn bij 1000 ton
e23	= Tweefactor interactie-effect tussen transportkost bij 1000 ton en levertermijn bij 600 ton
e24	= Tweefactor interactie-effect tussen transportkost bij 1000 ton en levertermijn bij 1000 ton
e34	= Tweefactor interactie-effect tussen levertermijn bij 600 ton en levertermijn bij 1000 ton
e123	= Driefactor interactie-effect tussen transportkost bij 25 ton, transportkost bij 1000 ton en levertermijn bij 600 ton
e124	= Driefactor interactie-effect tussen transportkost bij 25 ton, transportkost bij 1000 ton en levertermijn bij 1000 ton
e134	= Driefactor interactie-effect tussen transportkost bij 25 ton, levertermijn bij 600 ton en levertermijn bij 600 ton
e234	= Driefactor interactie-effect tussen transportkost bij 1000 ton, levertermijn bij 600 ton en levertermijn bij 1000 ton
e1234	= Vierfactor interactie-effect tussen transportkost bij 25 ton, transportkost bij 1000 ton, levertermijn bij 600 ton en levertermijn bij 1000 ton

Bijlagen

Bijlage 1: Voorbeeld van een inputbestand

Bijlage 2: Voorbeeld van een outputbestand

Bijlage 3: Experimentele punten onderzoek deel 1

Bijlage 4: Resultaten onderzoek deel 1

Bijlage 5: Statistische analyse van de resultaten onderzoek deel 1

Bijlage 6: De t-verdeling

Bijlage 7: Experimentele punten onderzoek deel 2

Bijlage 8: Resultaten onderzoek deel 2

Bijlage 9: Design matrix

Bijlage 10: Berekening van de hoofd- en interactie-effecten voor de eerste replicatie

Bijlage 11: Statistische analyse van de hoofd- en interactie-effecten

Bijlage 1: Voorbeeld van een inputbestand

Inputgegevens bij een toename van de transportkost met 20% van een vrachtwagen met een capaciteit van 10 ton

30			
5			
10	180	2	0.4
25	250	2	0.4
300	2700	6	1
600	4800	6	1
1000	7000	6	1

Bijlage 2: Voorbeeld van een outputbestand

Outputbestand bij een toename van de transportkost met 20% van een vrachtwagen met een capaciteit van 10 ton

0	465404.336069	25	454364.165129	50	435937.098733
1	465404.336069	26	454364.165129	51	435937.098733
2	465404.336069	27	454364.165129	52	435937.098733
3	465404.336069	28	454364.165129	53	435937.098733
4	465404.336069	29	454364.165129	54	435937.098733
5	465404.336069	30	454364.165129	55	435937.098733
6	465404.336069	31	454364.165129	56	435937.098733
7	465404.336069	32	454364.165129	57	435937.08733
8	454364.165129	33	439012.577827	58	435937.09873
9	454364.165129	34	439012.577827	59	435937.098733
10	454364.165129	35	439012.577827	60	435937.098733
11	454364.165129	36	439012.577827	61	435937.098733
12	454364.165129	37	439012.577827	62	435937.098733
13	454364.165129	38	435937.098733	63	435937.098733
14	454364.165129	39	435937.098733	64	435937.098733
15	454364.165129	40	435937.098733	65	435937.098733
16	454364.165129	41	435937.098733	66	435937.098733
17	454364.165129	42	435937.098733	67	435937.098733
18	454364.165129	43	435937.098733	68	435937.098733
19	454364.165129	44	435937.098733	69	435937.098733
20	454364.165129	45	435937.08733	70	435937.098733
21	454364.165129	46	435937.09873	71	435937.098733
22	454364.165129	47	435937.09873	72	435937.098733
23	454364.165129	48	435937.098733	73	435937.098733
24	454364.165129	49	435937.098733	74	435937.098733

75	435937.098733	106	425678.235177	137	425678.235177
76	435937.098733	107	425678.235177	138	425678.235177
77	435937.098733	108	425678.235177	139	425678.235177
78	435937.098733	109	425678.235177	140	425678.235177
79	435937.098733	110	425678.235177	141	425678.235177
80	435937.098733	111	425678.235177	142	425678.235177
81	435937.098733	112	425678.235177	143	425678.235177
82	435937.098733	113	425678.235177	144	425678.235177
83	435937.098733	114	425678.235177	145	425678.235177
84	435937.098733	115	425678.235177	146	425678.235177
85	435937.098733	116	425678.235177	147	425678.235177
86	435937.098733	117	425678.235177	148	425678.235177
87	435937.098733	118	425678.235177	149	425678.235177
88	435937.098733	119	425678.235177	150	425678.235177
89	435937.098733	120	425678.235177	151	425678.235177
90	435937.098733	121	425678.235177	152	425678.235177
91	435937.098733	122	425678.235177	153	425678.235177
92	435937.098733	123	425678.235177	154	425678.235177
93	435937.098733	124	425678.235177	155	425678.235177
94	425678.235177	125	425678.235177	156	425678.235177
95	425678.235177	126	425678.235177	157	425678.235177
96	425678.235177	127	425678.235177	158	425678.235177
97	425678.235177	128	425678.235177	159	425678.235177
98	425678.235177	129	425678.235177	160	425678.235177
99	425678.235177	130	425678.235177	161	425678.235177
100	425678.235177	131	425678.235177	162	425678.235177
101	425678.235177	132	425678.235177	163	425678.235177
102	425678.235177	133	425678.235177	164	425678.235177
103	425678.235177	134	425678.235177	165	425678.235177
104	425678.235177	135	425678.235177	166	425678.235177
105	425678.235177	136	425678.235177	167	425678.235177

168	425678.235177	177	425678.235177	186	425678.235177
169	425678.235177	178	425678.235177	187	425678.235177
170	425678.235177	179	425678.235177	188	425678.235177
171	425678.235177	180	425678.235177	189	425678.235177
172	425678.235177	181	425678.235177	190	425678.235177
173	425678.235177	182	425678.235177	191	425678.235177
174	425678.235177	183	425678.235177	192	425678.235177
175	425678.235177	184	425678.235177	193	425678.235177
176	425678.235177	185	425678.235177	194	425678.235177

cap	rate	avg LT	var LT	act LT	maxNVeh
10.00	180.00	2.00	0.40	0.00	225
25.00	250.00	2.00	0.40	0.00	90
300.00	2700.00	6.00	1.00	0.00	7
600.00	4800.00	6.00	1.00	0.00	3
1000.00	7000.00	6.00	1.00	0.00	2
1	1	0	0	1	

fastest alternative:

1000.00	7000.00	6.00	1.00	0.00	2
---------	---------	------	------	------	---

transport	safety	transit	cycle	order	TLC	delivery	scaledTLC	fitness
7430.00	1013.82	2529.17	1235.27	30.00	12238.25	1035.00	425678.24	0.09

duration 0.157000

Bijlage 3: Experimentele punten onderzoek deel 1

Populatiegrootte	30			
Aantal transportalternatieven	5			
Data 1				
Naam databestand	Data 1			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	180	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1
Data 2				
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	300	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 3		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	3240	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 4		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	5760	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 5		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	8400	6	1

Naam databestand		Data 6		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	120	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 7		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	200	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 8		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2160	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 9		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	3840	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 10		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	5600	6	1

Naam databestand		Data 11		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2.4	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand	Data 12			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2.4	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand	Data 13			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	7.2	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand	Data 14			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	7.2	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 15		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	7.2	1

Naam databestand		Data 16		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	1.6	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 17		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	1.6	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 18		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	4.8	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 19		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	4.8	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 20		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	4.8	1

Naam databestand		Data 21			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn	
Transportalternatief 1	10	150	2	0.48	
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4	
Transportalternatief 3	300	2700	6	1	
Transportalternatief 4	600	4800	6	1	
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1	

Naam databestand		Data 22			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn	
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4	
Transportalternatief 2	25	250	2	0.48	
Transportalternatief 3	300	2700	6	1	
Transportalternatief 4	600	4800	6	1	
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1	

Naam databestand		Data 23			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn	
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4	
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4	
Transportalternatief 3	300	2700	6	1.2	
Transportalternatief 4	600	4800	6	1	
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1	

Naam databestand		Data 24			Variantie van de levertermijn	
		Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	levertermijn	
Transportalternatief 1		10	150	2	2	0.4
Transportalternatief 2		25	250	2	2	0.4
Transportalternatief 3		300	2700	6	6	1
Transportalternatief 4		600	4800	6	6	1.2
Transportalternatief 5		1000	7000	6	6	1

Naam databestand		Data 25			Variantie van de levertermijn	
		Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	levertermijn	
Transportalternatief 1		10	150	2	2	0.4
Transportalternatief 2		25	250	2	2	0.4
Transportalternatief 3		300	2700	6	6	1
Transportalternatief 4		600	4800	6	6	1
Transportalternatief 5		1000	7000	6	6	1.2

Naam databestand		Data 26			Variantie van de levertermijn	
		Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	levertermijn	
Transportalternatief 1		10	150	2	2	0.32
Transportalternatief 2		25	250	2	2	0.4
Transportalternatief 3		300	2700	6	6	1
Transportalternatief 4		600	4800	6	6	1
Transportalternatief 5		1000	7000	6	6	1

Naam databestand		Data 27		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.32
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 28		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	0.8
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand		Data 29		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	0.8
Transportalternatief 5	1000	7000	6	1

Naam databestand	Data 30			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	250	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	6	1
Transportalternatief 5	1000	7000	6	0.8

Bijlage 4: Resultaten onderzoek deel 1

Replicatie 1

Data	Ingezette transportalternatieven	Totale logistieke kost	Run time
1	<1 1 0 0 1>	425678,24	0,157000
2	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,219000
3	<2 1 0 0 1>	427909,97	0,250000
4	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,219000
5	<1 2 0 1 0>	450735,63	0,219000
6	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,093000
7	<0 22 0 0 0>	386429,23	0,312000
8	<0 2 1 0 0>	428419,72	0,172000
9	<1 2 0 1 0>	398371,99	0,312000
10	<1 1 0 0 1>	375939,10	0,265000
11	<1 1 0 0 1>	421765,19	0,328000
12	<1 2 0 0 1>	428106,98	0,250000
13	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,266000
14	<2 4 0 0 1>	437323,29	0,344000
15	<2 1 0 0 1>	445615,86	0,265000
16	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,094000
17	<1 1 0 0 1>	424562,29	0,140000
18	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,187000
19	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,094000
20	<1 1 0 0 1>	406845,49	0,203000
21	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,156000
22	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,140000
23	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,141000
24	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,094000
25	<1 1 0 0 1>	429597,86	0,141000
26	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,140000
27	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,141000
28	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,156000
29	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,094000
30	<1 1 0 0 1>	419154,96	0,078000

Replicatie 2

Data	Ingezette transportalternatieven	Totale logistieke kost	Run time
1	<1 1 0 0 1>	425678,24	0,157000
2	<1 2 0 0 1>	431361,70	0,203000
3	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,109000
4	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,157000
5	<1 3 0 1 0>	453910,69	0,281000
6	<1 1 0 0 1>	423591,28	0,156000
7	<0 2 1 0 0 0>	385491,73	0,234000
8	<0 0 1 0 0>	414544,72	0,140000
9	<1 1 0 1 0>	392959,19	0,094000
10	<0 0 0 0 1>	382354,72	0,078000
11	<4 3 0 0 1>	437756,55	0,156000
12	<1 3 0 0 1>	431393,28	0,109000
13	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,094000
14	<1 3 0 0 1>	431185,91	0,172000
15	<1 1 0 0 1>	442423,85	0,203000
16	<1 1 0 0 1>	427504,32	0,171000
17	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,109000
18	<2 3 0 0 1>	434285,99	0,140000
19	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,094000
20	<1 1 0 0 1>	406845,49	0,171000
21	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,140000
22	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,141000
23	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,093000
24	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,250000
25	<0 0 0 0 1>	437717,82	0,187000
26	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,093000
27	<2 1 0 0 1>	427909,97	0,203000
28	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,125000
29	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,156000
30	<1 2 0 0 1>	422485,68	0,406000

Replicatie 3

Data	Ingezette transportalternatieven	Totale logistieke kost	Run time
1	<1 5 0 0 1>	438276,60	0,250000
2	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,203000
3	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,359000
4	<3 1 0 0 1>	431130,21	0,328000
5	<1 1 0 1 0>	447384,39	0,297000
6	<1 4 0 0 1>	433330,53	0,219000
7	<0 21 0 0 0>	385491,73	0,282000
8	<1 2 1 0 0>	423894,72	0,312000
9	<0 1 0 1 0>	401868,22	0,203000
10	<1 2 0 0 1>	380418,31	0,266000
11	<2 1 0 0 1>	425096,57	0,234000
12	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,219000
13	<1 3 0 0 1>	431185,91	0,391000
14	<1 3 0 0 1>	431185,91	0,188000
15	<0 0 0 0 1>	450848,17	0,250000
16	<1 5 0 0 1>	439941,80	0,218000
17	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,203000
18	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,219000
19	<1 3 0 0 1>	431185,91	0,250000
20	<1 1 0 0 1>	406845,49	0,359000
21	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,281000
22	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,281000
23	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,235000
24	<2 1 0 0 1>	427909,97	0,313000
25	<1 2 0 0 1>	432928,58	0,312000
26	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,234000
27	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,172000
28	<2 1 0 0 1>	427909,97	0,203000
29	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,188000
30	<1 1 0 0 1>	419154,96	0,250000

Replicatie 4

Data	Ingezette transportalternatieven	Totale logistieke kost	Run time
1	<2 2 0 0 1>	433169,25	0,250000
2	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,187000
3	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,187000
4	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,250000
5	<0 20 0 0 0>	456554,23	0,218000
6	<3 1 0 0 1>	428059,12	0,188000
7	<0 20 0 0 0>	384554,23	0,344000
8	<1 1 1 0 0>	417218,41	0,328000
9	<0 1 0 1 0>	401868,22	0,219000
10	<1 2 0 0 1>	380418,31	0,235000
11	<1 2 0 0 1>	425163,59	0,235000
12	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,218000
13	<2 1 0 0 1>	427909,97	0,265000
14	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,234000
15	<1 1 0 0 1>	442423,85	0,344000
16	<1 2 0 0 1>	430767,36	0,328000
17	<1 2 0 0 1>	427823,97	0,313000
18	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,297000
19	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,250000
20	<3 1 0 0 1>	413505,79	0,266000
21	<2 1 0 0 1>	427909,97	0,188000
22	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,203000
23	<1 4 0 0 1>	434303,50	0,328000
24	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,172000
25	<1 1 0 0 1>	429597,86	0,266000
26	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,359000
27	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,250000
28	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,281000
29	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,188000
30	<0 0 0 0 1>	427274,93	0,187000

Replicatie 5

Data	Ingezette transportalternatieven	Totale logistieke kost	Run time
1	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,203000
2	<1 2 0 0 1>	431361,70	0,203000
3	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,406000
4	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,437000
5	<0 1 0 1 0>	457164,22	0,266000
6	<1 3 0 0 1>	430190,52	0,328000
7	<0 23 0 0 0>	387366,73	0,312000
8	<1 2 1 0 0>	423894,72	0,438000
9	<1 1 0 1 0>	392959,19	0,250000
10	<2 3 0 0 1>	388258,59	0,265000
11	<1 2 0 0 1>	425163,59	0,375000
12	<2 2 0 0 1>	431290,75	0,250000
13	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,312000
14	<2 2 0 0 1>	431150,56	0,344000
15	<1 3 0 0 1>	448574,28	0,203000
16	<1 1 0 0 1>	427504,32	0,281000
17	<2 2 0 0 1>	431010,37	0,238000
18	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,234000
19	<2 3 0 0 1>	434285,99	0,219000
20	<0 0 0 0 1>	414661,11	0,204000
21	<2 1 0 0 1>	427909,97	0,360000
22	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,234000
23	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,250000
24	<0 0 0 0 1>	432754,72	0,187000
25	<1 3 0 0 1>	436149,01	0,172000
26	<1 1 0 0 1>	424634,76	0,375000
27	<1 4 0 0 1>	434303,50	0,297000
28	<1 3 0 0 1>	431185,91	0,219000
29	<1 2 0 0 1>	427965,48	0,219000
30	<1 1 0 0 1>	419154,96	0,297000

Bijlage 5: Statistische analyse van de resultaten onderzoek deel 1

Berekening gemiddelde

Totale logistieke kost	Replicatie 1	Replicatie 2	Replicatie 3	Replicatie 4	Replicatie 5	Som	Gemiddelde
Databestand							
1	425.678,24	425678,24	438276,60	433169,25	432754,72	2.155.557,05	431111,410
2	432754,72	431361,70	432754,72	432754,72	431361,70	2.160.987,56	432197,512
3	427909,97	432754,72	424634,76	424634,76	424634,76	2.134.568,97	426913,794
4	432754,72	427965,48	431130,21	432754,72	424634,76	2.149.239,89	429847,978
5	450735,63	453910,69	447384,39	456554,23	457164,22	2.265.749,16	453149,832
6	432754,72	423591,28	433330,53	428059,12	430190,52	2.147.926,17	429585,234
7	386429,23	385491,73	385491,73	384554,23	387366,73	1.929.333,65	385866,730
8	428419,72	414544,72	423894,72	417218,41	423894,72	2.107.972,29	421594,458
9	398371,99	392959,19	401868,22	401868,22	392959,19	1.988.026,81	397605,362
10	375939,10	382354,72	380418,31	380418,31	388258,59	1.907.389,03	381477,806
11	421765,19	437756,55	425096,57	425163,59	425163,59	2.134.945,49	426989,098
12	428106,98	431393,28	432754,72	432754,72	431290,75	2.156.300,45	431260,090
13	424634,76	424634,76	431185,91	427909,97	424634,76	2.133.000,16	426600,032
14	437323,29	431185,91	431185,91	432754,72	431150,56	2.163.600,39	432720,078
15	445615,86	442423,85	450848,17	442423,85	448574,28	2.229.886,01	445977,202

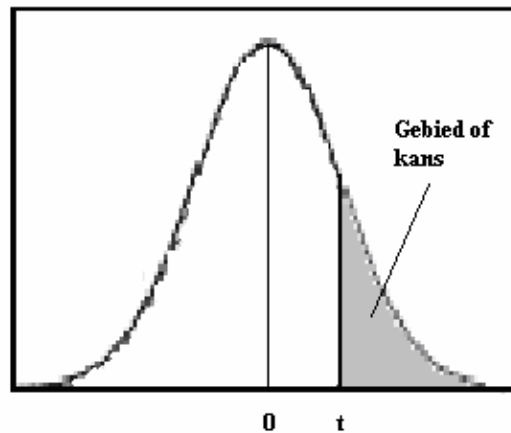
Totale logistieke kost		Replicatie 1	Replicatie 2	Replicatie 3	Replicatie 4	Replicatie 5	Som	Gemiddelde
Databestand								
16		432754,72	427504,32	439941,80	430767,36	427504,32	2.158.472,52	431694,504
17		424562,29	432754,72	432754,72	427823,97	431010,37	2.148.906,07	429781,214
18		432754,72	434285,99	432754,72	427965,48	427965,48	2.155.726,39	431145,278
19		406845,49	406845,49	406845,49	413505,79	414661,11	2.048.703,37	409740,674
21		424634,76	424634,76	432754,72	427909,97	427909,97	2.137.844,18	427568,836
22		424634,76	432754,72	427965,48	424634,76	432754,72	2.142.744,44	428548,888
23		424634,76	424634,76	427965,48	434303,50	427965,48	2.139.503,98	427900,796
24		432754,72	427965,48	427909,97	432754,72	432754,72	2.154.139,61	430827,922
25		429597,86	437717,82	432928,58	429597,86	436149,01	2.165.991,13	433198,226
26		424634,76	432754,72	432754,72	424634,76	424634,76	2.139.413,72	427882,744
27		424634,76	427909,97	432754,72	427965,48	434303,50	2.147.568,43	429513,686
28		424634,76	424634,76	427909,97	427965,48	431185,91	2.136.330,88	427266,176
29		424634,76	427965,48	427965,48	432754,72	427965,48	2.141.285,92	428257,184
30		419154,96	422485,68	419154,96	427274,93	419154,96	2.107.225,49	421445,098

Berekening standaarddeviatie en t-waarde

Databestand	Kwadratensom van de verschillen tussen de gegevens en het gemiddelde	Kwadratensom delen door (n-1)	Standaarddeviatie	t-waarde
1	117313793,456	29328448,36	5415,574611	2,674
2	2328605,664	582151,4161	762,9884771	22,164
3	50690771,080	12672692,77	3559,872578	1,432
4	49263857,646	12315964,41	3509,410835	3,322
5	67352834,405	16838208,6	4103,438631	15,539
6	62695763,269	15673940,82	3959,032813	2,796
7	4570312,500	1142578,125	1068,914461	-81,099
8	126015213,873	31503803,47	5612,82491	-1,211
9	80105463,654	20026365,91	4475,082783	-13,506
10	79670337,521	19917584,38	4462,912096	-21,623
11	153473858,512	38368464,63	6194,228332	0,850
12	14428619,958	3607154,989	1899,251165	7,800
13	34333096,697	8583274,174	2929,722542	1,500
14	28361490,442	7090372,61	2662,775359	6,790
15	55854332,308	13963583,08	3736,787802	12,771

Databestand	Kwadratensom van de verschillen tussen de gegevens en het gemiddelde	Kwadratensom delen door (n-1)	Standaarddeviatie	t-waarde
16	105116829,183	26279207,3	5126,324931	3,079
17	50262272,130	12565568,03	3544,794498	3,246
18	35266909,611	8816727,403	2969,297459	4,903
19	23083211,373	5770802,843	2402,249538	6,660
20	63533060,105	15883265,03	3985,381415	-8,357
21	44343741,621	11085935,41	3329,554836	1,970
22	66359206,520	16589801,63	4073,058019	2,149
23	62336968,858	15584242,21	3947,688211	1,850
24	27845669,676	6961417,419	2638,449814	5,249
25	55131835,773	13782958,94	3712,540767	5,158
26	79120500,482	19780125,12	4447,485258	1,633
27	62219385,284	15554846,32	3943,963276	2,766
28	30116511,760	7529127,94	2743,925644	2,144
29	33605059,378	8401264,844	2898,493547	2,795
30	50803948,224	12700987,06	3563,844421	-2,001

Bijlage 6: De t-verdeling



Getallen in de tabel geven de t-waarden voor een gebied of kans in de bovenstaart van de t-verdeling. Bijvoorbeeld, met 10 vrijheidsgraden en een gebied van 0,05 in de bovenstaart is $t_{0,05} = 1,812$.

df	P						
	.750	.900	.950	.975	.990	.995	.999
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.656	318.289
2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.328
3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.214
4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.894
6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501
9	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297
10	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610
19	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527
22	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505
23	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485
24	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467
25	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450
26	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435
27	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421
28	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408
29	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396
30	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385
40	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307
60	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232
120	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.160
∞	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090

Bijlage 7: Experimentele punten onderzoek deel 2

Populatiegrootte	30			
Aantal transportalternatieven	5			
Naam databestand				
Data 31				
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	300	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	7.2	1
Transportalternatief 5	1000	8400	7.2	1
Naam databestand				
Data 32				
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	200	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	7.2	1
Transportalternatief 5	1000	8400	7.2	1

Naam databestand		Data 33		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	300	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	7.2	1
Transportalternatief 5	1000	5600	7.2	1

Naam databestand		Data 34		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	200	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	7.2	1
Transportalternatief 5	1000	5600	7.2	1

Naam databestand		Data 35		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	300	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	4.8	1
Transportalternatief 5	1000	8400	7.2	1

Naam databestand		Data 36		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	200	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	4.8	1
Transportalternatief 5	1000	8400	7.2	1

Naam databestand		Data 37		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	300	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	4.8	1
Transportalternatief 5	1000	5600	7.2	1

Naam databestand		Data 38		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	200	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	4.8	1
Transportalternatief 5	1000	5600	7.2	1

Naam databestand		Data 39		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	300	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	7.2	1
Transportalternatief 5	1000	8400	4.8	1

Naam databestand		Data 40		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	200	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	7.2	1
Transportalternatief 5	1000	8400	4.8	1

Naam databestand		Data 41		
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	300	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	7.2	1
Transportalternatief 5	1000	5600	4.8	1

Naam databestand	Data 42			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	200	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	7.2	1
Transportalternatief 5	1000	5600	4.8	1

Naam databestand	Data 43			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	300	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	4.8	1
Transportalternatief 5	1000	8400	4.8	1

Naam databestand	Data 44			
	Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	Variantie van de levertermijn
Transportalternatief 1	10	150	2	0.4
Transportalternatief 2	25	200	2	0.4
Transportalternatief 3	300	2700	6	1
Transportalternatief 4	600	4800	4.8	1
Transportalternatief 5	1000	8400	4.8	1

Naam databestand		Data 45			Variantie van de	
		Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	levertermijn	
Transportalternatief 1		10	150	2	2	0.4
Transportalternatief 2		25	300	2	2	0.4
Transportalternatief 3		300	2700	6	6	1
Transportalternatief 4		600	4800	4.8	4.8	1
Transportalternatief 5		1000	5600	4.8	4.8	1

Naam databestand		Data 46			Variantie van de	
		Capaciteit	Transportkost	Gemiddelde levertermijn	levertermijn	
Transportalternatief 1		10	150	2	2	0.4
Transportalternatief 2		25	200	2	2	0.4
Transportalternatief 3		300	2700	6	6	1
Transportalternatief 4		600	4800	4.8	4.8	1
Transportalternatief 5		1000	5600	4.8	4.8	1

Bijlage 8: Resultaten onderzoek deel 2

Replicatie 1

Data	Ingezette transportalternatieven	Totale logistieke kost	Run time
31	<0 0 0 1 0>	472088,17	0,203000
32	<0 22 0 0 0>	386429,23	0,344000
33	<2 1 0 0 1>	401175,67	0,234000
34	<0 26 0 0 0>	390179,23	0,172000
35	<1 1 0 1 0>	434322,27	0,250000
36	<0 25 0 0 0>	389241,73	0,187000
37	<1 1 0 0 1>	396510,81	0,250000
38	<0 20 0 0 0>	384554,23	0,250000
39	<0 0 0 0 1>	465061,11	0,188000
40	<0 28 0 0 0>	392054,23	0,360000
41	<1 1 0 0 1>	360932,45	0,391000
42	<0 0 0 0 1>	364261,11	0,203000
43	<0 0 0 1 0>	435901,11	0,219000
44	<0 28 0 0 0>	392054,23	0,218000
45	<1 1 0 0 1>	360932,45	0,265000
46	<2 2 0 0 1>	365197,14	0,281000

Replicatie 2

Data	Ingezette transportalternatieven	Totale logistieke kost	Run time
31	<1 1 0 1 0>	469517,20	0,187000
32	<0 21 0 0 0>	385491,73	0,328000
33	<1 1 0 0 1>	396510,81	0,265000
34	<0 21 0 0 0>	385491,73	0,219000
35	<1 1 0 1 0>	434322,27	0,281000
36	<0 27 0 0 0>	391116,73	0,265000
37	<1 1 0 0 1>	396510,81	0,234000
38	<0 23 0 0 0>	387366,73	0,281000
39	<1 1 0 0 1>	458323,76	0,312000
40	<0 21 0 0 0>	385491,73	0,187000
41	<1 2 0 0 1>	367249,22	0,203000
42	<0 0 0 0 1>	364261,11	0,219000
43	<0 0 0 1 0>	435901,11	0,329000
44	<0 23 0 0 0>	387366,73	0,204000
45	<0 0 0 0 1>	364261,11	0,172000
46	<1 1 0 0 1>	357454,19	0,250000

Replicatie 3

Data	Ingezette transportalternatieven	Totale logistieke kost	Run time
31	<0 0 0 1 0>	472088,17	0,188000
32	<0 20 0 0 0>	384554,23	0,375000
33	<1 1 0 0 1>	396510,81	0,375000
34	<0 24 0 0 0>	388304,23	0,266000
35	<0 0 0 1 0>	435901,11	0,328000
36	<0 22 0 0 0>	386429,23	0,250000
37	<0 0 0 0 1>	400448,17	0,328000
38	<0 32 0 0 0>	395804,23	0,203000
39	<1 1 0 0 1>	458323,76	0,406000
40	<0 21 0 0 0>	385491,73	0,344000
41	<0 0 0 0 1>	364261,11	0,328000
42	<1 1 0 0 1>	357454,19	0,328000
43	<1 3 0 1 0>	446393,72	0,250000
44	<0 23 0 0 0>	387366,73	0,297000
45	<0 0 0 0 1>	364261,11	0,250000
46	<1 2 0 0 1>	360456,77	0,250000

Replicatie 4

Data	Ingezette transportalternatieven	Totale logistieke kost	Run time
31	<0 0 0 1 0>	472088,17	0,344000
32	<0 21 0 0 0>	385491,73	0,250000
33	<1 1 0 0 1>	396510,81	0,235000
34	<0 20 0 0 0>	384554,23	0,234000
35	<1 3 0 1 0>	446393,72	0,281000
36	<0 22 0 0 0>	386429,23	0,250000
37	<0 0 0 0 1>	400448,17	0,187000
38	<0 25 0 0 0>	389241,73	0,469000
39	<1 1 0 0 1>	458323,76	0,266000
40	<0 28 0 0 0>	392054,23	0,297000
41	<0 0 0 0 1>	364261,11	0,359000
42	<0 0 0 0 1>	364261,11	0,203000
43	<1 2 0 1 0>	440551,11	0,187000
44	<0 24 0 0 0>	388304,23	0,343000
45	<1 1 0 0 1>	360932,45	0,250000
46	<0 0 0 0 1>	364261,11	0,219000

Replicatie 5

Data	Ingezette transportalternatieven	Totale logistieke kost	Run time
31	<1 2 0 1 0>	475101,80	0,188000
32	<0 27 0 0 0>	391116,73	0,235000
33	<0 0 0 0 1>	400448,17	0,313000
34	<0 24 0 0 0>	388304,23	0,344000
35	<0 0 0 1 0>	435901,11	0,250000
36	<0 25 0 0 0>	389241,73	0,250000
37	<1 2 0 0 1>	402417,41	0,203000
38	<0 24 0 0 0 >	388304,23	0,235000
39	<0 0 0 0 1>	465061,11	0,203000
40	<0 20 0 0 0>	384554,23	0,188000
41	<1 1 0 0 1>	360932,45	0,219000
42	<2 2 0 0 1>	365197,14	0,375000
43	<1 1 0 1 0>	434322,27	0,250000
44	<0 28 0 0 0>	392054,23	0,172000
45	<1 1 0 0 1>	360932,45	0,484000
46	<0 0 0 0 1>	364261,11	0,313000

Bijlage 9: Design matrix

Data	TK 25 ton	TK 1000 ton	Gem. LT 600 ton	Gem. LT 1000 ton	Replicatie 1	Replicatie 2	Replicatie 3	Replicatie 4	Replicatie 5
31	+	+	+	+	472088,2	469517,2	472088,2	472088,2	475101,8
32	-	+	+	+	386429,2	385491,7	384554,2	385491,7	391116,7
33	+	-	+	+	401175,7	396510,8	396510,8	396510,8	400448,2
34	-	-	+	+	390179,2	385491,7	388304,2	384554,2	388304,2
35	+	+	-	+	434322,3	434322,3	435901,1	446393,7	435901,1
36	-	+	-	+	389241,7	391116,7	386429,2	386429,2	389241,7
37	+	-	-	+	396510,8	396510,8	400448,2	400448,2	402417,4
38	-	-	-	+	384554,2	387366,7	395804,2	389241,7	388304,2
39	+	+	+	-	465061,1	458323,8	458323,8	458323,8	465061,1
40	-	+	+	-	392054,2	385491,7	385491,7	392054,2	384554,2
41	+	-	+	-	360932,5	367249,2	364261,1	364261,1	360932,5
42	-	-	+	-	364261,1	364261,1	357454,2	364261,1	365197,1
43	+	+	-	-	435901,1	435901,1	446393,7	440551,1	434322,3
44	-	+	-	-	392054,2	387366,7	387366,7	388304,2	392054,2
45	+	-	-	-	360932,5	364261,1	364261,1	360932,5	360932,5
46	-	-	-	-	365197,1	357454,2	360456,8	364261,1	364261,1

Bijlage 10: Berekening hoofd- en interactie-effecten voor de eerste replicatie

Hoofdeffecten

Data	TK 25 ton	TK 1000 ton	LT 600 ton	LT 1000 ton	Resultaat	Data	TK 25 ton	TK 1000 ton	LT 600 ton	LT 1000 ton	Resultaat
31	+	+	+	+	472088,2	39	+	+	+	-	465061,1
32	-	+	+	+	386429,2	40	-	+	+	-	392054,2
33	+	-	+	+	401175,7	41	+	-	+	-	360932,5
34	-	-	+	+	390179,2	42	-	-	+	-	364261,1
35	+	+	-	+	434322,3	43	+	+	-	-	435901,1
36	-	+	-	+	389241,7	44	-	+	-	-	392054,2
37	+	-	-	+	396510,8	45	+	-	-	-	360932,5
38	-	-	-	+	384554,2	46	-	-	-	-	365197,1

Transportkost 25 ton e₁

$$\begin{aligned} &= (472088,2 + 386429,2 - 401175,7 + 390179,2 - 434322,3 + 389241,7 - 396510,8 + 384554,2 - 465061,1 + 392054,2 - 360932,5 + 364261,1 - \\ &435901,1 + 392054,2 - 360932,5 + 365197,1)/8 \\ &= 32869,163 \end{aligned}$$

Transportkost 1000 ton e₂

$$\begin{aligned} &= (472088,2 + 386429,2 - 401175,7 - 390179,2 + 434322,3 + 389241,7 - 396510,8 - 384554,2 + 465061,1 + 392054,2 - 360932,5 - 364261,1 + \\ &435901,1 + 392054,2 - 360932,5 - 365197,1)/8 \\ &= 42926,113 \end{aligned}$$

Gemiddelde levertermijn 600 ton e₃

$$\begin{aligned} &= (472088,2 + 386429,2 + 401175,7 + 390179,2 - 434322,3 - 389241,7 - 396510,8 - 384554,2 + 465061,1 + 392054,2 + 360932,5 + 364261,1 - \\ &435901,1 - 392054,2 - 360932,5 - 365197,1)/8 \\ &= 9183,413 \end{aligned}$$

Gemiddelde levertermijn 1000 ton e₄

$$\begin{aligned} &= (472088,2 + 386429,2 + 401175,7 + 390179,2 + 434322,3 + 389241,7 + 396510,8 + 384554,2 - 465061,1 - 392054,2 - 360932,5 - 364261,1 - \\ &435901,1 - 392054,2 - 360932,5 - 365197,1)/8 \\ &= 14763,438 \end{aligned}$$

Tweefactor interactie-effecten

Data	TK 25 * TK 1000: e ₁₂	TK 25 * LT 600: e ₁₃	TK 25 * LT 1000: e ₁₄	Resultaat	Data	TK 25 * TK 1000: e ₁₂	TK 25 * LT 600: e ₁₃	TK 25 * LT 1000: e ₁₄	Resultaat
31	+	+	+	472088,2	39	+	+	-	465061,1
32	-	-	-	386429,2	40	-	-	+	392054,2
33	-	+	+	401175,7	41	-	+	-	360932,5
34	+	-	-	390179,2	42	+	-	+	364261,1
35	+	-	+	434322,3	43	+	-	-	435901,1
36	-	+	-	389241,7	44	-	+	+	392054,2
37	-	-	+	396510,8	45	-	-	-	360932,5
38	+	+	-	384554,2	46	+	+	+	365197,1

$$e_{12} = (472088,2 - 386429,2 - 401175,7 + 390179,2 + 434322,3 - 389241,7 - 396510,8 + 384554,2 + 465061,1 - 392054,2 - 360932,5 + 364261,1 + 435901,1 - 392054,2 - 360932,5 + 365197,1)/8 = 29029,188$$

$$e_{13} = (472088,2 - 386429,2 + 401175,7 - 390179,2 - 434322,3 + 389241,7 - 396510,8 + 384554,2 + 465061,1 - 392054,2 + 360932,5 - 364261,1 - 435901,1 + 392054,2 - 360932,5 + 365197,1)/8 = 8714,288$$

$$e_{14} = (472088,2 - 386429,2 + 401175,7 - 390179,2 + 434322,3 - 389241,7 + 396510,8 - 384554,2 - 465061,1 + 392054,2 - 360932,5 + 364261,1 - 435901,1 + 392054,2 - 360932,5 + 365197,1)/8 = 5554,013$$

Data	TK 1000 * LT 600: e ₂₃	TK 1000 * LT 1000: e ₂₄	LT 600 * LT 1000: e ₃₄	Resultaat	Data	TK 1000 * LT 600: e ₂₃	TK 1000 * LT 1000: e ₂₄	LT 600 * LT 1000: e ₃₄	Resultaat
31	+	+	+	472088,2	39	+	-	-	465061,1
32	+	+	+	386429,2	40	+	-	-	392054,2
33	-	-	+	401175,7	41	-	+	-	360932,5
34	-	-	+	390179,2	42	-	+	-	364261,1
35	-	+	-	434322,3	43	-	-	+	435901,1
36	-	+	-	389241,7	44	-	-	+	392054,2
37	+	-	-	396510,8	45	+	+	+	360932,5
38	+	-	-	384554,2	46	+	+	+	365197,1

$$\begin{aligned}
 e_{23} &= (472088,2 + 386429,2 - 401175,7 - 390179,2 - 434322,3 - 389241,7 + 396510,8 + 384554,2 + 465061,1 + 392054,2 - 360932,5 - 364261,1 \\
 &- 435901,1 - 392054,2 + 360932,5 + 365197,1)/8 = 6844,938 \\
 e_{24} &= (472088,2 + 386429,2 - 401175,7 - 390179,2 + 434322,3 + 389241,7 - 396510,8 - 384554,2 - 465061,1 - 392054,2 + 360932,5 + 364261,1 \\
 &- 435901,1 - 392054,2 + 360932,5 + 365197,1)/8 = -15510,738 \\
 e_{34} &= (472088,2 + 386429,2 + 401175,7 + 390179,2 - 434322,3 - 389241,7 - 396510,8 - 384554,2 - 465061,1 - 392054,2 - 360932,5 - 364261,1 + \\
 &435901,1 + 392054,2 + 360932,5 + 365197,1)/8 = 2127,413
 \end{aligned}$$

Driefactor interactie-effecten

Data	TK 25 * TK 1000 * LT 600: e ₁₂₃	TK 25 * 1000 * LT 1000: e ₁₂₄	TK 25 * LT 600 * LT 1000: e ₁₃₄	TK 1000 * LT 600 1000: e ₂₃₄	Resultaat	Data	TK 25 * TK 1000 * LT 600: e ₁₂₃	TK 25 * 1000 * LT 1000: e ₁₂₄	TK 25 * LT 600 * LT 1000: e ₁₃₄	TK 1000 * LT 600 1000: e ₂₃₄	Resultaat
31	+	+	+	+	472088,2	39	+	-	-	-	465061,1
32	-	-	-	+	386429,2	40	-	+	+	-	392054,2
33	-	-	+	-	401175,7	41	-	+	-	+	360932,5
34	+	+	-	-	390179,2	42	+	-	+	+	364261,1
35	-	+	-	-	434322,3	43	-	-	+	+	435901,1
36	+	-	+	-	389241,7	44	+	+	-	+	392054,2
37	+	-	-	+	396510,8	45	+	+	+	-	360932,5
38	-	+	+	+	384554,2	46	-	-	-	-	365197,1

$$e_{123} = (472088,2 - 386429,2 - 401175,7 + 390179,2 + 389241,7 + 396510,8 - 384554,2 + 465061,1 - 392054,2 - 360932,5 + 364261,1$$

$$- 435901,1 + 392054,2 + 360932,5 - 365197,1)/8 = 9808,713$$

$$e_{124} = (472088,2 - 386429,2 - 401175,7 + 390179,2 + 434322,3 - 389241,7 - 396510,8 + 384554,2 - 465061,1 + 392054,2 + 360932,5 - 364261,1$$

$$- 435901,1 + 392054,2 + 360932,5 - 365197,1)/8 = -3247,610$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{e}_{134} &= (472088,2 - 386429,2 + 401175,7 - 390179,2 - 434322,3 + 389241,7 - 396510,8 + 384554,2 - 465061,1 + 392054,2 - 360932,5 + 364261,1 \\
 &+ 435901,1 - 392054,2 + 360932,5 - 365197,1)/8 = - 243,287 \\
 \mathbf{e}_{234} &= (472088,2 + 386429,2 - 401175,7 - 390179,2 - 434322,3 - 389241,7 + 396510,8 + 384554,2 - 465061,1 - 392054,2 + 360932,5 + 364261,1 \\
 &+ 435901,1 + 392054,2 - 360932,5 - 365197,1)/8 = 2592,763
 \end{aligned}$$

Vierfactor interactie-effecten

Data	TK 25 * TK 1000 * LT 600 * LT 1000	Resultaten	Data	TK 25 * TK 1000 * LT 600 * LT 1000	Resultaten
31	+	472088,2	39	-	465061,1
32	-	386429,2	40	+	392054,2
33	-	401175,7	41	+	360932,5
34	+	390179,2	42	-	364261,1
35	-	434322,3	43	+	435901,1
36	+	389241,7	44	-	392054,2
37	+	396510,8	45	-	360932,5
38	-	384554,2	46	+	365197,1

$$\begin{aligned}
 \mathbf{e}_{1234} &= (472088,2 - 386429,2 - 401175,7 + 390179,2 - 434322,3 + 389241,7 + 396510,8 - 384554,2 - 465061,1 + 392054,2 + 360932,5 - \\
 &364261,1 + 435901,1 - 392054,2 - 360932,5 + 365197,1)/8 = - 1664,313
 \end{aligned}$$

Bijlage 11: Statistische analyse van de hoofd- en interactie-effecten

Berekening gemiddelde

	Replicatie 1	Replicatie 2	Replicatie 3	Replicatie 4	Replicatie 5	Gemiddelde
Hoofdeffecten						
e1	32869,163	34819,475	36540,850	35614,000	34010,438	34770,785
e2	42926,113	41053,200	41131,000	43145,675	42069,488	42065,095
e3	9183,413	7254,700	3740,900	5122,925	7910,163	6642,420
e4	14763,438	15752,375	17003,875	16026,075	17940,038	16297,160
Interactie-effecten						
Twee-factor						
e12	29029,188	27329,925	30675,400	30655,375	29344,438	29406,865
e13	8714,288	7896,725	7304,050	5591,675	9082,413	7717,830
e14	5554,013	2029,100	923,275	6817,025	5214,987	4107,680
e23	6844,938	5274,700	7350,900	6447,000	8168,463	6817,200
e24	-15510,738	-12411,225	-16654,675	-13233,700	-14097,663	-14381,600
e34	2127,412	-330,975	1977,775	-1089,900	1866,462	910,155

	Replicatie 1	Replicatie 2	Replicatie 3	Replicatie 4	Replicatie 5	Gemiddelde
Interactie- effecten						
Drie-factor						
e123	8720,313	8382,675	5662,750	4572,000	9808,713	7429,290
e124	-2082,562	-562,950	363,425	194,100	-3247,613	-1067,120
e134	1190,288	2777,000	3102,125	1253,850	-243,287	1615,995
e234	-679,063	2586,525	4086,475	1898,475	2592,763	2097,035
Vier-factor						
e1234	1664,313	1353,550	2962,125	1898,475	15,013	1578,695

Berekening t-waarde

	Kwadratensom van de verschillen tussen de gegevens en het gemiddelde	Kwadratensom delen door (n-1)	Standaarddeviatie	t-waarde
Hoofdeffecten				
e1	8040808,810	2010202,202	1417,815997	54,83774977
e2	3805488,526	951372,1315	975,3830691	96,43432912
e3	19166384,095	4791596,024	2188,971453	6,785334104
e4	5921075,052	1480268,763	1216,662962	29,95205635
Interactie- effecten				
Twee-factor				
e12	7628175,517	1907043,879	1380,957595	47,61605236
e13	7578765,342	1894691,336	1376,477873	12,53750086
e14	25119487,950	6279871,987	2505,967276	3,665272008
e23	4627869,693	1156967,423	1075,624202	14,17197809
e24	11722494,004	2930623,501	1711,906394	-18,785043
e34	9076676,000	2269169	1506,376115	1,351036059

	Kwadratensom van de verschillen tussen de gegevens en het gemiddelde	Kwadratensom delen door (n-1)	Standaarddeviatie	t-waarde
Interactie- effecten				
Drie-factor				
e123	19522103,203	4880525,801	2209,19121	7,519673893
e124	9676993,288	2419248,322	1555,393301	-1,534115428
e134	7325822,278	1831455,57	1353,312813	2,670095662
e234	12189361,131	3047340,283	1745,663279	2,686149653
Vier-factor				
e1234	4519261,401	1129815,35	1062,927726	3,321081246

Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen en uw akkoord te verlenen.

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

Bepaling van optimale verzendingsstrategieën bij verschillende transportalternatieven

Richting: **Handelsingenieur**

Jaar: **2006**

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

Deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt houdt in dat ik/wij als auteur de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij kan reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

U bevestigt dat de eindverhandeling uw origineel werk is, en dat u het recht heeft om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. U verklaart tevens dat de eindverhandeling, naar uw weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

U verklaart tevens dat u voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen hebt verkregen zodat u 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 u als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze licentie

Ik ga akkoord,

Mieke BERGHMANS

Datum: