

2011  
2012

## BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

### Masterproef

*Invloed van de onzekerheid van levertijd via  
verschillende transportmodi op de voorraadbeslissingen  
en op de keuze van transportmiddel door bedrijven*

Promotor :  
Prof. dr. Gerrit JANSSENS

### Wim Nullens

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

2011  

---

2012

# BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

## Masterproef

*Invloed van de onzekerheid van levertijd via  
verschillende transportmodi op de voorraadbeslissingen  
en op de keuze van transportmiddel door bedrijven*

Promotor :  
Prof. dr. Gerrit JANSSENS

## Wim Nullens

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

## Woord vooraf

Deze eindverhandeling vormt het sluitstuk van mijn studies Handelsingenieur aan de Universiteit Hasselt, campus Diepenbeek. Het onderwerp werd aangebracht door mijn promotor professor dr. Gerrit K. Janssens en sluit aan bij mijn afstudeerrichting Operationeel Management en Logistiek. Gedurende mijn opleiding werd het onderwerp 'voorraadbeheer' en 'keuze van transportmiddel' in verscheidene cursussen behandeld. De onzekerheid van de levertijden in het vrachtvervoer zorgt voor problemen bij het bepalen van de optimale voorraadbeslissingen en de keuze van het transportmiddel. Bovendien wordt in de praktijk eveneens gezocht naar manieren om de totale logistieke kost te minimaliseren, rekening houdend met deze onzekerheid. Vandaar leek het mij interessant om dit onderwerp te bestuderen. Het is dan ook met veel voldoening dat ik gewerkt heb aan deze eindverhandeling.

Het onderzoek behandelt de invloed van de onzekerheid van de levertijd op enerzijds het voorraadbeheer en anderzijds op de keuze van het transportmiddel door bedrijven. In de eerste hoofdstukken wordt de theorie over dit onderwerp beschreven in een uitgebreide literatuurstudie. Daarna wordt dieper ingegaan op enkele simulatiemodellen. Echter zonder de hulp van een aantal personen was het vervullen van deze opdracht zeer moeilijk, zo niet onmogelijk geweest.

Graag zou ik mijn ouders willen bedanken, omdat ze mij de mogelijkheid hebben geboden deze studies te volgen en mij daarin altijd gesteund hebben. Daarnaast wil ik mijn promotor bedanken voor alle geleverde inspanningen en de nuttige aanwijzingen tijdens de uitwerking van deze eindverhandeling. Verder wil ik ook nog een woord van dank richten tot de heer L. Bruneel, R. Deckers en W. Bijmens voor hun bijdrage. Tenslotte wens ik mijn studiegenoten te bedanken voor hun steun en aanmoediging tijdens het schrijven van deze eindverhandeling.

## Samenvatting

Deze eindverhandeling handelt over de onzekerheid van de levertijden in het vrachtvervoer. Sommige logistieke modellen veronderstellen een deterministische levertijd, terwijl dit in de realiteit zelden het geval is. Deze onzekerheid is het gevolg van diverse factoren, gaande van inefficiënte uitwisseling van informatie en verkeersopstoppingen tot slechte weersomstandigheden. In deze eindverhandeling wordt onderzocht wat de invloed is van de onzekerheid van de levertijd op enerzijds het voorraadbeheer en anderzijds op de keuze van het transportmiddel door bedrijven.

Het eerste deel van deze eindverhandeling omvat een literatuurstudie. In een inleidend hoofdstuk wordt er kort ingegaan op de probleemstelling en centrale onderzoeksvraag. Hoofdstuk twee bespreekt de verschillende transportmodi en hun invloedrijke factoren. Eerst komen de verschillende transportmodi aan bod. Vervolgens worden de belangrijkste factoren bij de keuze van het transportmiddel besproken. Deze bespreking laat toe dat begrippen zoals de vraag tijdens de levertijd vertrouwd worden gemaakt.

Het derde hoofdstuk gaat dieper in de totale logistieke kost. De totale logistieke kost heeft verschillende definities en omschrijvingen, afhankelijk van welke componenten er worden opgenomen in het model. Deze componenten worden vervolgens kort besproken. Bij de belangrijkste componenten wordt iets langer stilgestaan. Deze zijn de transportkost, de voorraadkost, de bestelkost en de tekortkost. Deze componenten worden ook opgenomen in het 'inventory-theoretic' model dat op het einde van dit hoofdstuk wordt toegelicht.

In hoofdstuk vier wordt de invloed van de onzekerheid van de levertijd op de voorraadbeslissingen en -beheer onderzocht. Dit effect werd al door verschillende academici en onderzoekers doorheen verscheidene decennia geanalyseerd. Op basis van deze onderzoeken is het mogelijk om enkele klassieke bevinden te formuleren. Ten eerste moet er rekening worden gehouden met de levertijdvariabiliteit bij het bepalen van de optimale voorraadpolitiek. Ten tweede zorgt een stijging van de levertijd-onzekerheid of levertijdvariabiliteit enerzijds voor een stijging van de voorraadkost en van de totale logistieke kost en anderzijds voor een stijging van de bestelhoeveelheid en de nodige veiligheidsvoorraad. Het zorgt ook voor een daling van het serviceniveau en een stijging van de tekortkost. Ten derde heeft de gemiddelde levertijd weinig of zelfs geen invloed op het optimale voorraadbeheer en totale kost van de toeleveringsketen. De gemiddelde levertijd heeft wel een invloed op het bestelpunt en de veiligheidsvoorraad. Hoewel de impact van de gemiddelde levertijd op deze laatste factor minder groot is als de levertijdvariabiliteit.

Vervolgens wordt een studie besproken die deze klassieke bevinden tegenspreekt en aanhaalt dat een stijging van de levertijdvariabiliteit zorgt voor een daling van de veiligheidsvoorraad. Het

hoofdstuk sluit af met twee recente studies die dit laatste onderzoek tegenspreken en aanhalen dat de klassieke bevinden die hierboven werden geformuleerd wel degelijk correct zijn.

In hoofdstuk vijf wordt de invloed van de onzekerheid van de levertijd op de prestaties van een *supply chain* onderzocht. Het model van de onderzochte toeleveringsketen bestaat uit vier niveaus: een leverancier, een fabrikant, een verdeler en een kleinhandelaar. Daarna worden er verschillende hypothesen opgesteld die vervolgens worden geanalyseerd. Hieruit blijkt onder andere dat de levertijd-variabiliteit meer invloed heeft op de prestaties van de toeleveringsketen dan de gemiddelde levertijd. Verder zorgt de levertijdvariabiliteit ook voor variantie van de bestelhoeveelheden en veroorzaakt het fluctuaties van het voorraadniveau in de gehele keten.

Hoofdstuk zes behandelt de invloed van de onzekerheid van de levertijd op de keuze van het transportmiddel. Allereerst wordt de monetaire waardering van de levertijd-onzekerheid besproken. Uit verschillende studies blijkt dat er een hoge bereidheid is bij ondernemingen om meer te betalen voor de kwaliteit een transportmiddel. Dit vooral voor de betrouwbaarheid, maar voor ook snelheid (gemiddelde levertijd) en veiligheid (verlies en schade). Vervolgens wordt er een analyse gemaakt tussen de kost en de betrouwbaarheid van de transportmodi. Een recente studie toont aan dat de gemiddelde betrouwbaarheid van het spoorvervoer en binnenvaart relatief laag is en de spreiding van de betrouwbaarheidsniveaus voor deze transportmodi relatief groot zijn. Vanuit het standpunt van betrouwbaarheid is het wegtransport bijgevolg een 'logische' keuze. Ten slotte wordt wel vermeld dat de betrouwbaarheid van het spoorvervoer de laatste drie à vijf jaar sterk is toegenomen.

Het laatste hoofdstuk van de literatuurstudie geeft aan hoe ondernemingen de problemen, veroorzaakt door de onzekerheid van de levertijd, kunnen omzeilen door het splitsen van leveringen. De volledige bestelling wordt geplaatst bij één leverancier, die de bestelling vervolgens levert in verschillende verzendingen. Een andere mogelijkheid bestaat erin om gebruik te maken van een (flexibele) back-up leverancier, met als doel de kosten en de prestaties van verschillende transportmodi of leveranciers te benutten.

In het tweede deel van deze eindverhandeling volgt een praktijkonderzoek. Het doel is om de resultaten van het praktijkonderzoek te vergelijken met de stellingen, hypothesen en bevindingen van de literatuurstudie. Dit praktijkonderzoek bestaat uit drie delen. In het eerste deel wordt er gebruik gemaakt van spreadsheetsoftware om een sensitiviteitsanalyse uit te voeren. Het tweede deel van het praktijkonderzoek gebeurt uitsluitend aan de hand van simulaties in een simulatiesoftware. In het derde deel wordt een interview met logistieke manager besproken. In dit interview werd gepolst naar de bevindingen en ervaringen van de manager in verband met de onzekerheid van de levertijd en welke gevolgen dit heeft voor het voorraadbeheer en keuze van transportmiddel.

Uit de praktijkstudie blijkt dat de stijging van de levertijdonzekerheid zorgt voor een stijging van de voorraadkost en van de totale logistieke kost. Daarnaast zorgt een hogere levertijd-variabiliteit ook voor een stijging van de bestelhoeveelheid en veiligheidsvoorraad. Uit het interview blijkt wel dat een stijging van de bestelhoeveelheid, als gevolg van een hogere onzekerheid, niet bevestigd kan worden in de realiteit. Ook het effect van de gemiddelde levertijd op de totale logistieke kost is niet eenduidig. De stelling dat een hogere levertijdonzekerheid zorgt voor een daling van het serviceniveau en een stijging van de tekortkost wordt wel bevestigd in deze praktijkstudie.

# Inhoudstafel

Woord vooraf .....	
Samenvatting.....	
Inhoudstafel.....	
Lijst van gebruikte symbolen (praktijkonderzoek).....	
1. Probleemstelling.....	- 1 -
1.1 Praktijkprobleem .....	- 1 -
1.2 Centrale onderzoeksvraag.....	- 2 -
1.3 Deelvragen .....	- 2 -
2. Transportmodi en invloedrijke factoren .....	- 5 -
2.1 Transportalternatieven .....	- 5 -
2.2 Belangrijke factoren bij transport keuze .....	- 6 -
2.2.1 Levertijd en haar betrouwbaarheid .....	- 7 -
2.2.2 De vraag tijdens de levertijd.....	- 8 -
3. De totale logistieke kost en zijn componenten.....	- 11 -
3.1 Inleiding .....	- 11 -
3.2 Componenten.....	- 12 -
3.2.1 Transportkosten .....	- 12 -
3.2.2 Voorraadkosten .....	- 13 -
3.2.4 Stockbreuk kosten .....	- 14 -
3.2.5 Bestelkosten .....	- 14 -
3.3 Het 'Inventory-theoretic' model .....	- 15 -
4. Invloed van de onzekerheid van levertijd op voorraadbeslissingen en -beheer .....	- 17 -
4.1 Het effect van levertijd-onzekerheid in diverse voorraadmodellen .....	- 17 -
4.2 Het effect van de levertijd-onzekerheid op de veiligheidsvoorraad.....	- 20 -
4.2.1 Effect van de levertijd-onzekerheid: de normale verdeling.....	- 21 -
4.2.2 Effect van levertijd-onzekerheid: de exacte verdeling.....	- 21 -
4.2.3 Numerieke analyse en resultaten .....	- 22 -
4.2.4 Het bepalen van de grenswaarden van het recursief gedrag .....	- 24 -
4.3 De impact van een stochastische levertijd: het gemiddelde of de variantie .....	- 26 -

4.4	Besluit.....	- 27 -
5	Invloed van de onzekerheid van levertijd op de prestaties van de supply chain.....	- 29 -
5.1	Model van de toeleveringsketen.....	- 29 -
5.2	Het structureel model en de hypothesen .....	- 30 -
5.3	Toetsen van de hypothesen .....	- 31 -
5.4	De invloed van een onzekere levertijd: het gemiddelde of de variatie .....	- 32 -
5.4.1	Invloed van gemiddelde en variantie op prestatie maatstaven.....	- 33 -
5.4.2	Canonieke correlatie analyse .....	- 34 -
5.5	Besluit.....	- 35 -
6.	Invloed van de onzekerheid van levertijd op keuze van transportmiddel.....	- 37 -
6.1	Monetaire waardering van de levertijd-onzekerheid .....	- 38 -
6.2	Transportmodi: kost en betrouwbaarheid.....	- 41 -
6.2.1	Transportportfolio: betrouwbaarheidsprestatie in de praktijk.....	- 43 -
6.2.2	Betrouwbaarheid intermodaal transport: praktijkstudie Verenigd Koninkrijk .....	- 44 -
6.3	Besluit.....	- 44 -
7.	Reductie van de levertijd-onzekerheid: het splitsen van leveringen .....	- 47 -
7.1	Definitie en omschrijving van een gesplitste bestelling .....	- 47 -
7.2	Invloed van gesplitste levering op levertijd-onzekerheid .....	- 49 -
7.3	Flexible back-up levering.....	- 50 -
7.3.1	Model en analyse .....	- 50 -
7.3.2	Factoren die de flexibele back-up levering beïnvloeden .....	- 53 -
8.	Onderzoek naar het effect van de prestaties aangaande levertijd op de logistieke kost.....	- 55 -
	Scenario 1: de normaalverdeling.....	- 57 -
	Scenario 2: de Gamma verdeling .....	- 62 -
	Scenario 3: 'distributie-vrije' benadering.....	- 65 -
	Scenario 4: de exponentiële verdeling.....	- 69 -
	Scenario 5: de Poissonverdeling.....	- 70 -
9.	Simulatie met Arena.....	- 73 -
	Deel A: simulatie van een buyer-vendor systeem.....	- 73 -
	Scenario 1: geen veiligheidsvoorraad .....	- 76 -
	Scenario 2: veiligheidsvoorraad .....	- 81 -



Deel B: invloed van de onzekerheid van de levertijd op keuze van het transportmiddel .....	- 86 -
Scenario 1 .....	- 88 -
Scenario 2 .....	- 91 -
10. Interview H. Essers .....	- 95 -
Conclusies .....	- 101 -
Lijst van geraadpleegde werken .....	- 105 -
Bijlages .....	- 109 -

## Lijst van gebruikte symbolen (praktijkonderzoek)

$Q$	= de totale bestelhoeveelheid
$s$	= het bestelpunt
$ss$	= de veiligheidsvoorraad
$\mu_L$	= gemiddelde vraag tijdens de levertijd
$\sigma_L$	= standaardafwijking van de vraag tijdens de levertijd
$\mu_T$	= verwachte levertijd
$\sigma_T$	= standaardafwijking van de verwachte levertijd
$\mu_D$	= gemiddelde vraag per tijdseenheid
$\sigma_T$	= standaardafwijking van de vraag per tijdseenheid
$P_1$	= $P_1$ -serviceniveau
$P_2$	= $P_2$ -serviceniveau
TLC	= de totale jaarlijkse logistieke kost van een transportmiddel
ETAC	= de totale jaarlijkse logistieke kost in een continu ( $s, Q$ ) voorraadmodel
$f(x)$	= de kansdichtheidsfunctie van de vraag tijdens de levertijd
$ES$	= het verwachte aantal eenheden tekort per aanvulcyclus
$v$	= waarde van het product
$w$	= gewicht van het product
$h$	= voorraadkost per eenheid per jaar (magazijn)
$Y$	= voorraadkost per eenheid per jaar (in-transit)
$A$	= bestelkost per bestelling
$B_2$	= tekortkost per eenheid
$\Psi(k)$	= $\phi(k) - k[1 - \Phi(k)]$
$\phi(k)$	= standaard normale kansverdeling
$\Phi(k)$	= cumulatieve verdelingsfunctie
$C_t$	= totale jaarlijkse transportkost
$C_h$	= totale jaarlijkse voorraadkost

- $C_o$  = totale jaarlijkse bestelkost
- $C_s$  = totale jaarlijkse tekortkost
- $y$  = totale jaarlijkse vraag
- $s_p$  = instelkost *vendor*
- $s_s$  = verzendingskost
- $s_b$  = instelkost *buyer*
- $c$  = variabele productiekost
- $w$  = verkoopprijs *buyer*
- $p$  = verkoopprijs *vendor*
- $\alpha$  = discontovoet
- $R$  = productieritme *vendor*
- $O$  = aantal bestellingen/productie-runs per jaar (Arena output)
- Avg = gemiddelde jaarlijkse voorraadkost (Arena output)

# **1. Probleemstelling**

## **1.1 Praktijkprobleem**

Sommige logistieke modellen veronderstellen een deterministische of vaste levertijd. In de realiteit is dit bijna nooit het geval en heerst er vaak onzekerheid rond de levertijden van het vrachtvervoer. Deze onzekerheid is het gevolg van diverse factoren, gaande van inefficiënte uitwisseling van informatie en verkeersopstoppingen tot slechte weersomstandigheden. Normaal gezien heeft een levering een bepaalde verwachte duur, maar de werkelijke levertijd kan afwijken van deze verwachte levertijd. Dit heeft als gevolg dat bedrijven moeilijkheden krijgen met het bepalen van de optimale voorraadpolitiek en de keuze van het transportmiddel. Dit zijn twee belangrijke elementen van de logistieke keten, aangezien ze een groot deel uitmaken van de totale logistieke kost.

Traditioneel wordt voorraadbeheer gezien als een belangrijke activiteit in de onderneming. Dit omvat allerlei taken zoals coördinatie en beheersen van de doorstroom van voorraad in, door en uit een organisatie. Veel bedrijven zien het aanhouden van een voorraad echter als een verspilling. Het voegt geen waarde toe en vereist enkel geld, tijd en ruimte. Daarom dat ondernemingen voorraden liefst zo klein mogelijk wil houden, maar tegelijk een zeker niveau van kwaliteit en service willen aanbieden aan de klant. Door de aanhoudende concurrentie en de productvariëteit zijn managers constant op zoek naar nieuwe technieken en gebieden voor verbetering om de voorraad te reduceren, zonder dat de service van de klant in het gedrang komt. Bij het verlagen van het voorraadniveau wordt er vooral gezocht naar opportuniteiten om de veiligheidsvoorraad, die vaak een groot deel van de voorraadkost bedraagt, te reduceren (Chopra et al. 2004).

Een onderneming heeft een ruime keuze van transportmogelijkheden. Welk transportmiddel een onderneming gebruikt hangt onder meer af van de bestelhoeveelheid, de afstand, de snelheid en de betrouwbaarheid van de levering. De belangrijkste transportmiddelen zijn het wegvervoer, vervoer via het spoor, het luchtvervoer, de zee- en binnenvaart en het vervoer via pijpleiding. In deze eindverhandeling wordt onderzocht of de keuze van het transportmiddel beïnvloedt wordt door de onzekerheid van de levertijden. Kiezen bedrijven voor een alternatieve transportmodus als de onzekerheid van het huidige transportmiddel toeneemt? In welke mate waarderen ondernemingen betrouwbare levertijden en zijn ondernemingen bereid om meer te betalen voor een betrouwbaar transportalternatief? Een bedrijf kiest het transportmiddel meestal op basis van de vrachtprijs, de gemiddelde levertermijn, de betrouwbaarheid of de variabiliteit in de levertermijn en de kans op verlies of schade. De beschikbaarheid, toegankelijkheid, flexibiliteit, frequentie, wetgeving en milieubeschouwingen zijn secundaire factoren waar een bedrijf rekening mee houdt. Het is ook belangrijk voor een onderneming om bij de keuze van een transportmiddel rekening te

houden met alle andere kosten binnen de gehele logistieke keten, waar dit transportmiddel een invloed op heeft. De hoge voorraadkosten zorgen ervoor dat bedrijven soms andere en duurdere transportbeslissingen nemen om de voorraad beperkt te houden. Dit kan onder andere bereikt worden door één bestelling op te splitsen in meerdere leveringen. Dit wordt in de literatuur *multiple deliveries* of splitsen van leveringen genoemd. Deze principes zorgen ervoor dat de voorraadkost daalt. De andere zijde van het verhaal is dat de totale transportkosten stijgen, aangezien er meerdere leveringen gebeuren. Wegen de verlaagde voorraadkosten op tegen de verhoogde transportkosten of zal de totale kost stijgen? In heel dit verhaal van geïntegreerde transport- en voorraadbeslissingen moet in de realiteit dan nog eens rekening worden gehouden met de onzekerheid van de levertijd. Dit creëert een complexe omgeving en heeft een negatieve invloed op de prestaties van bedrijven.

Deze eindverhandeling heeft onder meer als doel een duidelijker inzicht te scheppen op de invloed van de onzekerheid van de levertijd op enerzijds het voorraadbeheer en voorraadbeslissingen en anderzijds op de keuze van het transportmiddel door bedrijven. De beslissing die een onderneming uiteindelijk neemt is deze die de totale logistieke kost minimaliseert en niet slechts één deel van de kosten, rekening houdend met de onzekerheid rond de levertermijn.

## **1.2 Centrale onderzoeksvraag**

De centrale onderzoeksvraag van deze masterproef luidt als volgt:

*"Wat is de invloed van de onzekerheid van de levertijd via verschillende transportmodi op de voorraadbeslissingen en op de keuze van het transportmiddel door bedrijven?"*

Er moet onderzocht worden of de levertijdonzekerheid wel effectief een invloed heeft op de voorraadbeslissingen en de keuze van transportmiddel. Wat houdt de invloed van de onzekerheid van levertijd in en hoe pakken bedrijven dit aan. In deze masterproef wordt dit concept uitgewerkt aan de hand van theoretische modellen die de werkelijkheid zo nauwkeurig mogelijk benaderen.

## **1.3 Deelvragen**

Om deze uitgebreide centrale onderzoeksvraag beter te kunnen beantwoorden wordt ze opsplitst in verschillende deelvragen. Deze deelvragen werden afgeleid uit het praktijkprobleem en de centrale onderzoeksvraag. De eerste deelvraag houdt verband met de onzekerheid van de levertijd. Zoals aangehaald in het praktijkprobleem is er een verwachte levertijd, maar kan de werkelijke levertijd

hiervan afwijken. Indien het mogelijk is om een verdeling op te stellen van de werkelijke levertijden, kan deze gebruikt worden in de theoretische modellering.

- *"Is er een optimale statistische verdeling van de levertijd in een onzekere omgeving en hoe wordt deze bepaald?"*

Er wordt ook onderzocht in welke mate deze onzekerheid de voorraadbeslissingen van een onderneming beïnvloed ongeacht het gekozen transportmiddel. Daarnaast wordt er ook onderzocht in welke mate de levertijdonzekerheid een invloed heeft op de keuze van het transportmiddel. De tweede en derde deelvraag luiden dus als volgt:

- *"Wat is de invloed van de onzekerheid van de levertijd op de voorraadbeslissingen van een bedrijf?"*
- *"Wat is de invloed van de onzekerheid van de levertijd op de keuze van het transportmiddel?"*

De vierde deelvraag houdt verband met de vorige deelvraag. Er wordt nu ook onderzocht of er verschillen zijn in de betrouwbaarheid van de diverse transportmodi.

- *"Bestaan er significante verschillen in de onzekerheid van de levertermijn voor de verschillende transportmiddelen?"*

Vervolgens wordt ook onderzocht hoe de invloed van deze onzekerheid op de totale logistieke kost eventueel gereduceerd kan worden. De transport- en voorraadkost zijn immers componenten van de totale logistieke kost. Daarom wordt er gezocht naar methodes die de totale logistieke kost minimaliseren, rekening houdend met onzekerheid van de levertijd. Om deze totale logistieke kost te kunnen berekenen, zullen diverse modellen aan bod komen. De vijfde en zesde deelvraag worden als volgt geformuleerd:

- *"Met behulp van welke modellen kan de totale logistieke kost worden berekend?"*
- *"Hoe kan het effect van de onzekerheid van de levertijd op de totale logistieke kost worden geminimaliseerd?"*

De zevende deelvraag is eerder afgeleid vanuit het praktijkprobleem. Hier wordt nagegaan of het mogelijk is om gevolgen van de onzekerheid van levertijd te reduceren door het splitsen van leveringen, eventueel via verschillende transportmodi. Het is dus een methode om de onzekerheid van de levertijd te verlagen. De zevende deelvraag luidt als volgt:

- *"Kan het splitsen van leveringen ervoor zorgen dat de gevolgen van de onzekerheid van de levertijd worden gereduceerd?"*



## 2. Transportmodi en invloedrijke factoren

In dit hoofdstuk worden de verschillende transportalternatieven en hun belangrijkste factoren besproken. Vervolgens wordt er dieper ingegaan op de statistische verdelingen van de vraag per tijdseenheid en de levertijd. Deze bespreking laat toe dat begrippen zoals de vraag tijdens de levertijd vertrouwd worden gemaakt.

### 2.1 Transportalternatieven

Zoals aangehaald in het praktijkprobleem heeft een onderneming een ruime keuze aan transportmogelijkheden. Welk transportmiddel een onderneming gaat gebruiken hangt onder meer af van de bestelhoeveelheid, de afstand, de snelheid, betrouwbaarheid en andere kwalitatieve attributen van het transportmiddel. De vijf belangrijkste transportmiddelen zijn (Blauwens et al., 2008):

- het wegvervoer
- vervoer per spoor
- vervoer via zee- en binnenvaart
- vervoer via pijpleiding
- het luchtvervoer

Uit de vijf bovenvermelde transportmodi kiest de gebruiker deze transportdienst of combinatie van transportdiensten die de beste balans geeft tussen de prijs en kwaliteit. Welke transportmodus heeft de beste combinatie en is deze verschillend naargelang de omstandigheden? Hebben het type van goederen en de ordergrootte van de bestelhoeveelheid ook een invloed op het transportalternatief? Wat zijn hun voor- en nadelen? Dit wordt hieronder kort besproken

Het vrachtvervoer via weg transporteert vooral half-afgewerkte en afgewerkte producten met een hoge waarde (*high-valued goods*). De verzendingen gebeuren in kleinere hoeveelheden en hebben vaak een korte levertermijn. Het voordeel van het wegvervoer is dat bedrijven goederen kunnen leveren aan deur en dus geen voor- en/of natransport nodig hebben. Het vervoer met een vrachtwagen is over het algemeen vrij betrouwbaar, hoewel de levertijd-onzekerheid sterk afhangt van de verkeerscongestie en weersomstandigheden. De vrachtprijs bij wegvervoer is wel significant hoger dan de andere transportmiddelen (met uitzondering van luchtvervoer).

Het vrachtvervoer via spoor wordt in principe gebruikt voor het vervoeren van bulkgoederen in grote hoeveelheden over lange(re) afstanden. De bulkgoederen hebben doorgaans een lage waarde (*low-valued goods*). Verder heeft het vrachtvervoer via spoorweg een relatief lange



levertijd en is de betrouwbaarheid vooral afhankelijk van weercondities, wachttijden in terminals en in sommige gevallen van de nationale regelgeving. Als de verzender niet gelegen is langs een spoor, moet eveneens rekening worden gehouden met het feit dat er voor- en/of natransport over de weg moet gebeuren.

Vrachtvervoer via het water wordt in principe ook gebruikt voor het transporteren van grote hoeveelheden over lange(re) afstanden. De binnenvaart heeft slechts een beperkte reikwijdte. Verder heeft de binnenvaart ook een relatief lange levertijd en is haar betrouwbaarheid sterk afhankelijk van de wachttijden in terminals en sluisen. De zeevaart wordt gebruikt voor het transporteren van zeer grote hoeveelheden over zeer lange afstanden en de betrouwbaarheid is sterk afhankelijk van weersomstandigheden en wachttijden in terminals en havens.

Pijpleiding is een vorm van transport via holle buizen of leidingen die boven, onder de grond of op de zeebodem liggen. Het heeft echter een zeer beperkt aanbod van diensten en mogelijkheden. Het wordt voornamelijk gebruikt om ruwe olie, geraffineerde aardolieproducten of om gas te vervoeren op een veilige en milieubewuste manier. Deze transportmodus heeft ook een grote capaciteit.

Het luchtvervoer transporteert meestal producten met een hoge waarde over matige tot zeer lange afstanden. Het transportnetwerk bestaat uit een hub-en-spoke netwerk, waardoor voor- en/of natransport noodzakelijk is. Luchtvervoer wordt soms gebruikt bij leveringen in noodgevallen. Hier is het dan voordeliger om de extra transportkosten te betalen, dan de productie stil te leggen. Het wordt ook gebruikt bij levering van bederfelijke goederen. De levertijd van deze vervoerswijze is in vergelijking met de afgelegde weg zeer kort. De betrouwbaarheid van de levertijd is in grote mate afhankelijk van weercondities of eventuele mechanische defecten (Ballou, 1999, p. 143-144).

## **2.2 Belangrijke factoren bij transport keuze**

De vier belangrijkste factoren voor de keuze van transportmiddel zijn:

- de vrachtprijs van het transportmiddel
- de gemiddelde levertermijn
- de betrouwbaarheid of variabiliteit van de levertijd
- de kans op verlies en schade

Er zijn ook nog een aantal andere, meer kwalitatieve factoren waarmee een onderneming rekening dient te houden. Deze zijn onder meer de beschikbaarheid, toegankelijkheid, de frequentie, de wetgeving en milieubeschouwingen. Het is ook belangrijk voor een onderneming om bij de keuze

van transportmiddel rekening te houden met alle andere kosten binnen de gehele logistieke keten, waar dit transportmiddel een invloed op heeft (Ballou, 1992 & Dullaert et al, 2007).

In deze eindverhandeling wordt de invloed van de onzekerheid van de levertijd op enerzijds het voorraadbeheer en anderzijds op de keuze van het transportmiddel door bedrijven onderzocht. Daarom wordt nu de gemiddelde levertijd en haar betrouwbaarheid kort toegelicht. Deze bespreking laat ook toe dat begrippen zoals de vraag tijdens de levertijd vertrouwd geraken.

### **2.2.1 Levertijd en haar betrouwbaarheid**

De volgende twee karakteristieken die belangrijk zijn bij de keuze van transportmiddel zijn de gemiddelde levertijd en haar betrouwbaarheid. Deze levertijd wordt in de literatuur omschreven als de *lead time*. Ze wordt, afhankelijk van de literatuur of context, niet altijd eenduidig gedefinieerd. De levertijd wordt hier omschrijven als de tijd tussen het moment dat de beslissing plaatsvindt en het ogenblik dat de levering bij de onderneming aankomt. Het omvat dus duidelijk meer als enkel de vervoertijd. De voorbereidingstijd, de verzendingstijd en de productie kan tot 40% en meer van de totale levertijd bedragen (Tyworth, 1991, p. 311).

In de literatuur wordt de levertijd vaak beschouwd als een deterministische of stochastische variabele. In het eerste geval is de levertijd een constante en is met zekerheid gekend. In de realiteit is dit echter zelden het geval en zullen door verscheidene controleerbare en niet controleerbare factoren zoals het weer, verkeersopstoppingen, wachttijden bij terminals of havens, opstoppingen of consolidatie van goederen en slechte uitwisseling van informatie niet alle verzendingen met dezelfde herkomst, bestemming en transportmiddel dezelfde levertijd hebben. De variabiliteit in de levertijd is een maatstaaf voor de onzekerheid of betrouwbaarheid van de levertijd. De onzekerheid van de levertijd geeft aan in welke mate de werkelijke levertijd afwijkt van de verwachte levertijd. Bij een levering met een hoge betrouwbaarheid of lage onzekerheid zal de werkelijke levertijd niet veel verschillen van de verwachte levertijd en vice versa. In deze masterproef wordt de levertijd zoveel mogelijk benaderd door een stochastische variabele. Het is van belang om de invloed van de stochastische levertijd op de prestaties van bepaalde voorraad- en transportmodellen te onderzoeken.

Er zijn verschillende verdelingen om de levertijd voor te stellen. De meest gebruikte continue verdelingen om de levertijd te beschrijven zijn de **normaalverdeling** en de **Gammaverdeling**. De verdeling die het eerst werd gebruikt om de levertijd voor te stellen is de normaalverdeling. Deze verdeling werd later echter soms weerlegd, omdat ze iets te simplistisch zou zijn. Door de symmetrische vorm zou ze de werkelijkheid niet zo goed beschrijven. Bagchi et al. (1984) en Tyworth (1991) vermelden dat de Gamma verdeling de werkelijkheid beter zou beschrijven. Deze

verdeling heeft een aantal interessante karakteristieken om de levertijd te modelleren. Ten eerste is deze verdeling enkel gedefinieerd voor positieve waarden (in tegenstelling tot de normaalverdeling). Ten tweede kan ze verschillende vormen aannemen, afhankelijk van de schaal ( $\beta$ ) en vorm ( $\alpha$ ) parameter. Ten derde is de verdeling wiskundig vrij goed te integreren in het voorraadbeheer en heeft deze verdeling enkel een rechts scheve verdeling. Daarnaast zijn er ook nog andere verdelingen die regelmatig worden gebruikt om de levertijd te modelleren. Deze zijn de **Poisson, Exponentiële en Erlang verdeling**.

### 2.2.2 De vraag tijdens de levertijd

In deze sectie wordt de vraag tijdens de levertijd (*demand during lead time*) besproken in een onzekere omgeving. Een onderneming heeft de vraag tijdens de levertijd nodig om de veiligheidsvoorraad te berekenen en is opgebouwd uit twee parameters, namelijk de *vraag per periode* en de *levertijd*. Volgens Bagchi et al. (1984, 1985), Silver en Peterson (1985) en Tyworth (1991) zijn er twee manieren om de vraag tijdens de levertermijn te modelleren. De eerste methode bestaat erin om de vraag tijdens de levertijd rechtstreeks te bepalen aan de hand van historische data. Deze methode heeft echter bepaalde theoretische en praktische beperkingen waardoor ze meestal niet gebruikt wordt. Een andere methode is om de levertijd en de vraag per periode individueel te modelleren en dan een samengestelde statistische verdeling van de vraag tijdens de levertijd te maken. Dit wordt ook wel de convolutie methode genoemd. Om de vraag tijdens de levertijd te modelleren is er dus informatie nodig over de verdeling van de achterliggende componenten.

Een statistische verdeling van de vraag tijdens de levertijd is al in veel studies aangehaald en zelfs met de procedure van een samengestelde verdeling is dit geen makkelijke taak (vernimmen, 2008). In dit opzicht stelt Tadikamalla (1979) vast dat ondanks een mogelijkheid van verschillende verdelingen voor de vraag en levertijd er zelden een samengestelde verdeling bestaat die de vraag tijdens de levertijd correct modelleert. Er is geen algemene statistische verdeling die een goede 'fit' heeft. Als gevolg wordt deze procedure dan ook vaak overgeslagen. In plaats daarvan wordt er aangenomen dat de vraag tijdens de levertijd een bepaalde vertrouwde verdeling volgt, meestal de normaalverdeling (Tyworth, 1991). Indien het gemiddelde en de variantie van zowel de vraag per periode als de levertijd gekend zijn of geschat kunnen worden, kan de vraag tijdens levertijd berekend worden aan de hand van volgende formules (Fetter & Dalleck, 1961):

$$\bullet \quad \mu_L = \mu_T * \mu_D \quad (2.1)$$

$$\bullet \quad \sigma_L = \sqrt{\mu_T * \sigma_D^2 + \mu_D^2 * \sigma_T^2} \quad (2.2)$$

De laatste vergelijking geeft duidelijk aan dat zowel de snelheid ( $\mu_T$ ) als de betrouwbaarheid ( $\sigma_T^2$ ) van het transportmiddel een impact hebben op de veiligheidsvoorraad. Wanneer een transportmiddel sneller en betrouwbaarder is, dan zal - ceteris paribus - het niveau van de veiligheidsvoorraad dalen. In het extreme geval, waar  $\mu_T$  en  $\sigma_T^2$  gelijk zijn aan nul, zal er geen voorraad nodig zijn (Vernimmen, 2003).

Er is ook kritiek op het algemeen gebruik van de normaalverdeling om de vraag tijdens de levertijd te modelleren. Er wordt immers aangenomen dat de vraag tijdens de levertijd een normaalverdeling volgt, zonder hiervoor enige bewijs te leveren. Deze methode is zeer handig vanuit praktisch standpunt, maar het gebruik van de normaalverdeling om de vraag tijdens de levertijd te modelleren is over het algemeen ongerechtvaardigd. Zo heeft de vraag tijdens de levertijd de neiging om een asymmetrische vorm aan te nemen. Studies tonen bijvoorbeeld aan dat de verdeling de 'transit-time', die een groot onderdeel uitmaakt van de levertijd, vaak een rechts scheve verdeling vertoont en onderworpen is aan zogenaamde 'weekend-effecten'. (Tyworth, 1991). Deze twee redenen ondermijnen dus de normaliteitsveronderstelling. Verder geven Eppen & Martin (1988) aan dat de verantwoording van de centrale limietstelling vaak ongepast ondersteuning biedt voor het algemeen gebruik van de normaalverdeling. De auteurs besluiten dat er weinig bewijs is voor het gebruik van de normaalverdeling voor de vraag tijdens de levertijd. Door incorrect gebruik te maken van de normaalverdeling voor de vraag tijdens de levertermijn kan de kans op stock-breuk veel hoger zijn dan verwacht. Bijgevolg kan het gebruik van de normaalverdeling dus hoge kosten met zich meebrengen.

Een andere mogelijkheid voor de vraag tijdens de levertijd is bijvoorbeeld de Gamma verdeling (Namit & Chen, 1996; Tyworth & Ganeshan, 2000 & Vernimmen et al., 2008). Deze heeft de mogelijkheid om complexere vormen aan te nemen dan de twee-parameter verdeling. Verder is er nog de mogelijkheid van de 'distribution-free' benadering om de vraag tijdens de levertijd te modelleren (Moon & Choi, 1994; Moon & Gallego, 1994). Deze methode maakt geen assumpties rond de verdeling van de vraag tijdens de levertijd, behalve dat ze behoort tot de klasse F van cumulatieve verdelingsfuncties met een bepaald gemiddelde  $\mu$  en variantie  $\sigma^2$ .



### **3. De totale logistieke kost en zijn componenten**

In dit hoofdstuk wordt de aandacht gevestigd op de totale logistieke kost. Eerst wordt het belang en nut ervan besproken. Daarna volgt een uitgebreide toelichting van de componenten waaruit de totale logistieke kost is opgebouwd. De belangrijkste elementen van de totale logistieke kost zijn transportkost, de voorraadkost, de bestelkost en de tekortkost. Tot slot worden nog enkele modellen aangehaald en wordt er dieper ingegaan op het 'Inventory-theoretic'-model.

#### **3.1 Inleiding**

Zoals al vermeld in het praktijkprobleem is het van essentieel belang om de totale logistieke kost te minimaliseren. In verschillende studies wordt er bij het nemen van transport- en voorraadbeslissingen veel belang gehecht aan de totale logistieke kost (Baumol & Vinod, 1970; Tyworth, 1991; Tyworth & Zeng, 1998; Vernimmen et al. 2003; Blauwens et al., 2008). Dit is zeer begrijpelijk, vermits de concurrentie en de druk op de kosten almaar wordt opgevoerd. Ondernemingen willen de kosten zo laag mogelijk houden, maar tegelijk willen ze de kwaliteit, service en prijs voor de klant op een zo goed mogelijk niveau houden.

Wat is de optimale transportmodus voor een onderneming? Zijn er nog ander criteria, buiten die van de totale logistieke kost, waarmee men rekening moet houden? Het is niet altijd mogelijk om hier een eenduidig antwoord op te geven. Er zijn namelijk ook kwalitatieve beslissingscriteria die niet in monetaire termen worden uitgedrukt en ook een invloed hebben op de uiteindelijke keuze. Hierdoor worden ze vaak achterwege gelaten in de verschillende modellen. Deze zijn onder andere flexibiliteit, controleerbaarheid, verlies en schade, traceerbaarheid en de milieu-impact van een transportmodus (Dullaert et al. 2007). Het thema rond de keuze van de transportalternatief werd reeds vaak in de literatuur besproken. In McGinnes (1989) wordt er een overzicht gegeven van verschillende modellen, die de keuze van transportmiddel bespreken. Hierin onderscheidt de auteur de volgende categorieën: het klassieke economische model, het 'inventory-theoretic' model, het 'Trade-off' model en het Optimalisatie model. In deze eindverhandeling wordt er vooral ingaan op het 'Inventory-theoretic' model. Eén van de redenen is dat de onzekerheid van de levertermijn expliciet in dit model wordt opgenomen en geformuleerd. Het model wordt in de recente literatuur nog steeds gebruikt en is doorheen de decennia vaak verbeterd en geoptimaliseerd. Dit model wordt later in dit hoofdstuk verder toegelicht.

Het nemen van logistieke beslissingen beïnvloedt verschillende logistieke kosten die samen de totale logistieke kostprijs bepalen. In de literatuur zijn er echter verschillende definities van de 'totale logistieke kost' terug te vinden. De ene auteur neemt soms andere componenten op in zijn

omschrijving, hoewel de meeste elementen wel overeenkomen met elkaar. Als ze dan toch dezelfde elementen opnemen, worden deze ondergebracht in verschillende onderdelen van de totale logistieke kost. Er bestaat niet altijd consistentie tussen de verschillende studie over dit begrip. Eerst worden de belangrijkste componenten van de totale logistieke kost besproken. Hiervoor werd de literatuur van Blauwens et al. (2008) gebruikt, zij hanteren namelijk een duidelijke omschrijving van de totale logistieke kost.

## **3.2 Componenten**

De belangrijkste kostenelementen van de totale logistieke kost bestaan volgens Blauwens et al. (2008) uit de transportkosten, de voorraadkosten, de stockbreukkosten, de instel- en bestelkosten, de kosten van klantenservice (Blauwens et al., 2008, pp. 197-224).

### **3.2.1 Transportkosten**

De transportkost is een logistieke kost die rechtstreeks wordt beïnvloed door de keuze van het transportmiddel. Hierbij kan men gebruik maken van transportmiddelen van derden of eigen vervoer. Onder het eerste verstaat men bedrijven die de gewenste goederen vervoeren in opdracht van een onderneming of verzender, namelijk een transportfirma (beroepsvervoer). De transportkosten bij beroepsvervoer bestaan enerzijds uit het overeengekomen tarief (vrachtprijs) en anderzijds uit extra kosten voor bijkomende diensten. Een probleem hierbij is dat de tarieven niet altijd even transparant of soms moeilijk te voorspellen zijn. Bij gebruik van eigenvervoer moeten de transportkosten berekend worden. In dit geval bestaan de kosten onder andere uit brandstof, onderhoud, personeelskosten, verzekering en verkeersbelastingen. Ook in dit geval is het soms moeilijk om de exacte transportkost te bereken (Blauwens et al. 2008,).

Er moet ook rekening worden houden met schaalvoordelen van bepaalde transportmiddelen. Zo is de kost van bijvoorbeeld een binnenvaartschip met een capaciteit van 2 000 ton niet gelijk aan duizend keer de kost van een vrachtwagen met een capaciteit van 20 ton. Volgens Vernimmen et al. (2003) kan de vrachtprijs uitgedrukt in EUR per ton-mijl tot 80 keer hoger zijn voor 'fast and small-capacity' vervoersmiddelen dan voor 'slow and high-capacity' vervoersmiddelen. Als enkel de transportkosten in aanmerking komen, zal er zo goed als altijd voor grote en trage vervoersmiddelen worden geselecteerd. Het is dus duidelijk dat logistieke managers zich niet enkel moet baseren op de transportkost. Ook de andere logistieke kosten worden beïnvloed door de keuze van het transportmiddel. Schaalvoordelen zijn echter niet altijd van toepassing. Het spoorvervoer vereist altijd voor- en/of natransport over de weg. Bij binnenvaart kan er overslag

van goederen aan de terminals vereist zijn. Door deze factoren kunnen de transportkosten aanzienlijk toenemen. Men dient zich dan de vraag te stellen of de kosten van voor- en/of na transport of extra goederenbehandeling wel opwegen tegen de schaalvoordelen.

### 3.2.2 Voorraadkosten

Voorraadkosten ontstaan doordat geleverde goederen niet onmiddellijk geconsumeerd of verbruikt worden. Goederen kunnen echter ook om andere redenen gestockeerd worden. Zo kan een onderneming beslissen om bijvoorbeeld een veiligheids- of seizoensvoorraad aan te houden. De goederen in transport (*in-transit*) kunnen ook als voorraad beschouwd worden. De voorraadkost wordt dus direct beïnvloed door de snelheid van het transportmiddel. Een trager transportmiddel (bv. binnenvaart) heeft dus een grotere voorraadkost tijdens het vervoer, dan een sneller transportmiddel (bv. wegvervoer). Hier is 'fast and small-capacity' transport dus in het voordeel. Daarnaast heeft ook de betrouwbaarheid van het transportmiddel een effect op de veiligheidsvoorraad van de onderneming. Een veiligheidsvoorraad wordt aangehouden als reserve tegen onvoorziene omstandigheden, zoals schommelingen in de vraag of levertijd. Een betrouwbare levertijd heeft als gevolg dat de veiligheidsvoorraad verlaagd kan worden. Dit brengt een verlaging van de kosten met zich mee. Hier wordt later nog dieper op ingegaan.

De kost om goederen in voorraad te houden bestaan uit intrestkosten, verzekeringskosten, afschrijvingen en magazijnkosten. In verdere berekeningen zullen de voorraadkosten of *holding costs* per eenheid per jaar aangeduid worden met het symbool  $h$  (holding cost). De voorraadkosten kunnen een aanzienlijk deel uitmaken van de totale logistieke kost. Het is dus begrijpelijk dat bedrijven soms duurdere transportmiddelen kiezen om zo hun voorraden zo laag mogelijk te houden. Men kan de voorraad verder opsplitsen in:

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

De keuze van transportmiddel heeft enkel een invloed op de eerste drie voorraad categorieën. Om deze reden komen enkel deze drie types aan bod.

Gemiddeld genomen, ligt de helft van de bestelde hoeveelheid ( $Q$ ) in voorraad. Deze bestelhoeveelheidhoeveelheid  $Q$  is gelijk aan  $c \cdot T$  eenheden. Hierbij staat  $c$  voor de gemiddelde tijd tussen twee leveringen in jaren en  $T$  voor het totaal aantal getransporteerde eenheden per jaar. De



gemiddelde cyclische voorraad bedraagt dus  $\frac{c*T}{2}$ . Bij de cyclische voorraad wordt er uitgegaan van een constant verbruiksritme of consumptiegraad. De bovenstaande formule geldt nog steeds als er 'random' of willekeurige schommelingen optreden in de consumptie van de goederen. Transportmiddelen met een klein laadvermogen hebben hier duidelijk een voordeel t.o.v. deze met een groot laadvermogen.

Tijdens transport zijn de goederen ook in voorraad. Dit wordt ook wel de 'in-transit' voorraad genoemd. De goederen veroorzaken gedurende deze tijd voorraadkosten, net als goederen die in het bedrijf gestockeerd worden. Deze kost per eenheid per jaar wordt weergegeven door  $u$ . Snelle vervoersmiddelen zullen hier een kostenvoordeel hebben ten opzichte van trage vervoersmiddelen. Bij cyclische voorraadkosten is het transport in kleine partijen in het voordeel. Omdat de snelste vervoerswijzen vaak goederen vervoeren in kleine partijen, zoals bijvoorbeeld het lucht- of wegvervoer wordt het verschil tussen beide soms uit het oog verloren. In principe betreft het echter elementen van totaal andere aard.

Ondernemingen houden vaak een veiligheids- of buffervoorraad aan bovenop de cyclische voorraad. Dit soort voorraad wordt aangehouden omdat een onderneming vaak onzekerheid heerst rond de vraag naar het product of de verwachte levertijd. Hiermee wil de onderneming dus voorkomen dat ze zonder voorraad komen, mocht er een systematische schommeling aanwezig zijn. Het bedrijf wil met andere woorden een reserve aanhouden om stockbreuk te voorkomen.

### **3.2.4 Stockbreuk kosten**

De stockbreuk kosten zijn alle verliezen die ontstaan als er een voorraadtekort optreedt. Indien dit voorkomt, wordt de bediening van de klanten niet meer mogelijk. Verder komen machines of zelfs volledige productielijnen stil te staan, waardoor een optimale productie in het gedrang komt. Als een onderneming beslist om een kleinere veiligheidsvoorraad aan te leggen, heeft ze minder voorraadkosten. Bijgevolg is er wel een grote kans op een voorraadtekort, dus nemen deze kosten toe. Er kan dus een trade-off tussen beide kosten gemaakt worden. Doorgaans is het in de praktijk niet altijd even eenvoudig om een directe schatting te maken van deze kosten.

### **3.2.5 Bestelkosten**

De bestelkosten zijn de kosten die verbonden zijn aan het doen en afhandelen van een bestelling. Deze worden ook wel de kosten van administratie en orderbehandeling genoemd. In veel gevallen wordt deze samen met de verpakkings- en de instelkosten behandeld als één kostprijs. Deze kost

is afhankelijk van het aantal verzendingen per jaar en is kleiner naarmate de goederen in grote hoeveelheden besteld worden. Indien dit niet mogelijk is, kunnen verschillende bestellingen gegroepeerd worden tot grote partijen om aldus de order- en administratiekosten te drukken (=consolidatie). Het is wel zo dat deze kosten steeds kleiner en dus minder belangrijk worden. De reden hiervoor is het toegenomen gebruik van computers en andere technologie in het logistieke management, waardoor het proces minder arbeidsintensief is.

### 3.3 Het 'Inventory-theoretic' model

Het 'Inventory-theoretic' model werd voor het eerst beschreven door Baumol & Vinod (1970). Het is een klassiek raamwerk voor het nemen van transport- en voorraadbeslissingen. Bij het 'inventory-theoretic' model wordt de keuze van het transportalternatief bepaald door rekening te houden met zowel de voorraad- als de transportkost, dit in een omgeving met onzekere vraag en levertijd. Er wordt een relatie gelegd tussen de snelheid en betrouwbaarheid van het vervoersmiddel en de voorraadkosten.

Het doel is om het transportmiddel, bestelpunt ( $s$ ) en bestelhoeveelheid ( $Q$ ) te bepalen die de totale logistieke kosten minimaliseert, rekening houdend met de onzekere vraag en/of levertijd. Aan deze laatste voorwaarde wordt soms gesleuteld. Sommige modellen, al dan niet met de 'inventory-theoretic approach' als basis, veronderstellen dat de vraag en/of levertijd met zekerheid gekend zijn. Ze veronderstellen met andere woorden dat de parameters deterministisch zijn. Bijgevolg zijn deze modellen vaak simplistisch, maar ook minder realistisch. Het verschil tussen geen, één of twee bronnen van onzekerheid heeft een grote invloed op de wiskundige formulering van de vraag tijdens de levertijd (*demand during lead time*). De voorwaarde van dubbele onzekerheid is een essentiële stap in het bepalen van het optimale resultaat, maar verhoogt dus ook de complexiteit van het model (Tyworth, 1991).

De voorraadtheorie (zie paragraaf 3.2) legt een verband tussen de gemiddelde levertijd en haar variantie met de voorraadkost. Meer specifiek heeft de gemiddelde levertermijn een invloed op zowel de voorraad tijdens het vervoer als de veiligheidsvoorraad. De betrouwbaarheid of variantie van de levertermijn heeft een effect op de veiligheidsvoorraad. Als er meer onzekerheid heerst rond de levertijd, zal een onderneming een grotere veiligheidsvoorraad aanhouden, willen ze hetzelfde serviceniveau behouden. Het verhogen van de buffervoorraad is voor de ontvanger een mogelijkheid om zich te beschermen tegen laattijdige leveringen. De totale logistieke kost is volgens de Baumol en Vinod (1970) gelijk aan:

$$TLC = TC * T + utT + \frac{A}{s} + wc \frac{T}{2} + wK \sqrt{(s \pm \mu_T) * T}$$

waarbij:

- TLC = de totale jaarlijkse logistieke kost van een transportmiddel
- T = totaal aantal getransporteerde eenheden per jaar
- TC = de transportkost per vervoerde eenheid
- $\mu_T$  = gemiddelde levertermijn
- c = gemiddelde tijd tussen twee opeenvolgende verzendingen in jaren
- u = voorraadkost tijdens het vervoer per eenheid per jaar
- w = voorraadkost in bedrijf per eenheid per jaar
- A = bestel- en orderbehandelingskost per bestelling
- K = veiligheidsfactor (een constante die afhankelijk is van de vooraf bepaalde kans op stockbreuk tijdens de levertermijn. Wordt ook de in dit model de *Poisson multiplier* genoemd.)

De eerste term in de bovenstaande formule is de directe, out-of-pocket kost om de goederen te vervoeren van de leverancier naar de onderneming. De tweede term refereert naar de voorraadkost tijdens het vervoer. Voorraad tijdens het transport kan volgens de auteur gezien worden als een 'voorraad op wielen' en moet dus in rekening worden gebracht. De derde term verwijst naar de jaarlijkse bestelkosten. Vervolgens komen de kosten van de cyclusvoorraad aan bod. De laatste term geeft de voorraadkost weer voor het aanhouden van een veiligheidsvoorraad. Eerder werd vermeld dat er nog andere kwalitatieve beslissingscriteria zijn die een impact hebben op de keuze van transportmiddel. Het is echter zeer moeilijk om zulke criteria uit te drukken in monetaire termen, waardoor ze niet worden opgenomen in dit model.

De onderneming moet het transportmiddel, bestelpunt ( $s$ ) en bestelhoeveelheid ( $Q$ ) bepalen die de totale logistieke kosten minimaliseert. De oplossingsmethode voor dit probleem bestaat uit drie opeenvolgende stappen.

1. De parameters in bovenstaande formule moeten correct worden gedefinieerd. Sommige kostenelementen zijn relatief eenvoudig te verkrijgen, andere zaken moeten geschat worden.
2. Bepaal het bestelpunt ( $s$ ) en bestelhoeveelheid ( $Q$ ) die de TLC minimaliseren. Deze factoren beïnvloeden onder andere de veiligheidsvoorraad, de jaarlijkse bestelkost, cyclische voorraad en de vrachtprijs.
3. Vergelijk de  $TLC_{\min}$  van de verschillende transportalternatieven en kies deze met de laagste totale logistieke kost.

## 4. Invloed van de onzekerheid van levertijd op voorraadbeslissingen en -beheer

In dit hoofdstuk wordt de invloed van de onzekerheid van de levertijd op de voorraadbeslissingen en -beheer geanalyseerd. In de eerste sectie worden een aantal studies besproken die het effect van de levertijd-onzekerheid op diverse voorraadmodellen bespreken. Hiervoor werd gebruikt gemaakt van drie oudere studies (voor 1998) en drie recentere studies (na 2004). De resultaten van deze onderzoeken leiden tot een aantal klassieke bevindingen in de voorraadtheorie. In de tweede sectie komen twee studies aan bod die deze klassieke bevindingen tegenspreken en verwerpen. In de derde sectie worden twee recente studies besproken die de conclusies van de twee studies uit de vorige sectie bekritisieren en trachten aan te tonen dat de klassieke bevindingen wel correct zijn. In de vierde sectie worden een aantal besluiten omtrent de invloed van onzekerheid van de levertijd op de voorraadbeslissingen en -beheer geformuleerd.

### 4.1 Het effect van levertijd-onzekerheid in diverse voorraadmodellen

Eén van de eerste studies rond levertijd-variabiliteit werd uitgevoerd door Bagchi, Hayya & Chu (1986). Zij beschreven het effect op de veiligheidsvoorraad en bestelpunt in een continue (s,Q) voorraadsysteem als er geen rekening wordt gehouden met de levertijd-variabiliteit. Dit werd gedaan aan de hand van numerieke voorbeelden en formules. De data komt uit een gevalstudie uitgevoerd bij de luchtmacht van de VS. Voor de analyse werd gebruik gemaakt van de samengestelde verdeling (compound distribution). Verdelingen die een goede fit geven voor de levertijd zijn de Normaal en Gamma verdeling. Voor de vraag per periode was er onvoldoende data en werd uitgegaan van een Poisson verdeling. Vervolgens kunnen de parameters van de vraag tijdens de levertijd (L) berekend worden met behulp van volgende formules (2.2) en (2.3):

$$\bullet \quad \mu_L = \mu_T * \mu_D \quad (4.1)$$

$$\bullet \quad \sigma_L^{2*} = \mu_T * \sigma_D^2 + \mu_D^2 * \sigma_T^2 \quad (4.2)$$

Waarbij de ster (\*) aangeeft dat het gaat om de vraag tijdens de levertijd met een variabele levertijd. Als de levertijd echter constant is, kan de variantie van de vraag tijdens de levertijd als volgt geschreven worden:

$$\bullet \quad \sigma_L^2 = \mu_T * \sigma_D^2 \quad (4.3)$$

Nu kan de invloed van een variabele levertijd op de veiligheidsvoorraad bepaald worden. Voor dezelfde veiligheidsfactor  $k$ , is de stijging van de veiligheidsvoorraad gelijk aan onderstaande ratio:

$$\bullet \quad \frac{\sigma(X)^*}{\sigma(X)} = \left[ \frac{\mu_T \sigma_D^2 + \mu_D^2 \sigma_T^2}{\mu_T \sigma_D^2} \right]^{1/2} = \left[ 1 + \frac{VMR(L)}{VMR(D)} * \mu_D \right]^{1/2} = [1 + VMR(L) * \mu_D]^{1/2} \quad (4.4)$$

Waarbij VMR de verhouding is van de variantie tot het gemiddelde. De laatste gelijkheid geldt enkel als er sprake is van een Poisson verdeling (of andere verdelingen waarbij  $\mu = \sigma^2$ ). Deze formule wordt vervolgens gestaafd aan de hand van een numeriek voorbeeld. Stel dat de dagelijkse vraag voor een bepaald item 1,06 eenheden bedraagt. De levertijd volgt een normaalverdeling en heeft een gemiddelde van 379 en een standaarddeviatie van 63,61 dagen. De vraag tijdens de levertijd zou volgens de auteurs, als gevolg van de centrale limietstelling, normaal verdeeld zijn. Vervolgens worden deze gegevens verwerkt met bovenstaande formules (4.1 - 4.3). Er wordt uitgegaan van een veiligheidsfactor  $k=1,28$ . De veiligheidsvoorraad zal in het geval dat er geen rekening wordt gehouden met de levertijd-variabiliteit 26 eenheden bedragen en in het geval dat hier wel rekening mee wordt gehouden 90 eenheden bedragen. De veiligheidsvoorraad is in het tweede geval dus 3,5 keer zo hoog. Dit kan ook rechtstreeks worden berekend met behulp van formule (4.4). Verder geven de auteurs ook aan de gemiddelde vraag per periode  $\mu_D$  en standaarddeviatie van de levertijd  $\sigma_T$  het meeste invloed hebben op de veiligheidsvoorraad.

De belangrijkste conclusie van deze studie is dat er in de realiteit altijd een zekere levertijd-variabiliteit aanwezig is en dat hier rekening mee moet worden gehouden bij het bepalen van de optimale veiligheidsvoorraad, bestelpunt en bestelhoeveelheid. Bagchi, Hayya & Chu (1986) geven ook aan dat de luchtmacht van de VS het aantal 'backorders' kan halveren door het opnemen van de levertijd-variabiliteit in hun berekeningen.

In een studie van Song (1994) wordt het effect van de levertijdonzekerheid in een stochastisch voorraadmodel onderzocht. Concreet gaat de auteur na welke impact de gemiddelde levertijd en de variabiliteit van de levertijd hebben op de voorraadbeslissingen en de prestaties van het voorraadstelsel. Het onderzochte voorraadmodel is een continu, 'base-stock' of (s,S) voorraadstelsel met een stochastische levertijd en vraag per periode, waarbij de laatstgenoemde een Poisson verdeling volgt. De performantie-maatstaf is de totale verwachte kost.

Eerst wordt het effect van een hogere gemiddelde levertijd onderzocht. De auteur geeft aan dat een stijging van de gemiddelde levertijd zorgt voor een stijging van de vraag tijdens de levertijd. Om het verhoogde risico op stockbreuk te compenseren is er dus een hoger bestelpunt nodig. Het effect op de optimale verwachte kost is echter minder eenduidig en complexer. Indien de vraag Poisson verdeeld is en de levertijd Exponentieel verdeeld is, zorgt een stijging van de gemiddelde levertijd voor een stijging van de totale verwachte kost. De auteur geeft echter ook een tegenvoorbeeld en toont hiermee aan dat deze laatste eigenschap niet altijd opgaat. Bij een exponentiële verdeling gaat een stijging van het gemiddelde immers gepaard met een stijging van de variantie. Song (1994) geeft aan dat het effect van de levertijd-variabiliteit hoogstwaarschijnlijk een grotere invloed heeft op de prestaties van het systeem dan de gemiddelde levertijd. De

conclusie is dus dat een hogere gemiddelde levertijd leidt tot een hoger bestelpunt, maar niet noodzakelijk tot een hogere totale kost.

Vervolgens wordt het effect van een hogere levertijd-variabiliteit onderzocht. Indien de variabiliteit van de levertijd toeneemt, zal ook de variabiliteit van de vraag tijdens de levertijd toenemen. De auteur geeft aan dat dit leidt tot een hogere totale kost. Het effect op het bestelpunt is hier opnieuw minder eenduidig en is afhankelijk van de structuur van de voorraadkost. Indien de tekortkost hoog is of de kost om voorraad aan te houden laag is, zal een stijging van de levertijd-variabiliteit leiden tot een verhoging van het bestelpunt. Indien de tekortkost echter laag is en de kost om voorraad aan te houden hoog is, zal een stijging van de levertijd-variabiliteit leiden tot een verlaging van het bestelpunt. De auteur bemerkt wel dat de situatie in het laatste geval minder voorkomt in de realiteit.

Vervolgens komt een studie van Tyworth en Zeng (1998) aan bod. Hierin wordt het effect van levertijdprestatie op de totale logistieke kost onderzocht. Het model voor de totale logistieke kost bevat de transportkost, de voorraadkost, de bestelkost en de tekortkost, waarbij de voorraadkost verder wordt opgesplitst in de 'in-transit', cyclus en veiligheidsvoorraad. Dit model is gebaseerd op het 'inventory-theoretic' model. Het doel is om het bestelpunt en de bestelhoeveelheid te bepalen die de totale logistieke kost minimaliseert. Deze analyse werkt voor verschillende verdelingen van de vraag per periode en de levertijd. Vervolgens wordt er een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd. Hierbij wordt de totale logistieke kost en het bijhorend serviceniveau berekend voor verschillende combinaties van de gemiddelde levertijd en de levertijd-variabiliteit. Dit gebeurt aan de hand van een numerieke analyse. De volledige sensitiviteits-matrix is opgenomen **bijlage 1**.

Tyworth en Zeng (1998) concluderen uit deze analyse dat een stijging van de levertijd-variabiliteit leidt tot een verhoging van de totale logistieke kost en een daling van de geleverde service ( $P_2$  neemt af). Een stijging van de gemiddelde levertijd leidt eveneens tot een verhoging van de totale logistieke kost en een daling van de geleverde service. De auteurs merken wel op dat, relatief gezien, een verandering van de levertijd-variantie meer invloed heeft op de logistieke kost en het serviceniveau dan een verandering van de gemiddelde levertijd.

Nu worden de conclusies van drie recentere studies besproken. De eerste studie werd uitgevoerd door He, Kim en Hayya (2005). Hierin wordt de impact van de levertijd-variabiliteit op de voorraadkost onderzocht. Hier wordt een  $(s,Q)$  voorraadmodel met geplande tekorten gebruikt, ook bekend als het EOQ model met *backlogging*. De vraag per periode is deterministisch en de levertijd is stochastisch en volgt een *truncated* Exponentiële verdeling. De auteurs tonen aan dat de kost die de levertijd-variabiliteit veroorzaakt bij benadering lineair is in de standaarddeviatie van de levertijd. Vervolgens wordt er opgemerkt dat het de levertijd-variabiliteit en niet de gemiddelde levertijd is, die de voorraadpolitiek en totale voorraadkosten beïnvloedt. Des te hoger de levertijd-variabiliteit, des te hoger de totale voorraadkost en bestelhoeveelheid. Het bestelpunt is wel afhankelijk van de gemiddelde levertijd. De auteurs geven ook aan dat het bereiken van een 'nul-

voorraad' mogelijk is in dit model, indien er geen instel- of bestelkosten en geen levertijd-variabiliteit aanwezig is. De bevindingen van de auteurs worden ten slotte bevestigd aan de hand van numerieke voorbeelden.

De tweede studie werd uitgevoerd door Kim et al. (2004). Hier wordt een  $(s,Q)$  voorraadmodel gebruikt met een deterministische vraag en stochastische levertijd die een Erlang verdeling volgt. De auteurs concluderen dat noch de optimale bestelhoeveelheid noch de optimale voorraadkosten wordt beïnvloed door de gemiddelde levertijd. Ten tweede wordt ook hier aangehaald dat de stijging van de voorraadkosten, veroorzaakt door een variabele levertijd bij benadering lineair is in de standaarddeviatie van de levertijd.

De derde studie werd uitgevoerd door Hayya et al. (2009). In een numerieke studie wordt aangetoond dat de gemiddelde vraag tijdens de levertijd weinig tot geen effect heeft op de voorraadkosten, de bestelhoeveelheid en de veiligheidsvoorraad. De invloed van de standaarddeviatie van de vraag tijdens de levertijd op deze drie beslissingsvariabelen is volgens de auteurs echter wel significant.

## **4.2 Het effect van de levertijd-onzekerheid op de veiligheidsvoorraad**

In de studie van Chopra, Reinhardt en Dada (2004) wordt de relatie tussen de gemiddelde levertijd, haar onzekerheid en de veiligheidsvoorraad besproken. De veiligheidsvoorraad is immers afhankelijk van de servicegraad, de onzekerheid van de vraag, de gemiddelde levertijd en de onzekerheid van de levertijd.

Allereerst stellen de auteurs dat de meeste ondernemingen in de praktijk werken met  $P_1$ -serviceniveaus van 50-70% en niet met 95-99% zoals vaak wordt aangenomen. In de studie wordt een overzicht gegeven van verschillende  $P_1$  en  $P_2$ -serviceniveaus, voor verschillende bestelpunten met een wekelijkse vraag van 2.500 eenheden, een standaarddeviatie van 500 eenheden, een levertijd van twee weken en een bestelhoeveelheid van 10.000 eenheden. Hieruit blijkt dat er  $P_1$ -serviceniveaus worden bereikt tussen 50% en 70%, voor serviceniveaus ( $P_2$ ) tussen 97% en 99%. De meeste ondernemingen streven naar een serviceniveau waarbij 97-99% van de totale jaarlijkse vraag direct verkocht kan worden uit de voorraad, wat dus impliceert dat ondernemingen in feite werken met een  $P_1$ -serviceniveau dat ligt tussen de 50% en 70%. Het is juist voor dit bereik van serviceniveaus dat de er tegenstrijdige resultaten worden gevonden.

#### 4.2.1 Effect van de levertijd-onzekerheid: de normale verdeling

Zoals eerder gezegd wordt vaak uitgegaan van een normaalverdeling om de vraag tijdens de levertijd te modelleren. Stel nu dat de vraag tijdens de levertijd stationair en normaal verdeeld is en dat het gemiddelde en de standaardafwijkingen van de vraag en levertijd gekend zijn of geschat kunnen worden. Het gemiddelde en standaardafwijking van de vraag tijdens levertijd kan berekend worden aan de hand van formules (4.1 en 4.2). Het bestelpunt ( $s_n$ ) wordt als volgt berekend:  $s_n = \mu_L + k * \sigma_L$ . Onder de normaalverdeling geldt dat de variantie van de vraag tijdens de levertijd stijgt (daalt), als de variantie van de levertijd stijgt (daalt). Als de parameters van vraag tijdens de levertijd constant worden gehouden, zijn de veiligheidsvoorraad en het bestelpunt  $s_n$  met andere woorden afhankelijk van het teken van  $k$ . De figuur in **bijlage 2** geeft de relatie weer tussen de onzekerheid van de levertijd en de bestelpunten, voor drie verschillende  $P_1$ -serviceniveaus. De veiligheidsvoorraad en het bestelpunt nemen toe met een stijging van  $\sigma_T$  voor een  $P_1$ -servicegraad boven 0,5 en nemen af voor een  $P_1$ -servicegraad onder 0,5. Deze observaties leiden volgens de Chopra et al. (2004) tot de volgende conclusies:

Indien de onzekerheid van de levertijd voorgesteld door  $\sigma_T$  stijgt, dan geldt voor een servicegraad  $P_1 = \alpha$  het volgende:

- Als  $\alpha < 0.5$ , dan daalt  $s_N$ ;
- Als  $\alpha > 0.5$ , dan stijgt  $s_N$ ;
- Als  $\alpha = 0.5$ , dan is  $s_N$  invariant.

Als het management werkt aan een reductie van de onzekerheid van levertijd, betekent dit een daling van het bestelpunt en veiligheidsvoorraad voor een  $P_1 > 0,5$ . Dit stemt overeen met de resultaten en bevindingen uit de vorige sectie. Zoals aangehaald is de vraag tijdens de levertijd in de praktijk zelden normaal verdeeld en volgens de auteurs zijn deze conclusies dan ook voorbarig. Daarom werken Chopra et al. (2004) ook een alternatief model uit met een zogenaamde 'exacte verdeling'.

#### 4.2.2 Effect van levertijd-onzekerheid: de exacte verdeling

Chopra et al. (2004) stellen vervolgens een ander model op, waarmee ze de klassieke bevindingen omtrent de invloed van onzekerheid van de levertijd op het voorraadbeheer proberen te ontcrachten. In het 'exacte model' volgt de vraag een normaalverdeling en de levertijd een discrete uniforme verdeling met een gemiddelde  $\mu_T$  en een bereik van  $[\mu_T - y; \mu_T + y]$ . In de numerieke studie die later volgt, wordt er naast de uniforme verdeling ook gebruik gemaakt van een Gamma verdeling voor de levertijd. Ze stellen vervolgens twee wiskundige theorema's op die tot andere resultaten leiden als de normaalverdeling. De conclusies van deze theorema's zijn de volgende:



- De mediaan van vraag tijdens de levertijd neemt af, als de onzekerheid van de levertijd voorgesteld door  $y$  toeneemt. Dit is in contrast met de normaalverdeling, waar de mediaan invariant is voor wijzigingen in de onzekerheid van levertijd.
- Er bestaan serviceniveaus  $P_1 = \alpha > 0,5$ , waarvoor het bestelpunt eerst daalt met een stijging van de onzekerheid van de levertijd. Dit is ook in contrast met de klassieke bevinding.

De auteurs tonen aan dat er een zeker bereik van serviceniveaus boven 50% bestaat waar een vermindering van de onzekerheid van levertijd leidt tot een verhoging van het bestelpunt en veiligheidsvoorraad, wanneer de levertijd uniform verdeeld is. In de volgende sectie wordt het effect van de onzekerheid van levertijd op de veiligheidsvoorraad bestudeerd aan de hand van enkele numerieke studies en voorbeelden.

### 4.2.3 Numerieke analyse en resultaten

In deze sectie wordt het effect van een reductie van de levertijd-variantie op de veiligheidsvoorraad en bestelpunten onderzocht. Dit wordt gedaan voor enerzijds een levertijd met een uniforme verdeling en anderzijds voor een Gamma verdeling. In beide gevallen is de gemiddelde levertijd constant en wordt de standaarddeviatie gevarieerd. De vraag per periode volgt een normaalverdeling met een gemiddelde  $\mu_D = 20$  en standaarddeviatie  $\sigma_D = 15$  of 5. Hierdoor kan het effect voor zowel een hoge als een lage standaarddeviatie van de vraag per tijdseenheid geanalyseerd worden.

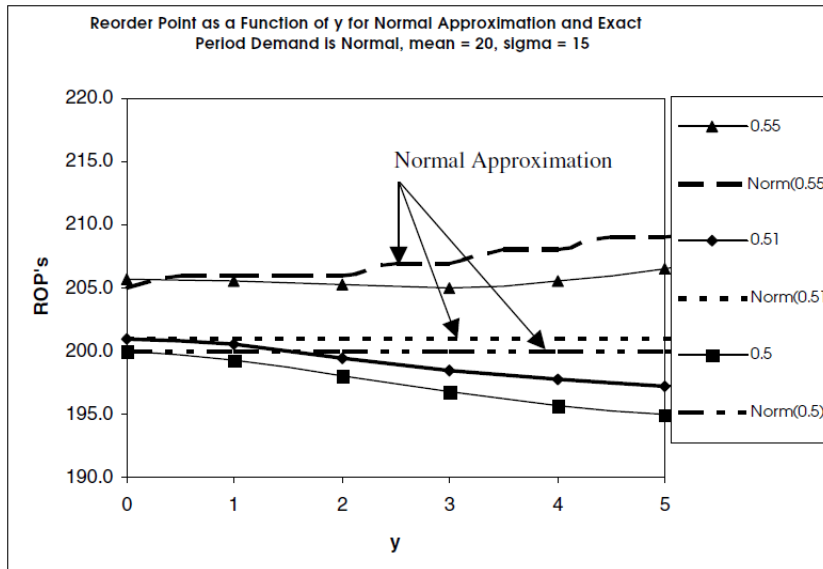
Figuur 4.1 toont het effect van de reductie van de levertijd-variabiliteit als de vraag per periode een hoge standaarddeviatie heeft ( $\sigma_D = 15$ ) en de levertijd uniform verdeeld is met een gemiddelde  $\mu_T = 10$  en een bereik heeft van  $[10 - y; 10 + y]$ , waarbij  $y$  van 0 tot 10 gaat. De figuur plot de wijziging van het bestelpunt als  $y$  verandert. De veiligheidsvoorraad wordt berekend als  $ss = s - 200$ , aangezien de verwachte vraag tijdens de levertijd gelijk is aan 200 ( $\mu_D * \mu_T$ ).

Uit figuur 4.1 kan besloten worden dat er een bepaald bereik van serviceniveaus bestaat waar het reduceren van de levertijd-variantie een negatief effect heeft op veiligheidsvoorraad. Figuur 4.2 toont aan dat het onderzochte effect zelfs sterker is, indien de levertijd een Gamma verdeling volgt. Ook hier wordt hier uitgegaan van een hoge standaarddeviatie voor de vraag per periode en heeft de gamma verdeling een gemiddelde  $\mu_T = 10$  en een standaarddeviatie  $\sigma_T$  die varieert van zes naar één. De bestelpunten worden opnieuw berekend voor  $P_1$ -serviceniveaus van 0,51; 0,55; 0,6 en geplot voor zowel de normale als de Gamma verdeling.

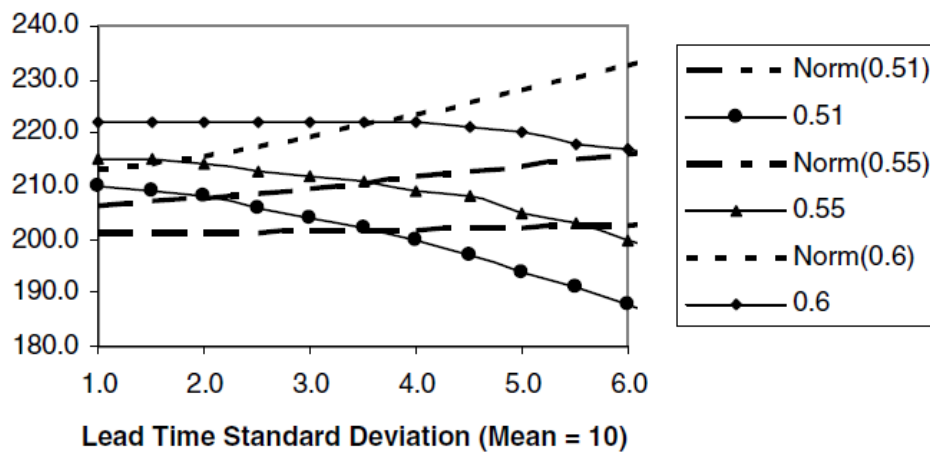
Figuur 4.2 geeft weer dat de 'fout' van de normaalverdeling zelfs groter is als de levertijd een gamma verdeling volgt. Zelfs voor  $P_1$ -serviceniveaus van 0,6 zorgt een verlaging van de levertijd-variantie voor een stijging van de veiligheidsvoorraad. De auteurs concluderen dat er in dit geval

een bereik van serviceniveaus tot boven 0,6 is, waar het verminderen van de levertijd-variabiliteit zorgt voor een verhoging van de veiligheidsvoorraad.

Figuur 4.1: het bestelpunt in functie van  $y$  voor een uniforme en normale levertijd (bron: Chopra et al., 2004)



Figuur 4.2: bestelpunt in functie van de standaarddeviatie voor een gamma en normale levertijd (bron: Chopra et al., 2004)

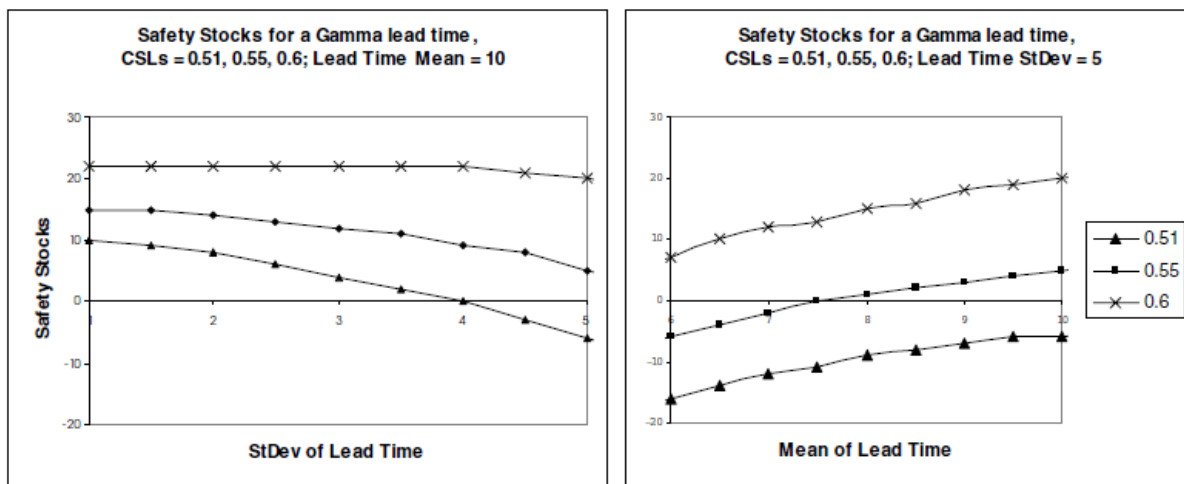


Vervolgens wordt dit proces herhaald, met een lage standaarddeviatie voor de vraag per tijdseenheid ( $\sigma_D = 5$ ). Deze figuur is terug te vinden in **bijlage 3**. Hieruit besluiten de auteurs dat

zelfs voor een lage variatiecoëfficiënt er serviceniveaus zijn tussen 50% en een zekere grenswaarde, waar een verlaging van de levertijd-variabiliteit, zorgt voor een verhoging van de veiligheidsvoorraad. Wel valt het op dat deze grenswaarden sterk afnemen als de variabiliteit van de vraag afneemt. Voor een lage standaarddeviatie van de vraag per tijdseenheid is het onderzochte effect dus minder sterk en is de 'fout' van de normaalverdeling dus ook kleiner.

Daarnaast wordt ook de impact van een reductie van de gemiddelde levertijd op de veiligheidsvoorraad onderzocht. In beide gevallen wordt uitgegaan van een hoge standaarddeviatie voor de vraag per periode ( $\sigma_D = 15$ ). In figuur 4.3 wordt de veiligheidsvoorraad weergegeven voor levertijden met een Gamma verdeling. Links heeft de verdeling een gemiddelde  $\mu_T = 10$  en een standaarddeviatie  $\sigma_T$  die varieert tussen vijf en één. Rechts heeft de verdeling een vaste standaarddeviatie  $\sigma_T = 5$  en varieert men het gemiddelde  $\mu_T$  van tien naar vijf. Het geval van de uniforme verdeling wordt weergegeven in **bijlage 4**.

Figuur 4.3: veiligheidsvoorraad in functie van de levertijd-variabiliteit (links) en gemiddelde levertijd (rechts) voor gamma levertijden (bron: Chopra et al., 2004).



Uit deze grafieken besluiten Chopra et al. (2004) dat voor  $P_1$ -serviceniveaus tussen 50% en een zekere grenswaarde, een reductie van de levertijd-variabiliteit een verhoging van het bestelpunt en de veiligheidsvoorraad teweegbrengt, terwijl een reductie van de gemiddelde levertijd een vermindering van het bestelpunt en veiligheidsvoorraad met zich meebrengt.

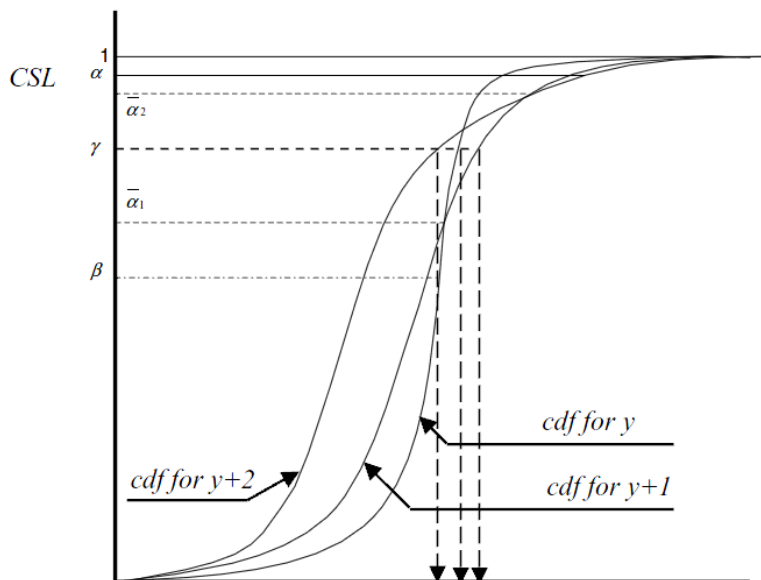
#### 4.2.4 Het bepalen van de grenswaarden van het recursief gedrag

Het is dus belangrijk om de grenswaarde te bepalen waarin het onderzochte effect plaatsvindt. De cumulatieve verdelingsfunctie (CDF) van de vraag tijdens de levertijd toont hoe het bestelpunt  $s_n$  verandert in functie van het serviceniveau. In de onderstaande figuur worden de cumulatieve

verdelingsfuncties weergegeven voor drie levertijden die uniform verdeeld zijn, maar elk een andere variabiliteit hebben. Deze bedraagt respectievelijk  $y$ ,  $(y + 1)$  en  $(y + 2)$ .

Hierbij is  $\bar{\alpha}_1$  het snijpunt tussen de *cdf* van levertijden  $y$  en  $y + 1$ , terwijl  $\bar{\alpha}_2$  het snijpunt is tussen de *cdf* van levertijden  $(y + 1)$  en  $(y + 2)$ . Deze snijpunten stellen het  $P_1$ -serviceniveau voor waarbij beide verdelingen hetzelfde bestelpunt en veiligheidsvoorraad hebben. Voor het serviceniveau  $P_1 = \alpha$  heeft een reductie van de levertijd-variabiliteit van  $(y + 2)$  naar  $(y + 1)$  en vervolgens naar  $y$  een vermindering van het bestelpunt en veiligheidsvoorraad tot gevolg. Voor het serviceniveau  $P_1 = \beta$  zorgt een reductie van de levertijd-variabiliteit voor een verhoging van het bestelpunt en veiligheidsvoorraad. Voor het service-niveau  $P_1 = \gamma$  zorgt een reductie van de levertijd-variabiliteit van  $(y + 2)$  naar  $(y + 1)$  eerst voor een stijging van het bestelpunt en een verdere reductie van  $(y + 1)$  naar  $y$  voor een verlaging van het bestelpunt.

Figuur 4.4: cumulatieve verdelingsfuncties voor de vraag tijdens de levertijd (bron: Wang & Hill, 2006)



Tot slot hebben Wang & Hill (2006) op basis van figuur 4.4 het gedrag van de levertijd-variabiliteit op de veiligheidsvoorraad opgedeeld in drie zones, afhankelijk van het  $P_1$ -service niveau.

1. *Counter zone*: hier leidt een reductie van de onzekerheid van de levertijd tot een verhoging van de veiligheidsvoorraad. Als een onderneming het voorraadniveau wil reduceren, zullen ze de gemiddelde levertijd  $\mu_T$  moeten verminderen en niet de levertijd-variabiliteit. Dit effect komt over het algemeen voor bij  $P_1$ -serviceniveaus tussen de 50-60% en komt op de grafiek overeen met het gebied tussen 50% en  $\bar{\alpha}_1$ .
2. *Recursive zone*: hier leidt een reductie van de onzekerheid van de levertijd eerst tot een verhoging van de veiligheidsvoorraad, totdat de levertijd-variabiliteit een bepaalde waarde

bereikt. Als deze onzekerheid verder wordt gereduceerd, zal dit ofwel geen effect hebben op de veiligheidsvoorraad ofwel de veiligheidsvoorraad verlagen. Dit effect treedt in het algemeen op voor  $P_1$ -serviceniveaus tussen de 60-70% en komt op de grafiek overeen met het gebied tussen  $\bar{\alpha}_1$  en  $\bar{\alpha}_2$ .

3. *Conventional zone*: hier zorgt een reductie van de onzekerheid van de levertijd voor een reductie van de veiligheidsvoorraad, zoals voorspelt door de normaalverdeling en de klassieke bevindingen. Dit komt in het algemeen voor bij serviceniveaus boven 70% en komt op de grafiek overeen met het gebied boven  $\bar{\alpha}_2$ .

### 4.3 De impact van een stochastische levertijd: het gemiddelde of de variantie

In deze sectie worden twee studies van He (2009) en He et al. (2011) besproken, die de analyse van Chopra et al. (2004) bekritisieren. Deze twee studies wijzen erop dat Chopra et al. (2004) het optimale bestelpunt ( $s$ ) bepaalden op basis van een vooraf aangenomen bestelhoeveelheid  $Q$ , terwijl het bestelpunt ( $s$ ) juist afhankelijk is van de bestelhoeveelheid ( $Q$ ). He et al. (2011) wijzen erop dat de aanpak van Chopra et al. (2004) niet optimaal is aangezien de twee beslissingsvariabelen  $s$  en  $Q$  afhankelijk zijn van elkaar, daar de laatst vermelde hiermee geen rekening hield. Verder stellen de auteurs dat een daling van het bestelpunt en veiligheidsvoorraad niet noodzakelijk leidt tot een daling van de totale voorraadkost, aangezien dit leidt tot een verhoogd risico op stockbreuk en dus hogere tekortkosten.

Het principe dat Chopra et al. (2004) gebruiken voor het bepalen van het bestelpunt werkt volgens He et al. (2011) als volgt.  $Q'$  is de vooraf bepaalde bestelhoeveelheid bepaald door het EOQ model en  $s'$  het resulterende bestelpunt uitgaande van een constante vraag en stochastische levertijd. Dus:  $s = \mu_L + k * \sigma_L = \mu_T D + k \sigma_T D$ .

De bijhorende totale voorraadkost  $E(s', Q')$ , wordt bekomen door  $s$  en  $Q$  in te vullen in de formule van de totale voorraadkost. Laat  $Q^*$  en  $s^*$  nu de optimale bestelhoeveelheid en bestelpunt zijn, verkregen door een numerieke oplossing van vergelijking deze totale kostenfunctie. Hierbij is  $E(s^*, Q^*)$  de bijhorende optimale totale voorraadkost. He et. Al. (2011) bewijzen dat de vooraf bepaalde  $Q'$  leidt tot een niet-optimaal bestelpunt en totale voorraadkost, door aan te tonen dat  $E(s', Q') \geq E(s^*, Q^*)$ . Verder ontwikkelen ze ook een model waarmee de impact van de levertijdvariabiliteit op het voorraadbeheer kan worden geanalyseerd. Hieruit blijkt dat het  $\sigma_T^2$  en niet  $\mu_T$  is die het voorraadbeheer en totale relevante kosten beïnvloedt.

Dus des te hoger de levertijd-variabiliteit, des te hoger de totale voorraadkost. Dit stemt overeen met de bevindingen uit paragraaf 4.1. Eveneens tonen de auteurs aan dat een hogere levertijd-variabiliteit ook leidt tot een grotere bestelhoeveelheid  $Q$ .

## 4.4 Besluit

In dit hoofdstuk werd de invloed van de onzekerheid van levertijd op de voorraadbeslissingen en – beheer geanalyseerd aan de hand van diverse studies en onderzoeken. De conclusies van deze studies zijn zeker niet overal gelijklopend, maar bevatten wel enkele gezamenlijke resultaten. Het is dus mogelijk om hier enkele klassieke bevindingen uit te formuleren. Ten eerste moet rekening worden gehouden met de levertijd-variabiliteit bij het bepalen van de optimale voorraadpolitiek. Ten tweede zorgt een stijging van de levertijd-onzekerheid of levertijd-variabiliteit enerzijds tot een stijging van de logistieke kost en de voorraadkost en anderzijds voor een stijging van de bestelhoeveelheid en veiligheidsvoorraad. Het zorgt ook voor een daling van het serviceniveau. Ten derde heeft de gemiddelde levertijd weinig of zelfs geen invloed op de optimale voorraadkost en de optimale bestelhoeveelheid. De gemiddelde levertijd heeft wel een invloed op het bestelpunt en de veiligheidsvoorraad, hoewel de impact van de gemiddelde levertijd op deze laatste factor minder groot is als de levertijd-variabiliteit.

Uit de analyse van Chopra et al. (2004) blijkt dat voor serviceniveaus tussen de 50% en een zekere grenswaarde, de klassieke veronderstellingen echter foutief zijn en dat een reductie van de levertijd-variabiliteit zorgt voor een verhoging van de veiligheidsvoorraad. De auteurs geven aan dat de gemiddelde levertijd moet worden gereduceerd en niet de variabiliteit, wil men de voorraden reduceren. Dit onderzochte effect van de onzekerheid van de levertijd op de veiligheidsvoorraad is groter wanneer de vraag per periode ook een grotere variabiliteit heeft en/of wanneer de levertijd een Gamma verdeling volgt.

Het onderzoek van He (2009) en He et al. (2011) tracht de nieuwe bevindingen van Chopra et al (2004) te ontkrachten en aan te tonen dat de klassieke bevindingen wel degelijk correct zijn. De auteurs geven aan dat een vermindering van de veiligheidsvoorraad geen waarborg geeft op een lagere voorraadkost. Er wordt aangetoond dat de assumptie van een vooraf bepaalde bestelhoeveelheid ( $Q$ ) leidt tot een goede schatting voor het bestelpunt ( $s$ ), maar dat de resulterende totale voorraadkost niet noodzakelijk optimaal is. Dit wil zeggen dat de trend of tendens van het bestelpunt niet gebruikt kan worden bij het voorspellen van de totale voorraadkost. Ten slotte geven de auteurs aan dat het wel degelijk de levertijd-variabiliteit en niet de gemiddelde levertijd is, die de voorraadpolitiek en totale kosten beïnvloedt.



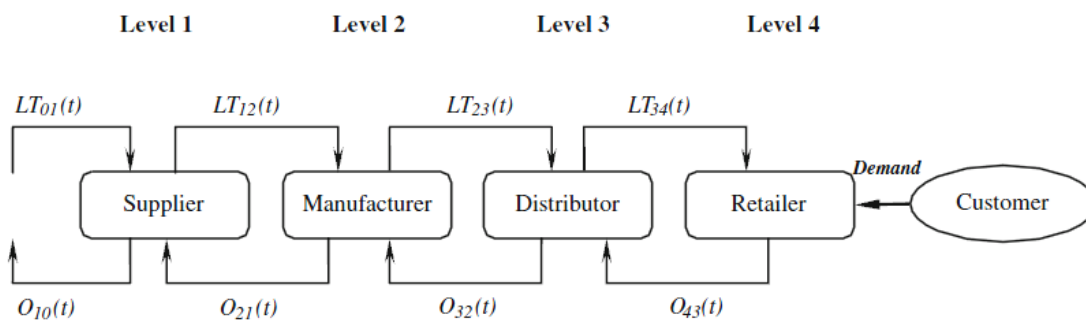
## 5 Invloed van de onzekerheid van levertijd op de prestaties van de supply chain

In dit hoofdstuk wordt de invloed van de onzekerheid van levertijd op de prestaties van de supply chain besproken. De supply chain of toeleveringsketen is een netwerk van klanten, winkeliers, groothandelaars, fabrikanten, leveranciers en dienstverleners. Het voornaamste doel is het maximaliseren van de totaal gegenereerde waarde in de gehele keten. De reductie van de levertijd en haar variabiliteit kan gezien worden als een investering. Voor deze redenen hebben Heydari, Kazemzadeh en Chaharsooghi (2009) & Chaharsooghi & Heydari (2010) de impact van de levertijd en haar onzekerheid op enkele belangrijke prestatieparameters van de toeleveringsketen onderzocht. Beide studies gebruiken hiervoor hetzelfde basismodel. Eerst wordt het gebruikte model kort toegelicht. Vervolgens worden de bevindingen van de eerste studie besproken en daarna de resultaten van de tweede studie. Tot slot in er nog een besluit met de belangrijkste bemerkingen van beide studies.

### 5.1 Model van de toeleveringsketen

Het model van de toeleveringsketen bestaat uit vier *echelons*: een leverancier, een fabrikant, een verdeler en een kleinhandelaar, met slechts één *actor* of deelnemer in elke *echelon* van de keten. In onderstaande figuur wordt het beschouwde model weergegeven.

Figuur 5.1: het model van de toeleveringsketen (bron: Heydari, Kazemzadeh en Chaharsooghi, 2009)



In de bovenstaande figuur staat  $O_{ij}(t)$  voor de geplaatste bestelling van niveau  $i$  naar niveau  $j$  (met  $j = i - 1$ ) in periode  $t$ .  $LT_{ji}(t)$  is de levertijd die nodig is voor een productlevering van niveau  $j$  naar niveau  $i$  periode  $t$ . Indien de voorraad van een speler onvoldoende is om aan een bestelling te voldoen, gaat dit deel van de bestelling verloren (*lost sales*). Ook wordt er verondersteld dat de



capaciteit van de leverancier (stage 0) oneindig is en dat de levertijd naar de klant gelijk is aan nul.

Verder worden de bestelkosten buiten beschouwing gelaten, zodat het effect van 'order batching' geëlimineerd kan worden. De variatie van de vraag per periode is ook een factor die de prestatie van de toeleveringsketen beïnvloedt. Daarom opteren de auteurs voor een deterministische vraag die gekend is voor alle spelers in de keten. Op deze wijze kan het zuivere effect van de levertijdvariabiliteit op de prestaties van de leveringsketen onderzocht worden.

Alle betrokkenen maken gebruik van dezelfde aanvullingsstrategie. Ze gebruiken hiervoor onderstaande formule:

$$O_{it} = D * ELT_{it} - (OH_{it} + SR_{it}) \quad (5.1)$$

Waarbij:

- $O_{it}$ : de bestelhoeveelheid van deelnemer  $i$  in periode  $t$ ;
- $D$ : vraag van de klant (deterministisch);
- $ELT_{it}$ : de geschatte levertijd voor deelnemer  $i$  in periode  $t$ ;
- $OH_{it}$ : huidige voorraad van deelnemer  $i$  in periode  $t$ ;
- $SR_{it}$ : het geplande ontvangst van bestellingen voor deelnemer  $i$  in periode  $t$ .

Elke deelnemer maakt een schatting van de onzekere levertijd voor de berekening van de bestelhoeveelheid. In dit model wordt hiervoor het gemiddelde van de twee 'lagged values' of het voortschrijdend gemiddelde gebruikt:

$$ELT_{it} = \frac{LT_{i(t-2)} + LT_{i(t-1)}}{2} \quad (5.2)$$

Er zijn geen bestelkosten en alle bestellingen worden geplaatst met het oog op de tegemoetkoming van de vraag tijdens de levertijd. Hierdoor is geen cyclische voorraad in het systeem aanwezig. Bovendien wordt in deze aanvullingsstrategie geen rekening gehouden met de veiligheidsvoorraad en is de veiligheidsfactor ( $k$ ) in dit model dus gelijk aan nul.

## 5.2 Het structureel model en de hypothesen

De auteurs ontwikkelen een model dat de impact van de onzekerheid van levertijd op verschillende performantiemaatstaven onderzoekt. Deze zijn de 'bestelvariantie', het *bullwhip* effect en de indicatoren van het voorraadsysteem. In dit causaal model worden drie hypothesen opgesteld. Vervolgens wordt het model gesimuleerd aan de hand van numerieke data. Ten slotte worden er statistische tests uitgevoerd, die al dan niet aangeven of de veronderstelde hypothesen significant zijn.

Allereerst onderzoeken Heydari et al. (2009) het effect van de levertijd-onzekerheid op de bestelhoeveelheid. Algemeen wordt aangenomen dat een grotere onzekerheid leidt tot hogere variatie in de bestelhoeveelheid, hoewel het effect tweeledig is. Enerzijds kan het leiden tot een algemene verhoging van de bestelvariantie op alle niveaus van de toeleveringsketen, anderzijds kan de stijging van de bestelvariantie in de bovenste niveaus van de keten groter zijn dan in de lagere niveaus. Dit laatste houdt in dat een grotere levertijd-onzekerheid mogelijk kan leiden tot een stijging van het zogenaamde *bullwhip* effect. De eerste hypothese in het structureel model luidt als volgt:

- H1: de variatie van de levertijd en de variantie van de bestelhoeveelheid zijn positief gerelateerd.

Ten tweede onderzoeken de auteurs de volgende stelling. "Groeiende voorraadniveaus –als gevolg van een stijgende variatie van de bestelhoeveelheid– leiden tot meer stockbreuken in latere periodes, als gevolg van een versterkte reactie van het voorraadsysteem. In deze latere periodes zal een onderneming een grotere voorraad aanhouden, als reactie op de stockbreuken. Zo zal deze cyclus zich blijven herhalen". Er wordt onderzocht of zulke fluctuaties van het voorraadniveau en aantal stockbreuken indirect worden veroorzaakt door de levertijd-variabiliteit. Bijgevolg luiden de tweede en derde hypothese van het structurele model als volgt:

- H2: de variatie van de bestelhoeveelheid en het voorraadniveau in de toeleveringsketen zijn positief gerelateerd.
- H3: de variatie van de bestelhoeveelheid en het aantal stockbreuken in de toeleveringsketen zijn positief gerelateerd.

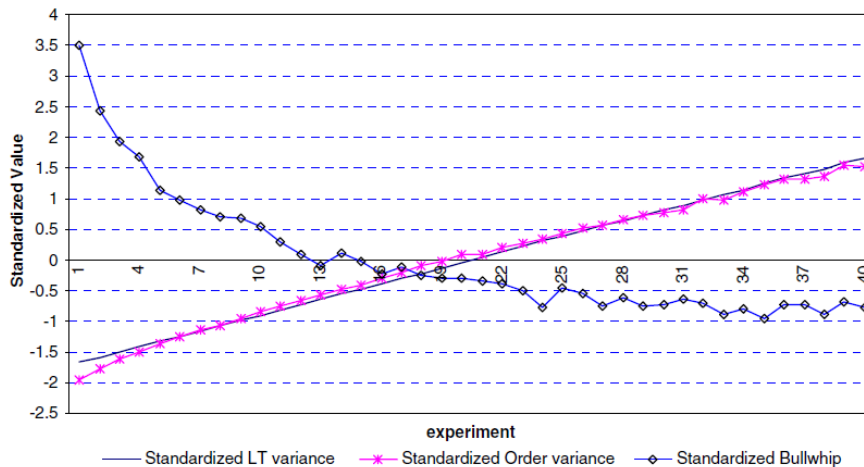
### 5.3 Toetsen van de hypothesen

Het toetsen van de hypothesen gebeurt aan de hand van numerieke data. De vraag is gelijk aan 40 eenheden per periode. De levertijden hebben een gemiddelde van 15 tijdseenheden en een variantie wordt systematisch verhoogd van 0,5 tot 20 tijdseenheden, met tussenstappen van 0,5. Voor elke levertijd-variantie wordt de simulatie tien maal herhaald en het gemiddelde hiervan wordt gebruikt in de analyse. Elke simulatie-run duurt 5 000 periodes. Om invloed van onstabiele gegevens te voorkomen, worden de gegevens van de eerste 500 periodes buiten beschouwing gelaten. Figuur 5.2 geeft de simulatieresultaten weer. Merk op dat de waardes zijn gestandaardiseerd, waardoor de tendensen geplotted kunnen worden in een gemeenschappelijke grafiek.

Er is duidelijk te zien dat een stijging van de levertijd-variantie niet gepaard gaat met een stijging van het bullwhip effect, maar eerder zorgt voor een daling. Er kan wel een gemeenschappelijke

tendens worden waargenomen tussen de variabiliteit van de levertijd en de bestelhoeveelheid. De correlatiecoëfficiënt tussen beide parameters is  $r = 0.9962$ , wat duidt op een zeer hoge en positieve correlatie. Dit betekent dat in het onderzochte model de variatie van de bestelhoeveelheid zal toenemen naarmate de variatie van de levertijd toeneemt.

Figuur 5.2: gestandaardiseerde resultaten van de simulatie (bron: Heydari, Kazemzadeh en Chaharsooghi, 2009)



Vervolgens wordt de relevantie van het structurele model getest aan de hand van de gestandaardiseerde data. De veronderstelde hypothesen en hun bijhorende  $t$ -waarden worden in zijn statistisch significant. De chi-kwadraatwaarde en RMSEA (root mean square error approximation) geven aan dat er een goede 'fit' is van het model. De SMR (squared multiple correlation) voor de structurele vergelijkingen bedragen respectievelijk 0.99, 0.99 en 0.90. De interpretatie van de SMR is analoog aan de  $R^2$ -statistiek van regressie-analyse. Alles wijst er dus op dat de veronderstelde hypothesen aanvaarden mogen worden.

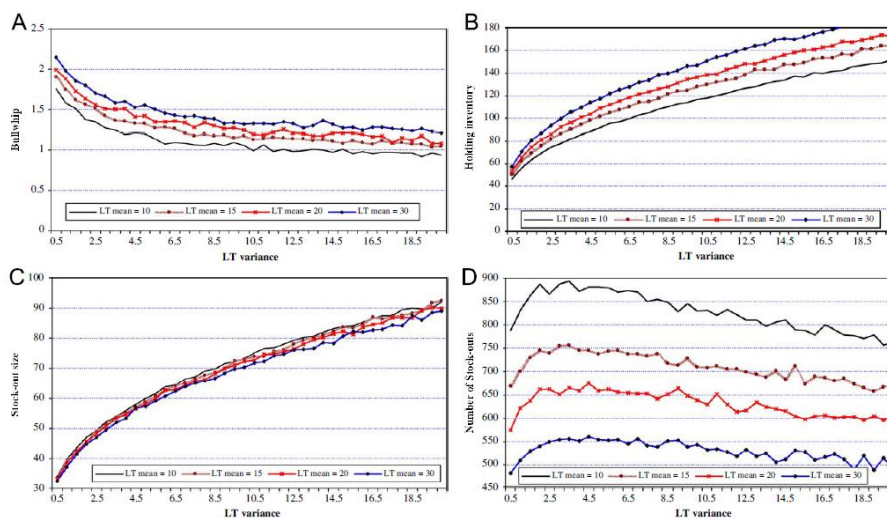
## 5.4 De invloed van een onzekere levertijd: het gemiddelde of de variatie

Chaharsooghi en Heydari (2010) breiden hun vorige studie uit en onderzoeken naast het effect van de levertijd-variabiliteit ook de gemiddelde levertijd op de prestaties van de toeleveringsketen. Het doel van dit onderzoek is het bepalen welke van de twee levertijd parameters het meeste invloed heeft op de prestaties van de leveringsketen. Het model is identiek aan dat van Heydari et al. (2009). Ook hier wordt het model gesimuleerd aan de hand van numerieke data. Vervolgens worden de resultaten geanalyseerd met behulp van een canoniek correlatie model.

### 5.4.1 Invloed van gemiddelde en variantie op prestatie maatstaven

De vraag is nog steeds gelijk aan 40 eenheden per periode. De gemiddelde levertijd wordt systematisch verhoogd van 1 tot 30 tijdseenheden, met tussenstappen van één tijdseenheid. De variatie van de levertijd wordt weer systematisch opgedreven van 0,5 naar 20 tijdseenheden (met een tussenstappen van 0,5) en dit voor elke waarde van de gemiddelde levertijd. Elke combinatie van de twee parameters wordt tien maal herhaald en het gemiddelde wordt dan weer gebruikt in de analyse. Om toegang van onstabiele gegevens te voorkomen, worden de gegevens van de eerste 500 periodes buiten beschouwing gelaten. Onderstaande figuur toont de trend (tendens) van een aantal prestatie-indicatoren in functie van de levertijd-variabiliteit voor vier verschillende waarden van de gemiddelde levertijd ( $\mu_T=10,15,20,30$ )

Figuur 5.3: trend (tendens) van verschillende prestatie-indices in functie van de levertijd-variantie voor vier verschillende waarden van de gemiddelde levertijd (bron: Chaharsooghi & Heydari, 2010).



Ten eerste toont fig. 5.3A dat het *bullwhip* effect afneemt bij een toename van de levertijd-variabiliteit. Het *bullwhip* effect neemt echter toe als de gemiddelde levertijd toeneemt. Ten tweede geeft fig. 5.3B een positieve relatie weer tussen het voorraadniveau de gemiddelde levertijd enerzijds en het voorraadniveau en de variantie van de levertijd anderzijds. Ten derde geeft fig. 5.3C een positieve relatie weer tussen de grote van de stockbreuk en de levertijd-variantie, terwijl er een negatieve relatie is tussen de grote van de stockbreuk en de gemiddelde levertijd. Tot slot toont fig. 5.3D dat het aantal stockbreuken een complexere relatie heeft met de levertijd. Het aantal stockbreuken stijgt eerst als de levertijd-variantie wordt verhoogd, maar daalt wanneer de

levertijd-variantie een zekere grens bereikt. Verder is er een negatieve relatie tussen het aantal stockbreuken en de gemiddelde levertijd.

Deze resultaten geven een eerste inzicht in het gedrag van de prestatimaatstaven, maar zijn onvoldoende voor een uitgebreide analyse. Het is niet mogelijk om hieruit af te leiden of het de gemiddelde levertijd of variantie van de levertijd is die de grootste invloed heeft op de prestatie-indicatoren. Om dit te onderzoeken gebruiken de auteurs een canonieke correlatie-analyse.

#### 5.4.2 Canonieke correlatie analyse

De canonieke correlatie analyse gaat na of de *predictor* (onafhankelijke) variabelen een invloed hebben op de *criterion* (afhankelijke) variabelen. In deze studie bestaan de *predictor* variabelen uit de gemiddelde levertijd en de variatie van de levertijd. De *criterion* variabelen zijn de vier onderzochte prestatimaatstaven bestaande uit het *bullwhip* effect, het voorraadniveau, de grootte van de stockbreuk en het aantal stockbreuken. Aangezien er slechts twee onafhankelijke variabelen zijn, worden twee lineaire combinaties gevormd. Deze lineaire combinaties worden ook wel de 'variates' genoemd.

Vervolgens worden de canonieke coëfficiënten en canonieke correlaties van deze twee combinaties berekend, alsook de correlatie tussen de *variates* en de originele variabelen. Deze correlaties worden ook wel eens de 'ladingen' genoemd. Ze worden in de literatuur gebruikt voor het interpreteren van relaties indien er multi-collineariteit aanwezig is.

Chaharsooghi en Heydari (2010) vinden hoge waarden voor de canonieke correlatie. Deze bedragen 0,9903 en 0,9531 voor de resp. 1<sup>ste</sup> en 2<sup>de</sup> lineaire combinatie. Dit geeft aan dat de *predictor*-variabelen een grote impact hebben op de *criterion* variabelen. Er werd ook een *Wilk's Lambda* test uitgevoerd en beide correlaties zijn significant op het  $p=0,05$  niveau. Verder vermelden de auteurs dat meer dan 52,88% van de variantie van de afhankelijke variabelen wordt verklaard door de onafhankelijke variabelen van de eerste lineaire combinatie en 34,85% van de variantie door de tweede lineaire combinatie. In totaal wordt dus 87,72% van de variantie van de prestatimaatstaven verklaard door de onafhankelijke variabelen. De auteurs concluderen dat er een significante relatie bestaat tussen de prestatimaatstaven en de levertijdparameters. De resultaten worden enkel geïnterpreteerd op basis van de eerste lineaire combinatie, omdat deze de hoogste correlatie heeft en de grootste variantie van de afhankelijke variabelen verklaard.

Uit de studie blijkt dat de canonieke coëfficiënt van de levertijd-variantie (-0,90918) is groter (in absolute waarde) dan die van de gemiddelde levertijd (-0,26559). De 'lading' van de levertijd-variantie (-0,9657) is ook groter dan die van de gemiddelde levertijd (-0,4592). Ook is het teken van de canonieke correlaties in overeenstemming met het teken van de 'ladingen'. Hieruit besluiten

de auteurs dat de variantie van de levertijd een grotere invloed heeft op de prestatie maatstaven van de logistieke keten dan de gemiddelde levertijd.

## 5.5 Besluit

In de studies hebben de auteurs de invloed van de gemiddelde levertijd en levertijd-variantie op de prestaties van de toeleveringsketen onderzocht. Deze keten bestaat uit vier opeenvolgende echelons en er werd getracht het zuivere effect van de levertijd-variabiliteit en/of gemiddelde levertijd te analyseren. De conclusies van deze twee studies zijn de volgende:

De levertijd-variantie beïnvloedt het voorraadsysteem door een verandering van de variantie van de bestelhoeveelheden. Een stijging van de levertijd-variantie zorgt ervoor dat het verschil tussen opeenvolgende bestelhoeveelheden groter wordt. Een ander belangrijk effect van de levertijd-variantie is het feit dat het fluctuaties van het voorraadniveau veroorzaakt. Een stijging van de levertijd-variantie kan zorgen voor een simultane stijging van zowel het voorraadniveau als het aantal stockbreuken. Een verhoging van de levertijd-variantie in een levertijd gevoelige omgeving zonder veiligheidsvoorraad, heeft dan weer geen invloed op het *bullwhip* effect.

Het effect van de levertijd-variantie op de gemeten prestatie maatstaven is groter dan het effect van de gemiddelde levertijd. In een levertijd gevoelige omgeving zonder veiligheidsvoorraad, heeft de levertijd-variantie een directe invloed op het voorraadniveau en de grootte van de stockbreuk, die groter is dan de invloed van de gemiddelde levertijd. Een reductie van de levertijd gerelateerde variabelen kan leiden tot een conflict tussen de verschillende prestatie maatstaven. Een verlaging van bijvoorbeeld de gemiddelde levertijd zorgt voor een vermindering van het *bullwhip* effect, maar zorgt ook voor een verhoging van het aantal stockbreuken.



## **6. Invloed van de onzekerheid van levertijd op keuze van transportmiddel**

De keuze van transportmiddel door bedrijven is afhankelijk van vele factoren en de belangrijkste werden reeds opgesomd in hoofdstuk twee. In dit hoofdstuk wordt er onderzocht of de onzekerheid van levertijd een invloed heeft op de keuze van transportmiddel door bedrijven.

McGinnis (1989) onderzocht elf verschillende studies die de keuze van transportmiddel behandelen. Eén van zijn bevindingen is dat zeven factoren een invloed hebben op de keuze van het transportmiddel, namelijk: de vrachtprijzen, de betrouwbaarheid van levertijden, de gemiddelde levertijd, verlies en schade, commerciële overwegingen van de verlader, aspecten van de vervoerder en de productkenmerken. McGinnis geeft aan dat de vrachtprijs, de gemiddelde levertijd en de betrouwbaarheid van de levertijd in elke studie werd opgenomen en dat deze drie variabelen dus het belangrijkste zijn bij de keuze van transportmiddel. Verder geeft *McGinnis* ook aan dat het belang van betrouwbaarheid in tien van de elf gevallen boven het belang van de vrachtprijs wordt geplaatst.

In een ander onderzoek van McGinnis (1990), dat door Murphy and Hall (1995) werd bijgewerkt, concluderen de auteurs dat de verladers meer nadruk leggen op de betrouwbaarheid van de levertijd in vergelijking met zowel kosten als andere diensten.

In een studie van Evers, Harper & Needham (1996) wordt aangehaald dat de verladers zich baseren op hun perceptie van geleverde diensten bij de keuze van een bepaald transportmiddel. In hun onderzoek trachten de auteurs te achterhalen welke de determinanten zijn die de algemene perceptie van drie verschillende transportmiddelen bepalen. Deze vervoerswijzen zijn het spoor-, wegvervoer en een intermodale combinatie van de twee. Ze concluderen dat de gemiddelde levertijd (*transit time*) en de betrouwbaarheid van de levertijd (*reliability*) de twee belangrijkste factoren zijn die de perceptie en bijgevolg ook de keuze van het transportmiddel beïnvloeden.

Uit deze oudere bronnen blijkt dat de betrouwbaarheid van de levertijd een grote rol speelt bij de keuze van het transportmiddel. Om de invloed van de onzekerheid van levertijd op de keuze van het transportmiddel verder te onderzoeken, werden studies uitgevoerd die de kwalitatieve factoren van het vrachtvervoer in monetaire termen trachten uit te drukken. Drie van deze studies worden nu besproken. Daarna wordt een recenter onderzoek van Wiegmans (2010) besproken. Hierin tracht de auteur een verband te leggen tussen de keuze, de kost en de betrouwbaarheid van verschillende transportmodi. Tot slot wordt er een nog een studie van McCue (2012) besproken, waarin de betrouwbaarheid van het intermodaal transport aan bod komt.



## 6.1 Monetaire waardering van de levertijd-onzekerheid

Verschillende studies trachten de betrouwbaarheid van de levertijd en andere kwalitatieve attributen van transportmodi uit te drukken in monetaire termen. De andere kwalitatieve eigenschappen die in zulke studies worden opgenomen zijn onder andere flexibiliteit, schade en verlies, snelheid en flexibiliteit. Dit zijn allemaal belangrijke factoren die een invloed hebben op de keuze van het transportmiddel. De monetaire waardering van deze attributen geeft meer inzicht in deze attributen en helpt academici bij het ontwikkelen van theoretische modellen.

Eén van deze studies werd uitgevoerd door Fowkes et al. (2004). Hierin onderzochten de auteurs in welke mate ondernemingen betrouwbare levertijden waarderen. De vertragingen en de onzekerheden van levertijden brengen immers hoge kosten met zich mee. In hun onderzoek wordt een onderscheid gemaakt tussen drie soorten vertragingen:

- een vertraging als gevolg van een toename in de levertijd (DT);
- een toename in de spreiding van aankomsttijden (SP);
- een 'geplande vertraging' in de oorspronkelijke vertrektijd (SH).

Het onderzoek werd uitgevoerd aan de hand van interviews bij veertig verladers, vervoerders en *third party logistics providers* in Engeland. Vervolgens worden de gegevens verwerkt met behulp van de 'Leeds Adaptive Stated Preference' methode (LASP). Tot slot worden de waarderingen voor de drie soorten vertragingen gepresenteerd en besproken. De resultaten van het onderzoek zijn terug te vinden in [Bijlage 12](#) en zijn gebaseerd op de meest robuuste resultaten. De t-waarden zijn over het algemeen significant, wat aangeeft dat een vermindering van de drie soorten vertragingen als positief wordt gewaardeerd. De resultaten van de gehele steekproef geven aan dat de waarde van de vertragingstijd (DT) wordt geschat op 107p/min (pennies/min), gevolgd door de waarde van de spreiding van de levertijd (SP) met 85p/min en als laatste het 'geplande uitstel' (SH) met een geschatte waarde van 66p/min. De gemiddelde afstand bedraagt 280 kilometer en de gemiddelde kost per kilometer is ruim één pond. Het is deze tweede parameter (SP) die het beste aansluit bij de omschrijving van de onzekerheid van de levertijd.

De studie heeft enkele interessante inzichten. Ten eerste is er een verschil in de waardering van de drie 'vertraging' parameters als een onderneming zelf instaat voor haar transport of als ze beroep doet op een derde partij. Zo heeft deze laatste groep de hoogste waardering voor de 'spreiding van de levertijd'. De auteurs geven aan dat de onzekerheid van de levertijd zeer nadelig is voor de prestaties van het bedrijf waarvoor ze leveren. Een derde partij zal om deze reden mogelijk meer belang hechten aan de onzekerheid van levertijd, om op die manier de service en de klantentevredenheid zo hoog mogelijk te houden. Daarnaast is er een hogere waardering voor de drie vertragingen als het om *just-in-time* of *quick response* verzendingen gaat.

Een andere studie werd uitgevoerd door Danielis, Marcucci en Rotaris (2005). In dit onderzoek worden de vier (belangrijkste) attributen of factoren van het vrachtvervoer geanalyseerd. De auteurs trachten drie van deze attributen uit te drukken in monetaire termen. De onderzoekers verzamelen de nodige informatie via interviews, uitgevoerd in twee Italiaanse regio's. Deze gegevens werden dan verwerkt met behulp van de 'adaptive conjoint analysis' methode (ACA). De vier attributen of factoren die worden onderzocht zijn: vrachtprijs (kost), gemiddelde levertijd, levertijd-variabiliteit, en schade of verlies. De auteurs stellen vast dat er bij benadering een lineair verband is tussen het nut (utility) en de verandering van de onderzochte factor. Dit verband wordt voorgesteld met behulp van de compensatie index (CI):

$$\bullet \quad CI_{xc} = -\frac{\Delta U_x}{\Delta U_c} \quad (6.1)$$

Waarbij  $\Delta U_x$  het bijkomend nut is, geassocieerd met een stijging in de levertijd van één dag, een stijging in het risico op vertraging van een halve dag of een stijging in het risico op beschadiging van 5%.  $\Delta U_c$  stelt het bijkomend nut voor, geassocieerd met een reductie in transportkost van 5%.  $CI_{RC}$  is dus de compensatie index voor de betrouwbaarheid van de levertijd en geeft aan hoeveel keer een daling in de transportkost van 5% moet worden toegepast, om een stijging in het risico op vertraging van een halve dag te compenseren. Daarnaast zijn er ook nog de  $CI_{TC}$  (compensatie index voor de gemiddelde levertijd) en de  $CI_{DC}$  (compensatie index voor verlies en schade).

De resultaten duiden aan dat er een hoge aversie is voor een risico op vertraging. Dit wil zeggen dat bedrijven relatief gezien een hogere compensatie verwachten voor een stijging van de levertijd-onzekerheid. In de studie wordt aangegeven dat één uur onverwachte vertraging ongeveer 50% hoger wordt gewaardeerd als één extra uur verwachte levertijd. Verder onderzoeken de auteurs of er verschillen zijn in de waardering van de attributen voor verschillende sectoren. Ze besluiten dat sectoren die werken met chemische producten, vezels (fibres) en etenswaren kwaliteitsgevoelig zijn (hoge compensatie indices), terwijl sectoren die werken met metaal producten, niet-metaal mineralen, papierproducten en andere bulk goederen eerder kostgevoelig zijn (lage compensatie indices). Vervolgens geven de auteurs ook aan dat er een significant verschil is in de compensatie index van betrouwbaarheid ( $CI_{RC}$ ) voor het wegtransport en intermodaal transport. De compensatie indices voor de gemiddelde levertijd en haar betrouwbaarheid zijn hoger voor verzendingen via het wegtransport. Het omgekeerde geldt dan weer voor de index van schade en verlies. Volgens de auteurs duidt dit resultaat op het tijdsgerelateerd voordeel dat het wegtransport heeft in vergelijking met het intermodaal (weg-binnenvaart/weg-spoor) vervoer. Daarnaast wordt in de studie aangehaald dat ondernemingen die het *just-in-time* principe toepassen veel gevoeliger zijn voor betrouwbaarheid en dus een hogere compensatie-index hebben.

De derde studie die hier wordt besproken, werd uitgevoerd in Vlaanderen door Witlox en Vandale (2005). Hierin trachten de auteurs de monetaire waarde van verschillende kwalitatieve

eigenschappen te bepalen. Naast de transportkost werden volgende kwalitatieve aspecten in deze studie opgenomen: frequentie, tijd, betrouwbaarheid, flexibiliteit en tot slot verlies en schade. De auteurs geven aan dat in de context van modale keuze in het goederenvervoer, het begrip betrouwbaarheid meestal wordt geassocieerd met tijd en een afwijking van de geplande tijdsbestek. Hier wordt echter een ruimere interpretatie gehanteerd. Punctualiteit, communicatie, het respecteren van het contract en vertrouwen zijn ook kenmerken van betrouwbaarheid. In deze studie wordt er gebruik gemaakt van de *'stated preference methode'*. Voor het experiment werden er diepgaande interviews afgenomen bij grote industriële bedrijven en logistieke dienstverleners gelegen in de haven van Antwerpen en Gent. Hiervoor werden een reeks van 25 transportalternatieven opgesteld, gedefinieerd in de termen van de zes bovenstaande attributen. De attributen hebben vijf verschillende niveaus en de alternatieven die werden opgenomen in het experiment zijn niet gerelateerd aan een specifieke transportmodus. Aan de respondenten werd vervolgens gevraagd om de 25 alternatieven te rangschikken op basis van hun algemene aantrekkelijkheid.

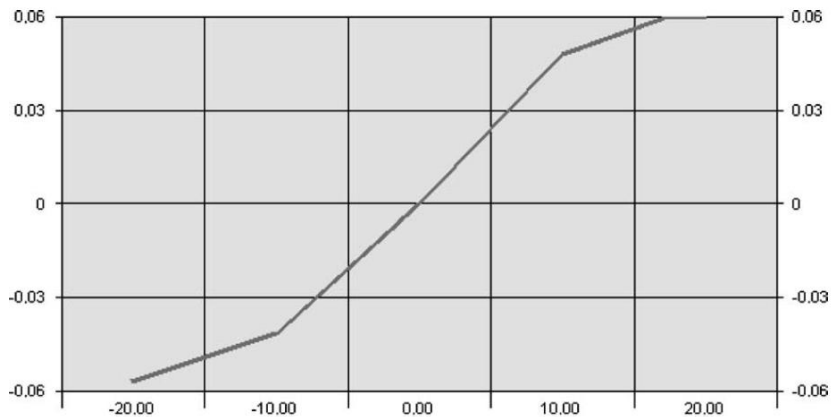
De data werd vervolgens geanalyseerd met de software *Mustard*. Zo is het mogelijk om voor elk kwalitatief attribuut het relatieve gewicht te bepalen in functie van het totale nut. In tabel 6.1 worden de resultaten van zes verschillende industriële sectoren weergegeven, waarbij  $C_0$  de transportkost per ton-km voorstelt.

Tabel 6.1: relatieve gewichten van de verschillende attributen (bron: Witlox & Vandaele, 2005)

Company Attributes	Textiles multimodal 2104 km 120 hours $C_0=0.11$	Steel multimodal 991 km 240 hours $C_0=0.038$	Steel Inland navigation 404 km 55 hours $C_0=0.017$	Cooling machines road 1009 km 48 hours $C_0=0.24$	Grain road 83 km 1.5 hours $C_0=0.12$	Plastics Road 963 km 30 hours $C_0=0.254$
Frequency	0.081	0.007	0.003	0.055	0.263	0.113
Time	0.226	0.029	0.008	0.112	0.114	0.081
Reliability	0.144	0.114	0.001	0.315	0.146	0.122
Flexibility	0.060	0.042	0.004	0.088	0.031	0.302
Loss & damage	0.147	0.084	0.327	0.194	0.048	0
Cost	0.301	0.722	0.658	0.234	0.398	0.328

Uit deze tabel blijkt dat het attribuut 'kost' het belangrijkste is in vijf van de zes gevallen. De attributen 'tijd' en 'betrouwbaarheid' zijn belangrijk voor bedrijven die handelen in textiel en graan. De betrouwbaarheidsfactor is in het bijzonder van belang voor bedrijven die koelingsmachines produceren. Het overschaduwde zelfs de kostenfactor. Daarnaast kan *Mustard* ook gebruikt worden voor het genereren van partiële nutsfuncties. In figuur 6.1 wordt de partiële nutsfunctie van 'betrouwbaarheid' weergegeven. De verschillende nutsniveaus worden weergegeven op de verticale as. De horizontale as toont de verandering in de waarde of niveau van 'betrouwbaarheid'.

Figuur 6.1: partiële nutsfunctie van de betrouwbaarheid (bron: witlox & vandaele, 2005).



Deze grafiek geeft aan dat een hoger niveau van betrouwbaarheid leidt tot een hoger nut en vice versa. Dit geeft aan dat ondernemingen bereid zijn om te betalen voor een verbetering van de betrouwbaarheid of met andere woorden dat ze bereid zijn om meer te betalen voor levertijden met een lagere onzekerheid. Anderzijds geeft dit ook weer dat ondernemingen een compensatie verwachten/eisen voor een hogere levertijd-onzekerheid.

De auteurs concluderen dat er naast tijd en kost ook nog andere attributen zijn die de keuze van het transportmiddel beïnvloeden, waarbij de betrouwbaarheid en de kans op schade en verlies respectievelijk de derde en vierde plaats innemen.

## 6.2 Transportmodi: kost en betrouwbaarheid

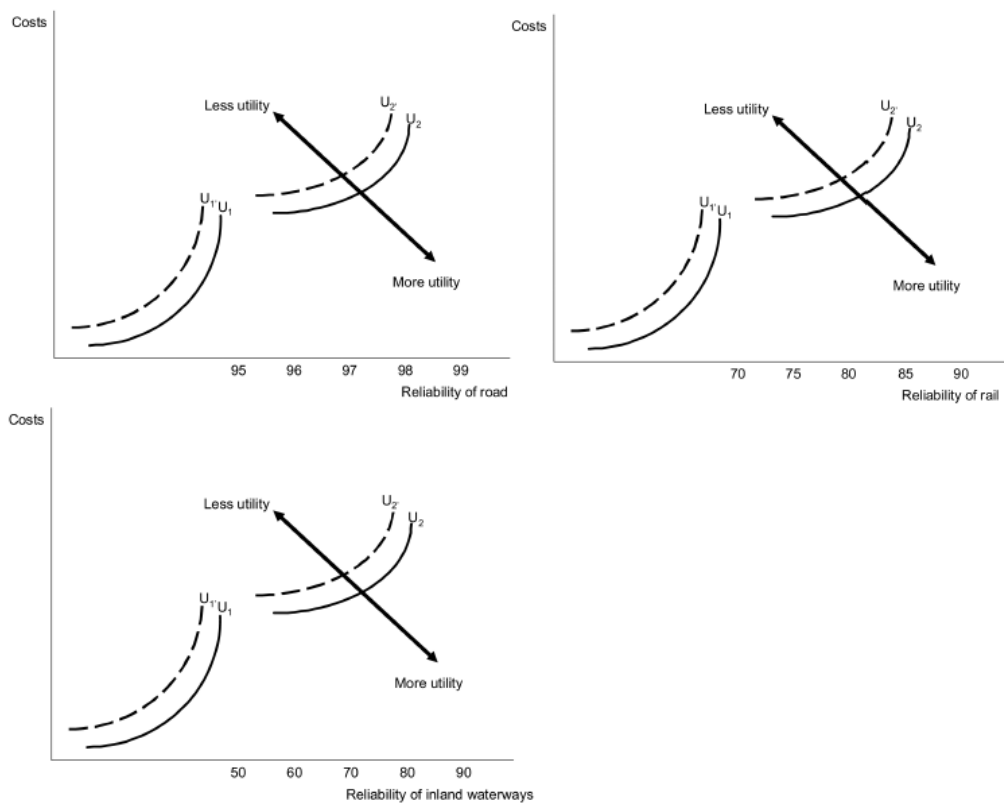
In deze sectie wordt een studie van Wiegmans (2010) besproken. Hierin wordt het verband tussen de keuze, de kost en de betrouwbaarheid van verschillende transportmodi onderzocht. De focus van deze studie ligt op het vrachtvervoer via spoor, weg en binnenvaart in Europa. Zeevaart, pijpleiding en luchtvervoer worden buiten beschouwing gelaten, vanwege hun specifieke karakter en gebrek aan gegevens voor een behoorlijke analyse. De auteur tracht door middel van een transportportfolio de betrouwbaarheid van het vrachttransport te optimaliseren.

De auteur geeft aan dat de betrouwbaarheid één van de belangrijkste kwaliteitsaspecten is van het goederenvervoer. Wiegmans definieert betrouwbaarheid als de mate van zekerheid waarin er aan de overeengekomen verwachte aankomsttijd wordt voldaan door het goederenvervoer-bedrijf. Het doel van de auteur is om een 'transport portfolio' te generen met behulp van verschillende transportmodi, dat het gezamenlijke niveau van de betrouwbaarheid maximaliseert, gelet op het gekozen kostenniveau. Dit is vergelijkbaar met een aandelenportefeuille, waarbij men het risico tracht te verspreiden en het rendement te verhogen. Hierbij geldt de volgende vuistregel: hoe

hoger de gewenste betrouwbaarheid van de levertijd, hoe hoger de vereiste (vracht)prijs. Wiegmans (2010) haalt ook aan dat de betrouwbaarheid één van de belangrijkste kwaliteitsaspecten is geworden. Dit heeft ervoor gezorgd dat de betrouwbaarheid van de levertijd een centrale plaats krijgt in zijn analyse.

Het portfolio verwijst hier naar een reeks transportmodi en/of leveranciers in het bezit van een onderneming of land. De auteur haalt aan dat het vrachtvervoer via spoor en binnenvaart in het algemeen minder betrouwbaar is in vergelijking het wegvervoer. Dit wordt weergegeven in de onderstaande figuur.

Figuur 6.2: indifferentie curves voor kost-betrouwbaarheid-combinaties voor verschillende transportmodi (bron: Wiegmans, 2010).



Enerzijds suggereert dit dat het opnemen van spoorvervoer en binnenvaart in de transportportfolio een slecht idee is. Anderzijds betekent het ook wel dat de 'beloning' aanzienlijk kan zijn, als de kosten van dergelijke transportkosten relatief gezien zeer laag zijn.

## 6.2.1 Transportportfolio: betrouwbaarheidsprestatie in de praktijk

In deze sectie worden de betrouwbaarheidsprestaties voor verschillende transportmodi in verschillende landen besproken. Voor het wegvervoer en binnenvaart is de beschikbare data echter te beperkt om individuele betrouwbaarheidsprestaties te berekenen. De data van deze transportmodi komt uit officiële bronnen, voor het spoorvervoer heeft de auteur gebruik gemaakt van andere (eigen) bronnen. Daarom ligt de nadruk in het portfolio hier op het vrachtvervoer via spoorweg en de combinatie van wegvervoer, spoorvervoer en binnenvaart per land.

In tabel 6.2 wordt een overzicht gegeven van de betrouwbaarheid van de levertijden van het intermodaal goederenvervoer per spoor. Dit wordt gedaan voor twee transportportfolio's met verschillende combinaties van 'herkomst-bestemming'.

Tabel 6.2: betrouwbaarheid, variantie en bereik van intermodaal goederenvervoer per spoor (bron: wiegmans, 2010).

Route	Reliability 2002	Variance	Route	Reliability 2003	Variance
Pl/It	47.00	19.90	Pl/It	57.60	20.80
Be/It	58.10	8.80	Be/It	71.10	7.30
Be/It	58.10	8.80	FR/It	75.60	2.80
FR/It	61.50	5.40	Be/It	76.60	1.80
Lu/NL	61.50	5.40	Lu/NL	76.60	1.80
Be/It	66.50	0.40	Be/It	78.10	0.30
Be/It	67.30	0.40	Be/It	78.40	0.00
Be/FR	70.80	3.90	Be/UK	79.10	0.70
Be/CH	71.60	4.70	Be/CH	79.80	1.40
Be/It	73.50	6.60	Be/FR	83.60	5.20
Be/It	77.60	10.70	Be/It	84.00	5.60
Be/UK	77.80	10.90	Be/It	84.10	5.70
Be/Es	Na		Be/Es	87.10	8.70

2002 and 2003 reliability levels for selected intermodal rail connections

Note: Reliability is defined as arrival within 60 minutes

Source: CER, 2004

De transportportfolio's van 2002 en 2003 hebben respectievelijk een gemiddelde betrouwbaarheid van 65,94% en 77,82%. De berekeningen tonen aan dat de spreiding van de betrouwbaarheid vrij groot is en dat de gemiddelde betrouwbaarheid ver onder het referentiepunt van 90-95% ligt. Hieruit besluit de auteur dat de betrouwbaarheid van de levertijd van het intermodaal goederenvervoer via spoor eerder laag is en dat dit een reden kan zijn waarom verladers eerder terughoudend zijn om dit vervoersmiddel te gebruiken. Dit kan volgens Wiegman (2010) verder onderzocht worden door onder andere een onderscheid te maken tussen de verschillende goederen die worden vervoerd of sectoren die gebruikt maken van dit transportmiddel. Hiervoor is er wel uitgebreide data nodig, die helaas niet ter beschikking is. Verder geeft hij wel aan dat er een duidelijke verbetering van de betrouwbaarheid waarneembaar is tussen beide jaren. Vanuit het

standpunt van het transportportfolio en betrouwbaarheid is het wegtransport bijgevolg een 'logische' keuze en verklaart het waarom bedrijven kiezen voor dit transportmiddel.

### **6.2.2 Betrouwbaarheid intermodaal transport: praktijkstudie Verenigd Koninkrijk**

Uit een studie van McCue (2012) blijkt wel dat de betrouwbaarheid van het intermodaal spoorvervoer in het Verenigd Koninkrijk de laatste drie à vijf jaar sterk is toegenomen. Uit verschillende interviews blijkt dat tien jaar geleden (2001-2002) slechts 70% van de leveringen op tijd arriveerde en dat een service niveau van 90% werd gezien als een uitzondering. Tegenwoordig is een service niveau van 98% de norm en wordt 90% gezien als een ondermaatse prestatie. Deze verbeteringen in betrouwbaarheid is grotendeels te danken aan de drastische veranderingen van de spoorweguitbaters. Ten eerste is het geplande vertrek van de treinen veel consistentier geworden. Ten tweede is er de frequentie sterk toegenomen. Ten derde is de materiaalbehandeling en communicatie sterk verbeterd. Ten slotte hebben de spoorweguitbaters grote investeringen gedaan in technologie en infrastructuur.

De auteur besluit dat de verbeterde betrouwbaarheid van het vrachtvervoer via het spoor een positief effect heeft op de vraag naar dit transportmiddel. Ondernemingen zijn nu sneller geneigd zich te wenden tot het spoor- en intermodaal vervoer. Zelfs bedrijven die het *just-in-time* principe gebruiken, maken gebruik van het spoorvervoer.

## **6.3 Besluit**

Uit verschillende literatuurstudies blijkt dat de betrouwbaarheid van de levertijd een grote rol speelt bij de keuze van het transportmiddel. In andere studies werd getracht om een monetaire waardering te geven aan de betrouwbaarheid van de levertijd en andere kwalitatieve attributen van het vrachtvervoer (Fowkes et al., 2004; Danielis et al., 2005 & Witlox en Vandaele, 2005). Deze studies tonen aan dat er over het algemeen een sterke preferentie is voor de betrouwbaarheid van de levertijd over de kost. Ze geven aan dat er een hoge bereidheid is van ondernemingen om meer te betalen voor de kwaliteit een transportmiddel. Dit vooral voor de betrouwbaarheid, maar ook voor snelheid (gemiddelde levertijd) en veiligheid (verlies en schade). Deze studies geven ook aan dat het belang van betrouwbaarheid significant is bij het maken van een keuze van het transportmiddel. Wel geven de auteurs aan dat de resultaten gebaseerd zijn op regionale gegevens en dat men voorzichtig moet zijn met het veralgemenen van deze resultaten.

Wiegmans (2010) geeft aan dat het transportportfolio voor goederenvervoer van nut kan zijn voor bedrijven, omdat het een beter inzicht geeft in de betrouwbaarheid van verschillende transportmodi over verschillende combinaties van 'herkomst-bestemming' of zelfs voor verschillende landen. De berekeningen tonen aan dat spreiding van de betrouwbaarheidsniveaus groot zijn en dat de gemiddelde betrouwbaarheid van het spoorvervoer en binnenvaart relatief laag is. Het transportportfolio verklaart dus deels waarom ondernemingen het meer betrouwbare wegtransport verkiezen boven de minder betrouwbare alternatieven. Vanuit het standpunt van betrouwbaarheid is het wegtransport bijgevolg een 'logische' keuze. Dit sluit deels aan bij de bevindingen uit paragraaf 6.1, waaruit bleek dat ondernemingen bereid zijn om meer te betalen voor betrouwbare transportmodi. De auteur geeft aan dat het huidige beleid zich moet richten op maatregelen die de betrouwbaarheid van de binnenvaart en spoorvervoer verhogen en de kosten verlagen, om deze transportmiddelen aantrekkelijker te maken voor ondernemingen en verladers. Tot slotte geeft Wiegmans (2010) aan dat er nog opportuniteiten zijn voor verder onderzoek in dit vakgebied, maar dat er ook nog verscheidene uitdagingen zijn. Eén hiervan is het verkrijgen van gespecificeerde en eenduidige data.

Tot slot geeft McCue (2012) wel aan dat de betrouwbaarheid van het spoor- en intermodaal in het Verenigd Koninkrijk de laatste drie à vijf jaar zeer sterk is verbeterd. Ondernemingen hebben hier positief op gereageerd en de vraag naar dit vervoersmiddel is hierdoor ook sterk toegenomen.





## **7. Reductie van de levertijd-onzekerheid: het splitsen van leveringen**

De levertijd-onzekerheid heeft gevolgen voor het voorraadbeheer en alzo voor de logistieke kost en de toeleveringsketen. Het verbeteren van de levertijdprestaties speelt een belangrijke rol bij de samenwerking tussen leverancier en afnemer. Er bestaan strategieën om de onzekerheid van de levertijd of de gevolgen van deze onzekerheid te reduceren: het delen van informatie, betere communicatie, gezamenlijke planning, 'outsourcing' van logistieke activiteiten en het splitsen van bestellingen of leveringen. In dit hoofdstuk wordt het effect van de laatst vermelde strategie op de levertijdprestaties en logistieke kost onderzocht.

### **7.1 Definitie en omschrijving van een gesplitste bestelling**

Het splitsen van bestellingen of 'order splitting' wordt gedefinieerd als het splitsen van een bestelling over een aantal leveranciers om zo het risico op van een stockbreuk tijdens de levertijd te verminderen. Elke leverancier levert zijn deel van de bestelling ten gepaste tijde. De tijd tot de eerste levering en tussen opeenvolgende leveringen wordt aanzienlijk verminderd, waardoor de veiligheidsvoorraad verminderd kan worden zonder een grotere kans op een stockbreuk. Met dezelfde veiligheidsvoorraad kan met andere woorden een hoger serviceniveau bereikt worden. Ook de cyclusvoorraad kan worden verminderd. Het splitsen van bestellingen leidt wel tot een hogere bestelkost en een hogere aankoopprijs per eenheid, door een verlies van hoeveelheidskorting omwille van een kleinere bestelhoeveelheid per leverancier (Kelle en Silver, 1990). Indien de levertijd onzeker is, kan de verwerving van producten uit twee of meerdere bronnen besparingen opleveren in de voorraad- en tekortkosten. Schaalvoordelen worden behaald indien deze besparingen groter zijn dan de toename in de bestelkost (Ramesesh et al., 1991).

Een andere reden voor het splitsen van bestellingen, ontstaat wanneer een onderneming werkt met slechts één betrouwbare leverancier. Wanneer deze betrouwbare bron niet beschikbaar is, kan de onderneming opteren om de bestelling te splitsen over een aantal leveranciers totdat een betrouwbare leverancier opduikt (Kelle & Miller, 2001).

Er bestaan een aantal voordelen verbonden aan de samenwerking met slechts één leverancier. Door deze unieke samenwerking ontstaat 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 zijde van de leverancier, 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 één leverancier kan leiden tot zelfgenoegzaamheid betreffende levertermijn en

aankoopvoorwaarden die niet in overeenstemming zijn. Indien de gekozen leverancier een ernstig probleem ondervindt, bestaat er geen alternatieve bron van aanbod die onmiddellijk beschikbaar is (Hill, 1996).

In de literatuur werd al veel onderzoek verricht naar het splitsen van bestellingen. Het belangrijkste punt dat in verschillende onderzoeken naar voren komt, betreft of de besparingen in de voorraad- en tekortkosten wel opwegen tegen de toegenomen bestelkosten. Hoewel verscheidene studies theoretisch aantonen dat het 'bundelen' van de levertijd risico door het splitsen van bestellingen zinvol kan zijn, is er recente kritiek dat academici en onderzoekers het belang van enkele belangrijke zaken over het hoofd hebben gezien. Deze zijn de schaalvoordelen van het transport, de omvang van de transportkosten in verhouding tot de voorraadkosten, de 'in-transit' voorraad component en de kans op gecorreleerde levertijden (Thomas & Tyworth, 2006).

Tal van onderzoekers nemen aan dat de kost per verzending constant is en dat deze kost niet wordt beïnvloed door de hoeveelheid of gewicht van de lading of de gebruikte transportmodus. Indien de bestelling wordt gesplit zal een kleinere hoeveelheid worden vervoerd. Bijgevolg zal de kost per vervoerde eenheid hoger zijn. Thomas en Tyworth (2005, 2006) vermelden dat enkel Ganeshan et al. (1999) en Tyworth en Ruiz-Torres (2000) de transportkost behandelen als een niet-lineaire functie van de bestelhoeveelheid. Bovendien onderschatten de meeste studies het belang van de transportkosten. Davis & Drum (2003) geven aan dat de transportkost gevoelig hoger is dan de kost van orderinvoer, klantenservice en orderadministratie. Daarnaast geven Thomas en Tyworth (2005) aan dat de 'in-transit' voorraad in vele studies niet wordt opgenomen, terwijl het weglaten van dit element belangrijke implicaties heeft. De auteurs vermelden dat het gelijktijdig splitsen van een bestelling tussen verschillende leveranciers slechts leidt tot een geringe verlaging van de gecombineerde hoeveelheid van de 'in-transit' en cyclus voorraad in het systeem. Het enige voordeel van 'order splitting' is een reductie van de tekortkost (Thomas & Tyworth, 2005). Ten slotte geeft Minner (2003) aan dat de levertijden van verschillende leveranciers positief gecorreleerd kunnen zijn door onder andere 'bottlenecks' in transportsystemen en consolidatie van goederen. Dit bemoeilijkt de analyse en zorgt bovendien voor een verwatering van de voordelen verbonden aan het splitsen van bestellingen.

Thomas & Tyworth (2006) besluiten dat het gelijktijdig splitsen van bestellingen waarschijnlijk niet rendabel is onder normale omstandigheden. Wanneer echter een hoge onzekerheid van de levertijd aanwezig is, kan het splitsen van een bestelling leiden tot betere resultaten en een lagere logistieke kost. De auteurs geven wel aan dat er andere methoden van 'order splitting' zijn die beter werken onder normale omstandigheden. Een mogelijke manier bestaat erin om de volledige bestelling te plaatsen bij één enkele leverancier. Die bestelling wordt vervolgens geleverd in verschillende verzendingen, al dan niet van dezelfde grootte. Dit wordt ook het splitsen van leveringen genoemd. Een andere mogelijkheid bestaat erin om de verschillen in kosten en prestaties van verschillende transportmodi of leveranciers te benutten. Door een mix van

verschillende transportmodi op te stellen, kan een onderneming tegelijk genieten van de service voordelen van een snelle en betrouwbare leverancier en de kostenvoordelen van een onzekere leverancier. Beide methodes houden verband met de levertijd-onzekerheid en worden daarom in de volgende secties kort besproken.

## 7.2 Invloed van gesplitste levering op levertijd-onzekerheid

Van Nieuwenhuysse & Vandaele (2005) onderzochten de impact van het splitsen van leveringen op de onzekerheid van de levertijden in een toeleveringsketen met twee spelers. De afnemer of koper plaatst regelmatig bestellingen bij een leverancier, die de bestelling vervolgens levert in verschillende verzendingen. In het geval dat de levering niet wordt gesplit, kan de productie pas starten als de volledige bestelling is gearriveerd. In het geval dat de levering wordt opgesplitst in verschillende verzendingen, kan de productie starten zodra de eerste verzending (de 'flag') is gearriveerd. Daarom wordt de levertijd betrouwbaarheid gemeten door de voorspelbaarheid van de levertijd van de *flags* indien de leveringen worden gesplit en door de voorspelbaarheid van de levertijd van de volledige bestelling indien de leveringen niet worden gesplit. Hoe hoger de variantie van de aankomst- of levertijden, hoe lager de betrouwbaarheid van leverancier en hoe groter de onzekerheid van de verwachte aanvangstijd van de productierun.

In het model wordt aangenomen dat de bestelhoeveelheid van de afnemer gelijk is aan het aantal eenheden in één productierun ( $N$ ). De aankomsttijden van de bestellingen bij de leverancier zijn onafhankelijk en identiek verdeeld en vertegenwoordigd door een algemene kansverdeling met een bepaald gemiddelde en variantie. De lot-grootte van de opgesplitste verzendingen ( $L$ ) is een gemeenschappelijke deler van de bestelhoeveelheid ( $N$ ). Bijgevolg is het aantal verzendingen voor één bestelling een geheel getal ( $T$ ). De levertijden zijn onafhankelijk van de te transporteren hoeveelheid en zijn onafhankelijk en identiek verdeeld. De auteurs van deze studie tonen aan dat de betrouwbaarheid van de levertijd bij het splitsen van de leveringen, de betrouwbaarheid van de levertijd bij de klassieke methode overtreft. Vervolgens wordt een benadering voor deze levertijdbetrouwbaarheid ontwikkeld.

Om de variantie van de levertijd te bepalen, moet een uitdrukking voor de variantie van de aankomsttijden van de 'flags' worden gezocht. Van Nieuwenhuysse & Vandaele (2005) hebben volgende verband gevonden voor de variantie van de aankomsttijden van de 'flags' en de volledige bestellingen bij de afnemer:

- $$Var[\tau_f(n)] = Var[\tau_0(n)] + 2Cov[\sum_{i=2}^T X_i(n), R(n)] \quad (7.1)$$

Waarbij:

- $\tau_f(n)$ : de tussen aankomsttijd van de 'flags' bij de afnemer;
- $\tau_0(n)$ : de tussen aankomsttijd van een volledige bestelling bij de afnemer;
- R: inactieve periode tussen de actieve periodes bij de leverancier ( $\geq 0$ );
- $X_i$ : verwerkingstijd voor verzending  $i$  bij de leverancier ( $i=1,..T$ );
- $n$ : nummer van de bestelling

Daarna tonen de auteurs aan dat de covariantie in bovenstaande formule bepaalde grenzen heeft en dat ze altijd kleiner of gelijk is aan nul. Ze tonen met andere woorden aan dat:

$$\bullet \quad \text{Var}[\tau_f(n)] \leq \text{Var}[\tau_0(n)] \quad (7.2)$$

Van Nieuwenhuysse & Vandaele (2005) concluderen dat het splitsen van een levering in verschillende verzendingen bij één leverancier leidt tot een lagere levertijd-onzekerheid in vergelijking met de klassieke methode. Ze vermelden wel dat geen rekening werd gehouden met het effect van het splitsen van leveringen op de transportkost. Bij het beoordelen van de algemene doeltreffendheid van het splitsen van leveringen in een bepaalde context, moeten zulke zaken (bijvoorbeeld transportkost, totale logistieke kost) wel in rekening worden gebracht.

### 7.3 Flexible back-up levering

De mogelijkheid van een (flexibele) back-up leverancier in 'noodsituaties' werd onderzocht door Kouvelis & Li (2008). De auteurs geven aan dat de flexibele back-up levering een geschikte oplossing kan bieden in een situatie waar de hoofdleverancier een relatief grote levertijdvariabiliteit heeft. De effectiviteit van dergelijke opties hangt sterk af van de mogelijkheid om accurate levertijd-informatie te verkrijgen nadat de originele bestelling is geplaatst. Men zou kunnen stellen dat de beschikbaarheid van dergelijke informatie tegenwoordig mogelijk is door nieuwe informatietechnologieën of betere coördinatie en gezamenlijke planning van de betrokken partners (Gaukler et al. 2007). Een andere verklaring is het feit dat leveranciers vaak pas kunnen zeggen hoe nauwkeurig hun levertijd zal zijn, nadat de bestelling opgenomen en verwerkt is in hun systeem (Chen & Yu, 2005).

#### 7.3.1 Model en analyse

Beschouw een onderneming die haar bestellingen plaatst bij één leverancier met een onzekere levertijd. De vraag per tijdseenheid waaraan de onderneming wil voldoen is constant. De bestelling, hierna aangeduid als de 'originele bestelling' wordt geplaatst voor de vraag begint. De tijd tussen het plaatsen van de 'originele bestelling' en de aanvang van de vraag is de 'safety lead time' of veiligheidslevertijd. De onderneming kan zich vervolgens verder indekken tegen het risico

van een laattijdige levering door eventueel gebruik te maken van een flexibele back-up levering aan het begin van de 'vraag interval'. Hierbij wordt aangenomen dat de originele leverancier een lagere totale kost per eenheid heeft als de flexibele back-up leverancier, maar de laatstgenoemde heeft een deterministische levertijd van nul tijdseenheden. Deze laatste assumptie wordt later wel nog veranderd. De back-up leverancier kan dus gezien worden als een flexibele 'oplossing' in geval dat de originele levering 'te laat' arriveert. Deze back-up levering kan eventueel ook geleverd worden via een andere transportmodus dan deze van de 'originele levering'. Nadat de exacte informatie van de 'originele levering' beschikbaar is, moet beslist worden hoeveel er bij deze flexibele back-up leverancier besteld wordt en wanneer deze bestelling geleverd moet worden. Belangrijk hierbij is dat de totale relevante kost wordt geminimaliseerd. Deze kost wordt als volgt gedefinieerd:

$$\bullet \quad R(\beta|r) = (c_f - c_d)\beta T + \frac{1}{2} \frac{\pi h}{\pi + h} (\beta T)^2 + \frac{1}{2} \pi (r - \beta)^2 T^2 + \frac{1}{2} h (1 - r)^2 T^2 \quad \text{if } 1 > r > 0 \quad (7.3.a)$$

$$\bullet \quad R(\beta|r) = (c_f - c_d)\beta T + \frac{1}{2} \frac{\pi h}{\pi + h} (\beta T)^2 + \frac{1}{2} \pi (1 - \beta)^2 T^2 + \pi (T - \beta T)(rT - T) \quad \text{if } 1 \leq r \quad (7.3.b)$$

waarbij de beslissingsvariabelen als volgt worden gedefinieerd:

- $\beta$ : de verhouding van de bestelling bij de flexibele back-up leverancier tot T (beslissingsvariabele)
- l: de veiligheidslevertijd van de originele bestelling (beslissingsvariabele)

de parameters in het model zijn:

- $\xi$ : de stochastische levertijd van de originele leverancier
- T: de lengte van het vraag interval met constante vraag
- h: de voorraadkost per eenheid per tijdseenheid
- $\pi$ : de *backorder* kost per eenheid per tijdseenheid
- $c_n$ : de aankoopkost per eenheid bij de originele leverancier
- $c_f$ : de aankoopkost per eenheid bij de flexibele back-up leverancier
- $c_d$ : de krediet per eenheid voor de vervangen goederen
- r: de verhouding van  $(\xi-l)$  tot T

De eerste term in bovenstaande formules is de totale marginale kost van de flexibele back-up levering. De tweede term is de backorder- en voorraadkost voor de eerste  $\beta T$  tijdseenheden, gedekt door de flexibele back-up levering. De derde en vierde term zijn respectievelijk de *backorder*- en voorraadkost voor de laatste  $(1-\beta)T$  tijdseenheden, gedekt door de originele leverancier. In het geval dat  $r \geq 1$  zijn de laatste twee termen beide *backorderkosten*. Voor een gegeven r kan de optimale  $\beta$  bepaald worden door volgende optimalisatie:

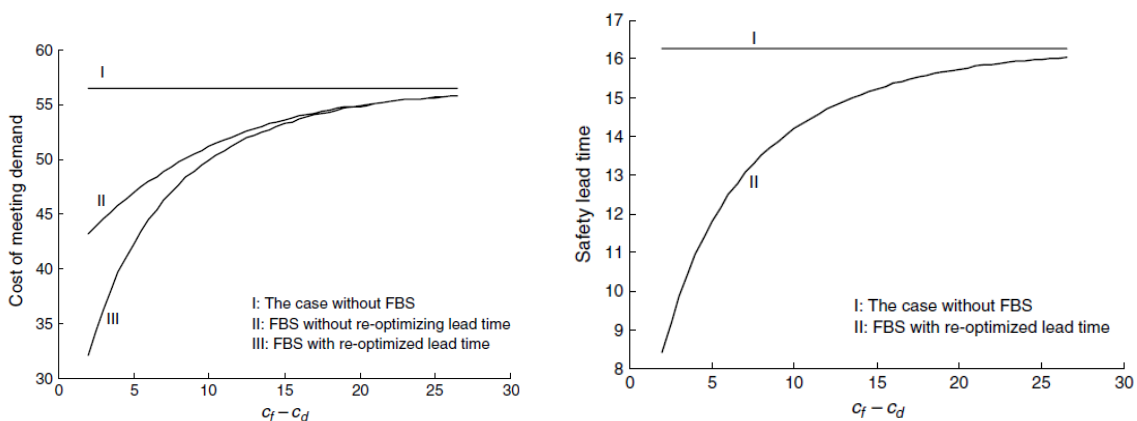
$$\bullet \quad R^*(r) = \min_{0 \leq \beta \leq \min\{r, 1\}} R(\beta|r) \quad (7.4)$$

Vervolgens wordt dit model gebruikt om de optimale keuzes van de flexibele back-up levering (gaat het gebruikt worden en in welke mate) en veiligheidslevertijd te analyseren.

Het gebruik van de flexibele back-up levering is afhankelijk van het verschil in de marginale aankoopkost van de flexibele back-up levering en de originele levering,  $c_f - c_d$ , en de maximum *backorderkost* als gevolg van een laattijdige levering van de originele leverancier,  $\pi rT$ . Enkel als  $\pi rT > c_f - c_d$  is het zinvol om een 'nood' bestelling te overwegen. Hoe later de levering van de originele bestelling of hoe kleiner de marginale aankoopkost, hoe hoger de kans is om gebruik te maken van de flexibele back-up levering. De auteurs geven aan dat de flexibele back-up levering enkel wordt gebruikt als levering van de originele bestelling "laat" genoeg is. Indien  $rT < (c_f - c_d)/\pi$  brengt het gebruik van de flexibele back-up levering geen voordelen met zich mee.

Vervolgens wordt de keuze van de veiligheidslevertijd onderzocht. Figuur 8.1.a (links) laat zien hoe de totale relevante kost onder verschillende scenario's verandert met de marginale aankoopkost van de flexibele back-up levering,  $c_f - c_d$ .

Figuur 8.1: totale relevante kosten en veiligheidslevertijd in functie van  $c_f - c_d$  (bron: Kouvelis & Li, 2008)



In scenario één wordt geen gebruik gemaakt van de back-up levering en verandert de kost dus niet met  $c_f - c_d$ . In scenario twee wordt de flexibele back-up leverancier wel gebruikt, maar is de veiligheidslevertijd van de originele bestelling niet opnieuw geoptimaliseerd. In scenario drie wordt de veiligheidslevertijd van de originele levering wel geoptimaliseerd en wordt rekening gehouden met de mogelijkheid van de back-up voorziening. De totale relevante kost stijgt in scenario twee en drie als de marginale kost van de flexibele back-up levering,  $c_f - c_d$ , stijgt en is uiteindelijk bijna gelijk is aan de totale relevante kost van scenario één. De waarde van deze flexibele back-up optie neemt dus af indien de prijs per eenheid kost stijgt. Figuur 8.1.b (rechts) laat zien hoe de veiligheidslevertijd van de originele bestelling verandert met de marginale aankoopkost van de flexibele back-up levering,  $c_f - c_d$ . De optimale veiligheidslevertijd van de originele bestelling stijgt

als de marginale kost van de flexibele back-up levering,  $c_f - c_d$ , stijgt en is uiteindelijk bijna gelijk aan de veiligheidslevertijd van scenario één.

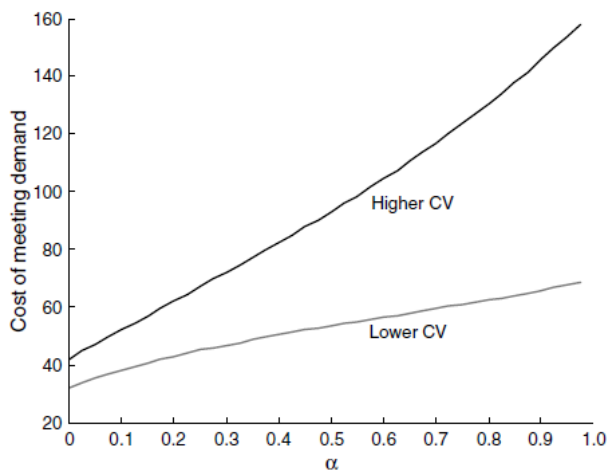
### 7.3.2 Factoren die de flexibele back-up levering beïnvloeden

De eerste factor die de keuze van de flexibele back-up levering beïnvloedt, is het tijdstip waarop de informatie over de exacte levertijd van de originele bestelling beschikbaar wordt. Stel dit tijdstip voor door  $\alpha T$ . Het is duidelijk dat wanneer  $\alpha \leq 0$  de huidige analyse niet verandert. In het geval dat  $\alpha > 0$  kan de beslissing op tijdstip  $\alpha T$  weer geformuleerd worden als in (8.2):

$$\bullet \quad R^*(r) = \min_{0 \leq \beta \leq \min\{r, 1\}} R(\beta|r, \alpha) \quad (7.5)$$

Hierbij is  $R(\beta|r, \alpha)$  de totale relevante kost, gegeven dat de originele bestelling geleverd wordt op tijdstip  $rT$  en de informatie beschikbaar is op tijdstip  $\alpha T (\leq rT)$ . Stel dat  $\beta T$  eenheden van de flexibele back-up levering worden gebruikt, met  $0 \leq \beta \leq r$ . Als deze bestelling geplaatst wordt voor de *backorders* voor het tijdstip  $\alpha T$  op te vangen, dan is de optimale bestelling bij de flexibele back-up levering,  $\beta^*$ , gelijk aan nul indien de  $c_f - c_d > \pi(r - \alpha)T$ . Indien  $c_f - c_d < \pi(r - \alpha)T$ , dan is de optimale bestelling gelijk aan  $\alpha T$ . Figuur 8.2 geeft weer hoe de totale relevante kost verandert in functie van  $\alpha$ . Een stijging van  $\alpha$  zorgt voor een stijging van de totale relevante kosten. Indien de originele levertijd een hoge variatiecoëfficiënt heeft, zal de stijging van de totale relevante kost ook gevoelig hoger liggen dan bij een lage variantie coëfficiënt.

Figuur 8.2: Totale relevante kost in functie van  $\alpha$  (bron: Kouvelis & Li, 2008)



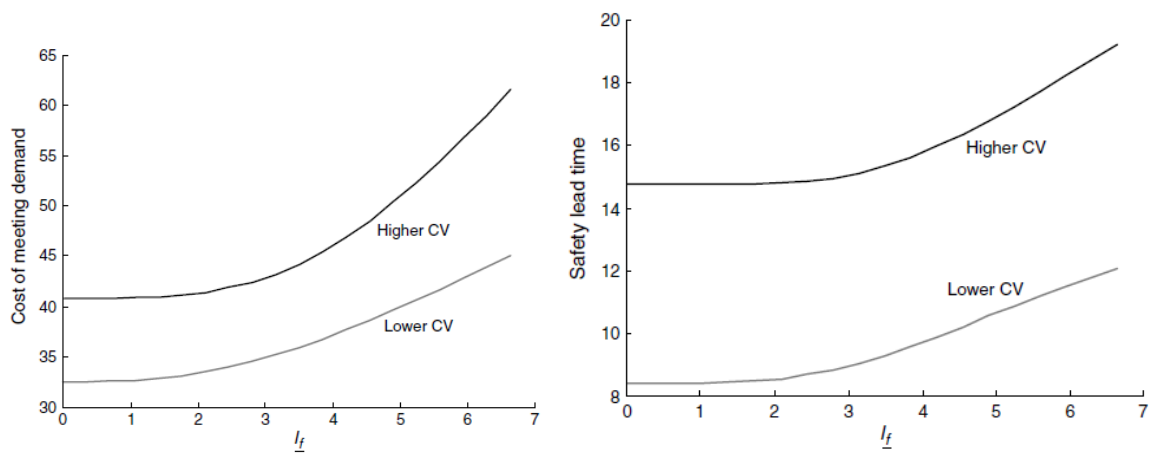


De tweede factor die de keuze van de flexibele back-up levering beïnvloedt, is de impact van een positieve levertijd van de back-up levering. Tot nu toe werd aangenomen dat de flexibele back-up levering een ogenblikkelijke levertijd heeft. Deze assumptie wordt nu achterwege gelaten en de impact van een positieve back-up levertijd ( $l_f$ ) wordt vervolgens onderzocht. Wanneer de (late) levertijd van de originele bestelling,  $rT$ , kleiner is dan de levertijd van de back-up levering,  $l_f$ , dan is het optimaal om de 'noodbestelling' via de flexibele back-up leverancier niet te gebruiken. Indien  $rT \geq l_f$ , kan de optimale keuze van  $\beta$  en  $l_f$  geformuleerd worden als:

$$\bullet \quad R^*(r) = \min_{0 \leq \beta \leq \min\{r, 1\}, l_f \geq l_f} R(\beta, l_f | r) \quad (7.6)$$

Hierbij is  $R(\beta | r, \alpha)$  de totale relevante kost, gegeven dat de originele de flexibele back-up bestelling geleverd worden op respectievelijk tijdstip  $rT$  en  $l_f$ . Deze laatste factor beïnvloedt het gebruik van de flexibele back-up leverancier op twee manieren. Ten eerste kan de back-up levering pas gebruikt worden nadat het vraag interval is begonnen. Ten tweede wordt het gebruik van de back-up optie minder interessant, als  $l_f$  toeneemt. Figuur 7.2(a) geeft aan dat de totale relevante kost stijgt indien de levertijd van de back-up leverancier toeneemt. Ook hier is het effect sterker voor een hoge variantie coëfficiënt. Figuur 7.2(b) geeft een soortgelijk fenomeen weer voor veiligheidslevertijd van de originele bestelling.

Figuur 8.2: (a) totale relevante kost & (b) veiligheidslevertijd in functie van de back-up levertijd (bron: Kouvelis & Li, 2008)



Tot slot halen Kouvelis en Li (2008) nog aan dat de voordelen van de back-up optie groter zijn indien de onzekerheid van de levertijd van de originele leverancier ook groter is. Daarnaast wordt ook opgemerkt dat de flexibele back-up leverancier ook gebruikt kan worden in een 'dual-sourcing' omgeving. Het is dan niet langer een leverancier in noodsituaties, maar wordt beschouwd als een normale leverancier waarbij op regelmatige basis bestellingen worden geplaatst.

## 8. Onderzoek naar het effect van de prestaties aangaande levertijd op de logistieke kost

In dit hoofdstuk wordt een simulatie uitgevoerd met behulp van een rekenblad (Microsoft Office Excel). De simulatie die hier wordt uitgevoerd, is gebaseerd op een studie van Tyworth & Zeng (1998). In deze studie onderzoeken de auteurs het effect van de levertijd-variabiliteit op de logistieke kost, klantenservice en optimale voorraadpolitiek in een continu voorraadsysteem. In hun studie maken de auteurs een sensitiviteit-analyse die weergeeft hoe de totale logistieke kost reageert op wijzigingen in de levertijdparameters. Het doel van de simulatie in het rekenblad is om zelf een sensitiviteit-analyse te maken en de resultaten hiervan te analyseren. Het basismodel dat Tyworth & Zeng (1998) gebruiken voor hun analyse is gebaseerd op het 'inventory-theoretic' model (zie paragraaf 3.3). Vervolgens verfijnen de auteurs dit basismodel door twee elementen aan te passen. Ten eerste wordt een niet-lineaire vrachtprijs ingevoerd, aangezien de kost per eenheid sneller zal stijgen als de vervoerde hoeveelheid wordt verlaagd. Ten tweede wordt een onderscheid gemaakt tussen de levertijd en de effectieve transporttijd of 'transit-time'. De auteurs beschouwen enkel de transporttijd als variabel. De levertijd is met andere woorden opgebouwd uit een vast en variabel gedeelte. Deze aanpassing heeft echter geen effect op de variantie van de levertijd en bemoeilijkt de interpretatie van de resultaten. Daarom wordt in het model van deze simulatie enkel de eerste aanpassing doorgevoerd.

Het model van Tyworth en Zeng (1998) maakt de volgende veronderstellingen:

- a) een *single echelon*, continue voorraadbeheersysteem;
- b) een onafhankelijke vraag voor één product;
- c) de levertijd en vraag per tijdseenheid zijn onafhankelijke en stationaire stochastische variabelen, waarvan het gemiddelde en standaardafwijking gekend zijn of geschat kunnen worden;
- d) er vindt geen *ordercrossing* plaats;
- e) de expliciete of impliciete tekortkost is hoog genoeg om een praktisch operationeel beleid te voeren, waarbij het aantal eenheden tekort klein is in vergelijking met de gemiddelde voorraad

Het model voor de totale jaarlijkse logistieke kost (ETAC) kan worden geformuleerd als (Tyworth en Zeng, p. 92):

$$\bullet \quad ETAC(s, Q) = G(Q)(1 - d) \frac{Rw}{100} + \mu_L \mu_D * V * Y + \left[ \frac{Q}{2} + s - \mu_X \right] * V * W + A * \frac{R}{Q} + ES * B_2 * V * \frac{D}{Q} \quad (8.1)$$

De eerste term in de formule (8.1) slaat op de transportkost. Deze is een niet-lineaire functie in Q en kan, op basis van empirische gegevens, voorgesteld worden door een machtsfunctie. De tweede term refereert naar de voorraadkost tijdens het vervoer. Vervolgens komt de voorraadkost voor

het aanhouden van een cyclus- en veiligheidsvoorraad. De vierde term verwijst naar de jaarlijkse bestelkosten. De laatste term geeft de jaarlijkse stockbreuk of tekortkost weer. Op basis van de data uit tabel 8.1, kan bovenstaande functie als volgt worden geschreven:

$$\bullet \quad ETAC(s, Q) = 44171,2 * Q^{-0,3325} + 12 * \mu_L + \left[ \frac{Q}{2} + s - 96 \right] * 18 + \frac{57600}{Q} + ES * \frac{86400}{Q} \quad (8.2)$$

waarbij:

- $Q$ : vaste bestelhoeveelheid
- $s$ : bestelpunt
- $\mu_L$ : verwachte vraag tijdens de levertijd
- $ES = \int_s^{\infty} (x - s)f(x)dx$  of het verwachte aantal eenheden tekort per aanvulcyclus
- $f(x)$ : de kansdichtheidsfunctie van de vraag tijdens de levertijd

Tabel 8.1: Parameters van de totale logistieke kost (bron: Tyworth & Zeng, 1998, p. 94)

Parameter	Notatie	Waarde
<b>Vraag per tijdseenheid</b>		
Gemiddelde	$\mu_D$	16
Standaarddeviatie	$\sigma_D$	9,6
Jaarlijkse vraag	D	5760
<b>Levertijd (dagen)</b>		
Gemiddelde	$\mu_T$	6
Standaarddeviatie	$\sigma_T$	1,8
<b>Product</b>		
Waarde (\$)	V	60
Gewicht (lb)	w	6
<b>Voorraad</b>		
Voorraadkost (magazijn)	W	30%
Voorraadkost (in-transit)	Y	20%
Bestelkost (\$)	A	10
Tekortkost (per eenheid)	$B_2$	25%
<b>Transport</b>		
Vrachtprijs parameter 1	a	463,8
Vrachtprijs parameter 2	b	-0,3325
Disconteringsvoet	d	50%
Vorm G(Q)		$a(Qw)^2(1-d)$

Het is de bedoeling is om de waarden van het bestelpunt ( $s$ ) en bestelhoeveelheid ( $Q$ ) te bepalen die de totale jaarlijkse logistieke kost minimaliseren. In vergelijking (8.2) zit echter nog een onbekende term,  $ES$ , die zorgt voor problemen bij het minimaliseren van totale logistieke kost.  $ES$  is het verwachte aantal eenheden tekort (*expected shortages*) per aanvulcyclus en wordt weergegeven in vergelijking (8.3). Deze wordt geformuleerd in functie van het bestelpunt ( $s$ ) en de kansdichtheidsfunctie van de vraag tijdens de levertijd  $f(x)$ . De factor  $(x-s)$  zorgt ervoor dat het in het rekenblad niet mogelijk is om de integraal van  $ES$  uit te werken met bijvoorbeeld de functie "NORM.VERD.N". Om de integraal toch te kunnen oplossen werd gebruik gemaakt van de *macro's* in Excel. In deze *macro* werd de regel van Simpson - een benaderingsformule om de numerieke waarde van een integraal te berekenen - gecodeerd. De code van deze macro is terug te vinden in **bijlage 5**.

In deze simulatie werd een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd van de totale logistieke kost onder vijf verschillende scenario's. In elk scenario heeft de kansdichtheidsfunctie van de vraag tijdens de levertijd [ $f(x)$ ] een andere kansverdeling.

### Scenario 1: de normaalverdeling

In het eerste scenario wordt verondersteld dat de vraag tijdens de levertijd normaal verdeeld is. Om de totale jaarlijkse totale logistieke kost in vergelijking (8.2) te minimaliseren, worden de partiële afgeleiden van  $ETAC$  naar  $s$  en  $Q$  bepaald. Hiervoor wordt eerst de uitdrukking van  $ES$  herschreven tot (Moon & Choi, 1998):

$$\bullet \quad ES = \int_s^{\infty} (x - s)f(x)dx = \sigma_L \Psi(k) \quad (8.4)$$

waarbij:

- $\Psi(k) \equiv \phi(k) - k[1 - \Phi(k)]$
- $\phi(k)$ : standaard normale kansverdeling
- $\Phi(k)$ : cumulatieve verdelingsfunctie
- $k$ : de veiligheidsfactor

Vervolgens worden de partiële afgeleiden bepaald en gelijkgesteld aan nul:

$$\begin{aligned} \bullet \quad \frac{\partial ETAC}{\partial Q} &= \frac{-14686,9}{Q^{1,3325}} - \frac{28800(3*ES+2)}{Q^2} = 0 \\ \bullet \quad Q^{0,6675} [Q^{1,3325} - 1631,88] &= 9600 * \left[ ES + \frac{2}{3} \right] \quad (8.5) \\ \bullet \quad \frac{\partial ETAC}{\partial s} &= 18 + \left( \frac{86400}{Q} \right) * (\Phi(s) - 1) = 0 \end{aligned}$$

- $\Phi(s) = 1 - \frac{Q}{4800}$  (8.6)

Waarbij  $\Phi(s)$  de cumulatieve normaalverdeling is. Het iteratief oplossen van vergelijkingen (8.5) en (8.6) levert de optimale  $Q^*$  en  $s^*$  op die de totale logistieke kost minimaliseert (Moon & Choi, 1998, p 1009). Dit iteratiefproces werkt als volgt. Gebruik een initiële  $Q$  om het bestelpunt ( $s$ ) in vergelijking (8.6) te bepalen. Dit kan in excel door het gebruik van de functie 'Norm.inv.n'. Bereken vervolgens  $ES$  met behulp van de zojuist gevonden bestelpunt en de eerder vermelde *macro*. Gebruik deze waarde van  $ES$  om een nieuwe  $Q$  te bereken aan de hand van vergelijking (8.5). Dit proces wordt herhaald tot de waarden van  $Q$  en  $s$  convergeren. Om dit iteratiefproces vlot te laten verlopen werd nog een kleine *macro* geschreven.

Het probleem dat zich bij dit iteratiefproces echter stelt, is de initiële keuze van  $Q$  waarmee het proces wordt gestart. Eén mogelijkheid is om de *Economic Order Quantity* te gebruiken voor als initiële bestelhoeveelheid.

$$EOQ = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot A}{h}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5760 \cdot 10}{18}} = 80 \quad (8.7)$$

Indien  $Q=80$  gebruikt wordt als initiële bestelhoeveelheid, vindt het iteratiefproces echter geen oplossing. Een andere mogelijkheid bestaat erin om het bestelpunt te bepalen op basis van een vast serviceniveau van bijvoorbeeld 95%. Het bestelpunt wordt dus als volgt bepaald.

$$s = K * \sigma(x) + \mu(x) = 1,645 * \sigma(x) + \mu(x)$$

De verwachte waarde en de standaardafwijking van de vraag tijdens de levertijd kan bepaald worden aan de hand van formule 2.1 en 2.2 (zie paragraaf 2.2.2):

- $\mu_L = \mu_T * \mu_D$  (8.8)

- $\sigma_L = \sqrt{\mu_T * \sigma_D^2 + \mu_D^2 * \sigma_T^2}$  (8.9)

Vervolgens wordt de  $ES$  term berekend. Nu bestaat de functie van de totale logistieke kost nog slechts uit één onbekende: de bestelhoeveelheid. De totale logistieke kost wordt nu geminimaliseerd met behulp van de *solver* functie in Excel. De bijhorende bestelhoeveelheid is de nieuwe initiële  $Q$  voor het iteratiefproces. Dit proces werd uitgevoerd voor verschillende combinaties van  $\mu_T$  en  $\sigma_T$ . Het resultaat wordt weergegeven in tabel 8.2. Ter vergelijking, de originele resultaten van de Tyworth & Zeng (1998) worden weergegeven in **bijlage 2**.

Uit de resultaten van tabel 8.2 blijkt ten eerste dat een stijging van de levertijd-variabiliteit leidt tot een stijging van zowel het bestelpunt ( $s$ ) als de bestelhoeveelheid ( $Q$ ). De stijging van het bestelpunt is zowel te wijten aan een stijging van de gemiddelde levertijd en levertijd-variabiliteit. Enerzijds omdat het langer duurt om de goederen te leveren en anderzijds omdat een bepaalde veiligheidsvoorraad wordt aangehouden.

De stijging van de bestelhoeveelheid daarentegen, is enkel te verklaren door de hogere levertijd. Indien de variantie van de levertijd nul gelijk is aan nul, zorgt een stijging van de gemiddelde levertijd voor een zeer kleine stijging van de bestelhoeveelheid (+3,52%). Als  $\sigma_T = 1,6$  zorgt een stijging van de gemiddelde levertijd van twee naar acht dagen eveneens voor een vrij kleine stijging van de bestelhoeveelheid (+2,05%). Wanneer  $\sigma_T = 3,2$ , zorgt dezelfde stijging van de gemiddelde levertijd ook voor zeer kleine stijging van de totale logistieke kost (+0,97%).

Tabel 8.2: Sensitiviteits-analyse voor de Normaalverdeling

Normaalverdeling		Variantiecoëfficiënt ( $\sigma_L/\mu_L$ )					
$\mu_t \downarrow$	element	0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6
2	$\sigma_T$	0	0,4	0,8	1,6	2,4	3,2
	ES	0,3573	0,4084	0,4827	0,7519	1,1344	1,5163
	$s^*$	53	55	61	77	94	112
	$Q^*$	284	285	287	293	302	310
	<b>ETAC</b>	<b>\$10.381</b>	<b>\$10.433</b>	<b>\$10.563</b>	<b>\$10.931</b>	<b>\$11.348</b>	<b>\$11.780</b>
	P2	99,87%	99,86%	99,83%	99,74%	99,62%	99,51%
4	$\sigma_T$	0	0,8	1,6	3,2	4,8	6,4
	ES	0,4872	0,5889	0,8730	1,5384	2,3703	3,3506
	$s^*$	94	100	113	147	182	216
	$Q^*$	287	289	296	310	327	345
	<b>ETAC</b>	<b>\$10.966</b>	<b>\$11.105</b>	<b>\$11.423</b>	<b>\$12.224</b>	<b>\$13.080</b>	<b>\$13.944</b>
	P2	99,83%	99,80%	99,71%	99,50%	99,28%	99,03%
6	$\sigma_T$	0	1,2	2,4	4,8	7,2	9,6
	ES	0,6420	0,7964	1,2252	2,3861	3,8938	5,6612
	$s^*$	132	143	165	216	266	314
	$Q^*$	291	294	304	327	355	384
	<b>ETAC</b>	<b>\$11.505</b>	<b>\$11.748</b>	<b>\$12.268</b>	<b>\$13.504</b>	<b>\$14.786</b>	<b>\$16.063</b>
	P2	99,78%	99,73%	99,60%	99,27%	98,90%	98,53%
8	$\sigma_T$	0	1,6	3,2	6,4	9,6	12,8
	ES	0,7146	1,0271	1,6283	3,3753	5,6692	8,4402
	$s^*$	170	185	216	283	347	407
	$Q^*$	292	299	313	346	384	424
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.018</b>	<b>\$12.380</b>	<b>\$13.107</b>	<b>\$14.772</b>	<b>\$16.467</b>	<b>\$18.139</b>
	P2	99,76%	99,66%	99,48%	99,02%	98,52%	98,01%
10	$\sigma_T$	0	2	4	8	12	16
	ES	0,8049	1,2378	2,0929	4,5227	7,7242	11,8468
	$s^*$	207	227	266	348	425	494
	$Q^*$	294	303	321	365	414	468
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.519</b>	<b>\$13.004</b>	<b>\$13.942</b>	<b>\$16.029</b>	<b>\$18.124</b>	<b>\$20.173</b>
	P2	99,73%	99,59%	99,35%	98,76%	98,13%	97,47%

Indien de gemiddelde levertijd klein is ( $\mu_T = 2$ ), zorgt een stijging van de relatieve variatie voor een kleine tot matige stijging van de bestelhoeveelheid (+9,15%). Voor een matige gemiddelde levertijd ( $\mu_T = 6$ ), zorgt een stijging van de relatieve variantie voor een matige tot grote stijging van de bestelhoeveelheid (+31,96%). Voor een hoge gemiddelde levertijd ( $\mu_T = 10$ ), zorgt een stijging van de relatieve variantie voor vrij grote stijging van de bestelhoeveelheid (+59,18%).

Ten tweede leidt een stijging van de levertijd-variabiliteit tot een verlaging van het geleverde serviceniveau. Net zoals bij de bestelhoeveelheid is de invloed van de gemiddelde levertijd op het serviceniveau van minder belang. Een stijging van de gemiddelde levertijd bij een levertijd-variantie gelijk nul brengt een daling van 0,14% met zich mee, terwijl een stijging van de relatieve levertijd-variabiliteit bij een gemiddelde levertijd van tien dagen zorgt voor een daling van 2,31%. Het  $P_2$ -serviceniveau is afhankelijk van het aantal eenheden tekort per aanvulcyclus en de bestelhoeveelheid ( $P_2 = 1 - \frac{ES}{Q}$ ). Hierboven werd vermeld dat deze laatstgenoemde toeneemt met de levertijd-variabiliteit, wat een positief effect heeft op het serviceniveau. Dit wil zeggen dat de relatieve stijging van het aantal tekorten per aanvulcyclus groter is als de relatieve stijging van de bestelhoeveelheid. Deze bewering wordt bevestigd in de resultaten. Een stijging van de relatieve levertijd-variabiliteit bij een gemiddelde levertijd van  $\mu_T = 2$ ,  $\mu_T = 6$  en  $\mu_T = 10$ , zorgt respectievelijk voor een stijging van het aantal tekorten per aanvulcyclus met 324%, 782% en 1704%. Anders gezegd kan men stellen dat een hogere levertijd-variabiliteit leidt tot een stimulans om een groter aantal eenheden in één keer te bestellen. Het aantal tekorten per aanvulcyclus is in mindere mate ook afhankelijk van de gemiddelde levertijd.

Ten derde blijkt dat de totale logistieke kost zowel toeneemt met de gemiddelde levertijd als de levertijd-variantie. De variantie van de levertijd kan hier zowel vanuit een absoluut als een relatief standpunt worden bekeken. Indien de gemiddelde levertijd klein is ( $\mu_T = 2$ ), zorgt een stijging van de relatieve variatie eerder voor een kleine tot matige stijging van de totale logistieke kost (+13,48%). Voor een matige gemiddelde levertijd ( $\mu_T = 6$ ), zorgt een stijging van de relatieve variantie voor een matige tot grote stijging van de totale logistieke kost (+39,62%). Voor een hoge gemiddelde levertijd ( $\mu_T = 10$ ), zorgt een stijging van de relatieve variantie voor vrij grote stijging van de totale logistieke kost (+61,14%). Indien de variantie van de levertijd nul is, zorgt een stijging van de gemiddelde levertijd voor een matige stijging van de totale logistieke kost (+20,59). Als  $\sigma_T = 1,6$  zorgt een stijging van de gemiddelde levertijd van twee naar acht dagen slechts voor een kleine stijging van de logistieke kost (+13,25%). Wanneer  $\sigma_T = 3,2$ , zorgt dezelfde stijging van de gemiddelde levertijd ook voor een kleine stijging van de totale logistieke kost (+11,27%). Een verandering van de levertijdparameters van de meest gunstige ( $\mu_T = 2$  &  $\sigma_T = 0$ ) naar de minst gunstige situatie ( $\mu_T = 10$  &  $\sigma_T = 16$ ) zorgt voor een stijging van 94,33% van de totale logistieke kost. 21,83% van deze stijging kan toegewezen worden aan de stijging van de gemiddelde levertijd en 78,16% van de stijging wordt verklaard door een stijging van de levertijd-variabiliteit. Er kan besloten worden dat een stijging van de levertijd-variabiliteit zorgt voor een

sterkere stijging van de totale logistieke kost dan een stijging van de gemiddelde levertijd. Tabel 8.3 geeft een opsplitsing van de totale logistieke kost in de verschillende kostencomponenten weer. Hieruit blijkt echter dat niet alle kosten stijgen met de levertijd-variantie.

Tabel 8.3: Opsplitsing van de totale logistieke kost bij de Normaalverdeling

Normaalverdeling		Variantiecoëfficiënt ( $\sigma_L/\mu_L$ )					
$\mu_L \downarrow$	element	0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6
2	Ct	\$6.752	\$6.744	\$6.728	\$6.682	\$6.615	\$6.558
	Ch	\$3.318	\$3.363	\$3.489	\$3.831	\$4.218	\$4.614
	Co	\$203	\$202	\$201	\$197	\$191	\$186
	Cs	\$109	\$124	\$145	\$222	\$325	\$423
	<b>ETAC</b>	<b>\$10.381</b>	<b>\$10.433</b>	<b>\$10.563</b>	<b>\$10.931</b>	<b>\$11.348</b>	<b>\$11.780</b>
4	Ct	\$6.728	\$6.713	\$6.659	\$6.558	\$6.442	\$6.329
	Ch	\$3.891	\$4.017	\$4.314	\$5.052	\$5.835	\$6.609
	Co	\$201	\$199	\$195	\$186	\$176	\$167
	Cs	\$147	\$176	\$255	\$429	\$626	\$839
	<b>ETAC</b>	<b>\$10.966</b>	<b>\$11.105</b>	<b>\$11.423</b>	<b>\$12.224</b>	<b>\$13.080</b>	<b>\$13.944</b>
6	Ct	\$6.697	\$6.674	\$6.601	\$6.442	\$6.269	\$6.107
	Ch	\$4.419	\$4.644	\$5.130	\$6.255	\$7.407	\$8.532
	Co	\$198	\$196	\$189	\$176	\$162	\$150
	Cs	\$191	\$234	\$348	\$630	\$948	\$1.274
	<b>ETAC</b>	<b>\$11.505</b>	<b>\$11.748</b>	<b>\$12.268</b>	<b>\$13.504</b>	<b>\$14.786</b>	<b>\$16.063</b>
8	Ct	\$6.690	\$6.637	\$6.537	\$6.323	\$6.107	\$5.909
	Ch	\$4.920	\$5.253	\$5.937	\$7.440	\$8.934	\$10.374
	Co	\$197	\$193	\$184	\$166	\$150	\$136
	Cs	\$211	\$297	\$449	\$843	\$1.276	\$1.720
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.018</b>	<b>\$12.380</b>	<b>\$13.107</b>	<b>\$14.772</b>	<b>\$16.467</b>	<b>\$18.139</b>
10	Ct	\$6.674	\$6.608	\$6.482	\$6.211	\$5.956	\$5.719
	Ch	\$5.412	\$5.853	\$6.717	\$8.589	\$10.416	\$12.144
	Co	\$196	\$190	\$179	\$158	\$139	\$123
	Cs	\$237	\$353	\$563	\$1.071	\$1.612	\$2.187
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.519</b>	<b>\$13.004</b>	<b>\$13.942</b>	<b>\$16.029</b>	<b>\$18.124</b>	<b>\$20.173</b>

Uit tabel 8.4 blijkt dat de transport- en bestelkost afneemt met de levertijd-variabiliteit. Dit is het gevolg van de gestegen bestelhoeveelheid. De jaarlijkse transportkost ( $C_t$ ) is niet-lineair en neemt af indien de bestelhoeveelheid stijgt. Er zijn in dit geval ook minder aanvulcycli nodig om aan de jaarlijkse vraag te voldoen, waardoor de bestelkost ( $C_o$ ) ook afneemt. De daling van deze kostencomponenten weegt echter niet op tegen de stijging van de jaarlijkse voorraad- ( $C_h$ ) en tekortkost ( $C_s$ ).



De voorraadkost bestaat uit de kost voor het aanhouden van een 'in-transit', cyclus en veiligheidsvoorraad. De eerst genoemde is enkel afhankelijk van de gemiddelde levertijd en wordt niet beïnvloed de levertijd-variabiliteit. De cyclusvoorraad is afhankelijk van de bestelhoeveelheid en zal bijgevolg dus toenemen met de levertijdvariabiliteit. De veiligheidsvoorraad wordt direct beïnvloed door de levertijd-variabiliteit en neemt sterk toe als deze variabiliteit stijgt. Indien de gemiddelde levertijd zes dagen bedraagd, zorgt een stijging van de relatieve variabiliteit ervoor dat de voorraadkost met 93,08% toeneemt. Deze stijging is voor 1/5 toe te schrijven aan de gestegen cyclusvoorraad en voor 4/5 aan de gestegen veiligheidsvoorraad.

De jaarlijkse tekortkost ziet er als volgt uit:

$$\bullet \quad C_s = ES \frac{86400}{Q} \quad (8.11)$$

Zoals eerder aangehaald is de relatieve stijging van het aantal eenheden tekort per aanvulcyclus groter dan de relatieve stijging van de bestelhoeveelheid. Bijgevolg zal de tekortkost dus toenemen als de levertijd-variabiliteit toeneemt. Indien de gemiddelde levertijd zes dagen bedraagt, zorgt een stijging van de relatieve variabiliteit ervoor dat de tekortkost toeneemt met 567%. Merk op dat in dit model een afweging wordt gemaakt tussen de veiligheidsvoorraad en de tekortkost.

## Scenario 2: de Gamma verdeling

In het tweede scenario wordt verondersteld dat de vraag tijdens de levertijd Gamma verdeeld is. Om de totale jaarlijkse logistieke kost te minimaliseren wordt hetzelfde iteratiefproces gebruikt als bij de Normaalverdeling. De term  $\Phi(s)$  in vergelijking (8.6) vertegenwoordigt nu de cumulatieve Gamma verdeling. De initiële bestelhoeveelheid wordt opnieuw berekend door de totale logistieke kost te minimaliseren met behulp van een vast serviceniveau. Het bestelpunt bij een  $P_1$ -serviceniveau van 95% wordt in Excel bepaald door gebruik te maken van de inverse Gamma verdeling:

$$\bullet \quad s = \text{Gamma.inv.n}(0,95; \alpha; \beta) \quad (8.12)$$

Waarbij:

$$\bullet \quad \alpha = \frac{\mu_L^2}{\sigma_L^2}$$
$$\bullet \quad \beta = \frac{\sigma_L^2}{\mu_L}$$

De rest van de methode is identiek aan scenario één. Bepaal vervolgens  $ES$  met behulp van de zojuist gevonden bestelpunt en de eerder vermelde *macro*. Gebruik deze waarde om een nieuwe  $Q'$  te bereken aan de hand van vergelijking (8.5). Herhaal dit proces tot de waarden van  $Q'$  en  $s'$

convergeren. Dit iteratiefproces werd opnieuw uitgevoerd voor verschillende combinaties van  $\mu_T$  en  $\sigma_T$ . Het resultaat wordt weergegeven in tabel 8.4.

Tabel 8.4: Sensitiviteits-analyse voor de Gammaverdeling

Gammaverdeling		Variantiecoëfficiënt ( $\sigma_T/\mu_L$ )					
$\mu_L \downarrow$	element	0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6
2	$\sigma_T$	0	0,4	0,8	1,6	2,4	3,2
	ES	0,5678	0,6277	0,9064	1,7967	3,3772	5,5842
	$s^*$	55	58	64	82	97	106
	$Q^*$	289	291	296	316	345	382
	<b>ETAC</b>	<b>\$10.481</b>	<b>\$10.553</b>	<b>\$10.743</b>	<b>\$11.318</b>	<b>\$12.000</b>	<b>\$12.686</b>
	P2	99,80%	99,78%	99,69%	99,43%	99,02%	98,54%
4	$\sigma_T$	0	0,8	1,6	3,2	4,8	6,4
	ES	0,7057	0,8920	1,4778	3,7212	7,6265	13,6319
	$s^*$	96	103	118	152	176	180
	$Q^*$	292	297	309	351	413	488
	<b>ETAC</b>	<b>\$11.068</b>	<b>\$11.248</b>	<b>\$11.686</b>	<b>\$12.884</b>	<b>\$14.197</b>	<b>\$15.419</b>
	P2	99,76%	99,70%	99,52%	98,94%	98,15%	97,21%
6	$\sigma_T$	0	1,2	2,4	4,8	7,2	9,6
	ES	0,8031	1,1805	2,1374	5,9701	13,0953	24,2795
	$s^*$	135	146	170	218	243	234
	$Q^*$	295	303	322	388	483	596
	<b>ETAC</b>	<b>\$11.606</b>	<b>\$11.914</b>	<b>\$12.610</b>	<b>\$14.404</b>	<b>\$16.266</b>	<b>\$17.893</b>
	P2	99,73%	99,61%	99,34%	98,46%	97,29%	95,93%
8	$\sigma_T$	0	1,6	3,2	6,4	9,6	12,8
	ES	0,9393	1,0891	2,8555	8,5938	19,8374	37,3489
	$s^*$	172	189	221	280	300	274
	$Q^*$	297	308	336	426	554	703
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.120</b>	<b>\$12.471</b>	<b>\$13.524</b>	<b>\$15.884</b>	<b>\$18.222</b>	<b>\$20.158</b>
	P2	99,68%	99,65%	99,15%	97,98%	96,42%	94,69%
10	$\sigma_T$	0	2	4	8	12	16
	ES	1,0226	1,7197	3,5710	11,6422	27,8301	52,7787
	$s^*$	209	231	272	338	349	303
	$Q^*$	299	314	349	465	627	810
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.618</b>	<b>\$13.211</b>	<b>\$14.431</b>	<b>\$17.327</b>	<b>\$20.080</b>	<b>\$22.250</b>
	P2	99,66%	99,45%	98,98%	97,50%	95,56%	93,48%

Uit tabel 8.4 blijkt dat een stijging van de levertijd-variabiliteit enerzijds leidt tot een stijging van de totale logistieke kost, het bestelpunt, de bestelhoeveelheid en het aantal eenheden tekort per aanvulcyclus en anderzijds tot een daling van het serviceniveau. De veranderingen in deze

parameters ten gevolge van de wijziging van de levertijdparameters zijn meer uitgesproken als bij de Normaalverdeling. Indien de gemiddelde levertijd klein is ( $\mu_T = 2$ ), zorgt een stijging van de relatieve variatie voor een stijging van de totale logistieke kost met 20,03%. Bij een matige gemiddelde levertijd ( $\mu_T = 6$ ), stijgt de totale logistieke kost met 54,17% en bij een hoge gemiddelde levertijd ( $\mu_T = 10$ ) is deze stijging zelfs 76,34%. Het aantal eenheden tekort per aanvulcyclus in het

geval bedraagt hier 52,78. Dit is ruim vier keer zoveel als bij de Normaalverdeling. Ook de stijging van de bestelhoeveelheid en de afname van het serviceniveau is hier groter dan bij de Normaalverdeling. Enkel de stijging van het bestelpunt is hier minder sterk.

Tabel 8.5: Opsplitsing van de totale logistieke kost bij Gammaverdeling

Gammaverdeling		Variantiecoëfficiënt ( $\sigma_L/\mu_L$ )					
$\mu_L \downarrow$	element	0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6
2	Ct	\$6.713	\$6.697	\$6.659	\$6.516	\$6.329	\$6.118
	Ch	\$3.399	\$3.471	\$3.624	\$4.128	\$4.659	\$5.154
	Co	\$199	\$198	\$195	\$182	\$167	\$151
	Cs	\$170	\$186	\$265	\$491	\$846	\$1.263
	<b>ETAC</b>	<b>\$10.481</b>	<b>\$10.553</b>	<b>\$10.743</b>	<b>\$11.318</b>	<b>\$12.000</b>	<b>\$12.686</b>
4	Ct	\$6.690	\$6.652	\$6.565	\$6.293	\$5.961	\$5.639
	Ch	\$3.972	\$4.143	\$4.521	\$5.511	\$6.501	\$7.248
	Co	\$197	\$194	\$186	\$164	\$139	\$118
	Cs	\$209	\$260	\$413	\$916	\$1.595	\$2.414
	<b>ETAC</b>	<b>\$11.068</b>	<b>\$11.248</b>	<b>\$11.686</b>	<b>\$12.884</b>	<b>\$14.197</b>	<b>\$15.419</b>
6	Ct	\$6.667	\$6.608	\$6.476	\$6.086	\$5.659	\$5.277
	Ch	\$4.509	\$4.779	\$5.382	\$6.840	\$8.145	\$9.000
	Co	\$195	\$190	\$179	\$148	\$119	\$97
	Cs	\$235	\$337	\$574	\$1.329	\$2.343	\$3.520
	<b>ETAC</b>	<b>\$11.606</b>	<b>\$11.914</b>	<b>\$12.610</b>	<b>\$14.404</b>	<b>\$16.266</b>	<b>\$17.893</b>
8	Ct	\$6.652	\$6.572	\$6.385	\$5.900	\$5.407	\$4.995
	Ch	\$5.001	\$5.406	\$6.234	\$8.106	\$9.618	\$10.491
	Co	\$194	\$187	\$171	\$135	\$104	\$82
	Cs	\$273	\$306	\$734	\$1.743	\$3.094	\$4.590
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.120</b>	<b>\$12.471</b>	<b>\$13.524</b>	<b>\$15.884</b>	<b>\$18.222</b>	<b>\$20.158</b>
10	Ct	\$6.637	\$6.530	\$6.304	\$5.731	\$5.189	\$4.765
	Ch	\$5.493	\$6.024	\$7.077	\$9.309	\$10.965	\$11.784
	Co	\$193	\$183	\$165	\$124	\$92	\$71
	Cs	\$296	\$473	\$884	\$2.163	\$3.835	\$5.630
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.618</b>	<b>\$13.211</b>	<b>\$14.431</b>	<b>\$17.327</b>	<b>\$20.080</b>	<b>\$22.250</b>

In tabel 8.5 wordt opnieuw een opsplitsing van de logistieke kost weergegeven. Ook hier dalen de jaarlijkse transport- en bestelkost met de levertijd-variabiliteit. Dit is echter onvoldoende om de stijging van enerzijds de cyclus- en veiligheidsvoorraad en anderzijds de stijging van de tekortkost teniet te doen. In het geval dat de gemiddelde levertijd zes dagen bedraagt, verdubbelt de voorraadkost als de relatieve levertijd-variabiliteit stijgt van het laagste naar het hoogste niveau. Deze stijging is voor 3/5 toe te schrijven aan de gestegen cyclusvoorraad en voor 2/5 aan de gestegen veiligheidsvoorraad. Deze verhouding ligt anders als bij de Normaalverdeling en is te danken aan de hogere stijging van de bestelhoeveelheid. De tekortkost ligt ongeveer 14 keer hoger als de relatieve levertijd-variabiliteit toeneemt van het laagste naar het hoogste niveau.

De totale logistieke kost hoger ligt doorgaans hoger indien gebruik wordt gemaakt van de Gammaverdeling. Dit wordt verklaard doordat de methode voor de normale verdeling de onzekerheid in de vraag tijdens de levertijd wellicht onderschat. Deze onzekerheid ligt vermoedelijk in de staart naar rechts bij Gamma verdelingen.

### Scenario 3: 'distributie-vrije' benadering

In dit scenario wordt de 'distributie-vrije' benadering gebruikt om de vraag gedurende de levertijd te modelleren. Deze 'distributie-vrije' benadering of '*distribution free procedure*' werd kort aangehaald in paragraaf 2.2.2. Deze methode maakt geen veronderstellingen aangaande de verdeling van de vraag tijdens de levertijd, behalve dat ze behoort tot de klasse F van cumulatieve verdelingsfuncties met een bepaald gemiddelde  $\mu$  en variantie  $\sigma^2$ . Aangezien de verdeling van de vraag tijdens de levertijd onbekend is, wordt de totale logistieke kost geminimaliseerd onder de slechts mogelijke verdeling. Het aantal eenheden tekort per aanvulcyclus wordt in deze methode vervangen door de slechts mogelijke bovengrens:

$$\bullet \quad ES \leq \frac{\sqrt{\sigma_L^2 + (s - \mu_L)^2} - (s - \mu_L)}{2} \quad (8.13)$$

Vervolgens worden de partiële afgeleiden van de totale logistieke kost naar respectievelijk  $Q$  en  $s$  berekend. Het stelsel van vergelijkingen ziet er nu als volgt uit:

$$\bullet \quad \frac{\partial ETAC}{\partial Q} = \frac{9 * \left[ Q^2 - 1631,88 * Q^{0,6675} - 1600 * \left( 3 \sqrt{\sigma_L^2 + (s - \mu_L)^2} - 3(s - \mu_L) + 4 \right) \right]}{Q^2} = 0$$

$$\rightarrow Q^{0,6675} [Q^{1,3325} - 1631,88] = 1600 * \left( 3 \sqrt{\sigma_L^2 + (s - \mu_L)^2} - 3(s - \mu_L) + 4 \right) \quad (8.14)$$

$$\bullet \quad \frac{\partial ETAC}{\partial s} = \frac{43200(s - \mu_L)}{\sqrt{\sigma_L^2 + (s - \mu_L)^2} * Q} + \frac{18(Q - 2400)}{Q} = 0$$

$$\rightarrow Q = \frac{2400 * \sqrt{\sigma_L^2 + (s - \mu_L)^2 - (s - \mu_L)}}{\sqrt{\sigma_L^2 + (s - \mu_L)^2}} \quad (8.15)$$

Tabel 8.6: Sensitiviteits-analyse voor de 'distributie-vrije' benadering

Distributie vrij		variantiecoëfficiënt ( $\sigma_L/\mu_L$ )					
$\mu_L \downarrow$	element	0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6
2	$\sigma_T$	0	0,4	0,8	1,6	2,4	3,2
	ES	1,7870	2,0107	2,5213	4,1074	6,0907	8,2300
	$s^*$	56	58	64	79	94	109
	$Q^*$	316	320	330	359	390	421
	<b>ETAC</b>	<b>\$10.847</b>	<b>\$10.944</b>	<b>\$11.188</b>	<b>\$11.856</b>	<b>\$12.583</b>	<b>\$13.308</b>
	P2	99,43%	99,37%	99,24%	98,86%	98,44%	98,05%
4	$\sigma_T$	0	0,8	1,6	3,2	4,8	6,4
	ES	2,5895	3,2288	4,6040	8,5393	13,2493	18,6331
	$s^*$	97	102	115	143	169	191
	$Q^*$	331	343	367	425	485	542
	<b>ETAC</b>	<b>\$11.607</b>	<b>\$11.861</b>	<b>\$12.430</b>	<b>\$13.791</b>	<b>\$15.153</b>	<b>\$16.455</b>
	P2	99,22%	99,06%	98,75%	97,99%	97,27%	96,56%
6	$\sigma_T$	0	1,2	2,4	4,8	7,2	9,6
	ES	3,2704	4,3210	6,7784	13,4966	21,6477	30,8258
	$s^*$	135	145	164	202	234	261
	$Q^*$	344	363	401	487	572	652
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.274</b>	<b>\$12.711</b>	<b>\$13.609</b>	<b>\$15.599</b>	<b>\$17.504</b>	<b>\$19.285</b>
	P2	99,05%	98,81%	98,31%	97,23%	96,22%	95,27%
8	$\sigma_T$	0	1,6	3,2	6,4	9,6	12,8
	ES	3,8519	5,4842	9,1155	18,9626	31,0289	44,7007
	$s^*$	172	186	211	257	293	322
	$Q^*$	354	381	434	546	645	756
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.892</b>	<b>\$13.527</b>	<b>\$14.747</b>	<b>\$17.311</b>	<b>\$19.697</b>	<b>\$21.892</b>
	P2	98,91%	98,56%	97,90%	96,53%	95,19%	94,09%
10	$\sigma_T$	0	2	4	8	12	16
	ES	4,3210	6,6080	11,5554	24,8813	41,2124	59,9834
	$s^*$	209	227	257	309	348	377
	$Q^*$	362	398	464	602	731	854
	<b>ETAC</b>	<b>\$13.479</b>	<b>\$14.322</b>	<b>\$15.853</b>	<b>\$18.946</b>	<b>\$21.763</b>	<b>\$24.330</b>
	P2	98,81%	98,34%	97,51%	95,87%	94,36%	92,98%

Er is nu een stelsel van twee vergelijkingen met twee onbekenden ( $Q$ - en  $s$ ). De optimale  $Q^*$  en  $s^*$  worden in dit geval gevonden als vergelijking (8.14) en (8.15) simultaan worden opgelost voor een bepaalde  $\mu_t$  en  $\sigma_t$ . Dit werd gedaan voor verschillende combinaties van  $\mu_T$  en  $\sigma_T$ . Het resultaat wordt weergegeven in tabel 8.6. Hieruit blijkt dat opnieuw dat een stijging van de levertijdvariabiliteit enerzijds leidt tot een stijging van de totale logistieke kost, het bestelpunt, de bestelhoeveelheid en het aantal eenheden tekort per aanvulcyclus en anderzijds tot een daling van het serviceniveau. De veranderingen in deze parameters ten gevolge van de wijziging van de levertijdparameters zijn groter dan in scenario één en twee.

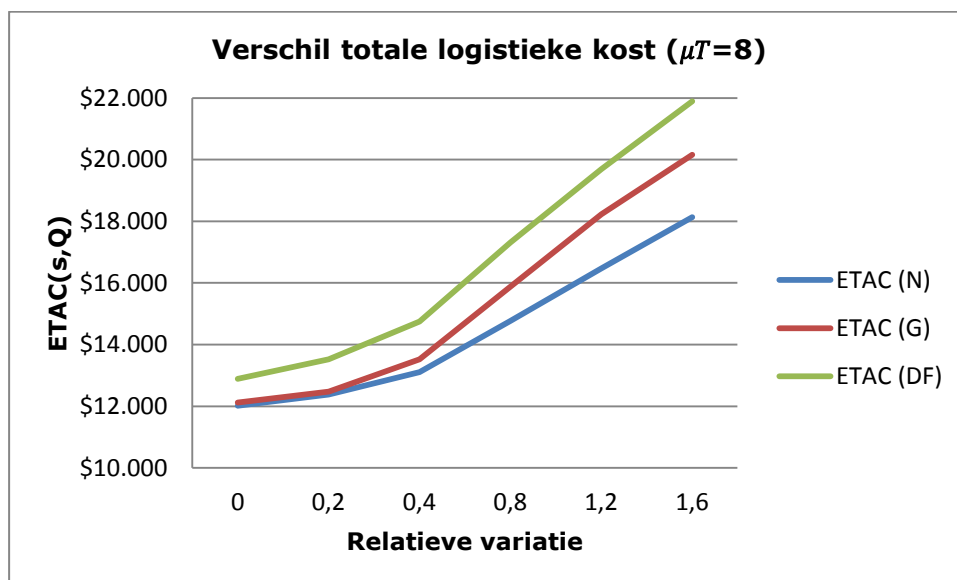
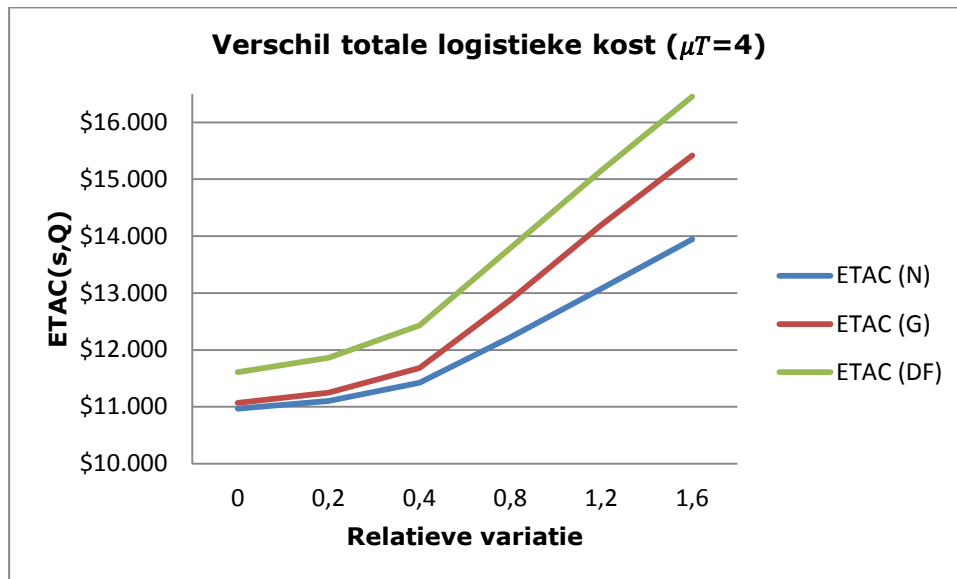
Tabel 8.7: Opsplitsing van de totale logistieke kost voor 'distributie-vrije' benadering

Distribution Free		variantiecoëfficiënt ( $\sigma_t/\mu_t$ )					
$\mu L \downarrow$	element	0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6
2	$C_t$	\$6.516	\$6.489	\$6.423	\$6.246	\$6.076	\$5.923
	$C_h$	\$3.660	\$3.732	\$3.930	\$4.461	\$5.010	\$5.559
	$C_o$	\$182	\$180	\$175	\$160	\$148	\$137
	$C_s$	\$489	\$543	\$660	\$989	\$1.349	\$1.689
	<b>ETAC</b>	<b>\$10.847</b>	<b>\$10.944</b>	<b>\$11.188</b>	<b>\$11.856</b>	<b>\$12.583</b>	<b>\$13.308</b>
4	$C_t$	\$6.416	\$6.341	\$6.200	\$5.905	\$5.651	\$5.446
	$C_h$	\$4.341	\$4.539	\$4.989	\$6.015	\$7.023	\$7.932
	$C_o$	\$174	\$168	\$157	\$136	\$119	\$106
	$C_s$	\$676	\$813	\$1.084	\$1.736	\$2.360	\$2.970
	<b>ETAC</b>	<b>\$11.607</b>	<b>\$11.861</b>	<b>\$12.430</b>	<b>\$13.791</b>	<b>\$15.153</b>	<b>\$16.455</b>
6	$C_t$	\$6.335	\$6.223	\$6.020	\$5.643	\$5.349	\$5.122
	$C_h$	\$4.950	\$5.301	\$5.985	\$7.443	\$8.784	\$9.990
	$C_o$	\$167	\$159	\$144	\$118	\$101	\$88
	$C_s$	\$821	\$1.028	\$1.460	\$2.394	\$3.270	\$4.085
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.274</b>	<b>\$12.711</b>	<b>\$13.609</b>	<b>\$15.599</b>	<b>\$17.504</b>	<b>\$19.285</b>
8	$C_t$	\$6.275	\$6.123	\$5.864	\$5.433	\$5.140	\$4.876
	$C_h$	\$5.514	\$6.009	\$6.936	\$8.772	\$10.311	\$11.832
	$C_o$	\$163	\$151	\$133	\$105	\$89	\$76
	$C_s$	\$940	\$1.244	\$1.815	\$3.001	\$4.156	\$5.109
	<b>ETAC</b>	<b>\$12.892</b>	<b>\$13.527</b>	<b>\$14.747</b>	<b>\$17.311</b>	<b>\$19.697</b>	<b>\$21.892</b>
10	$C_t$	\$6.228	\$6.035	\$5.735	\$5.259	\$4.930	\$4.682
	$C_h$	\$6.060	\$6.708	\$7.842	\$10.020	\$11.883	\$13.512
	$C_o$	\$159	\$145	\$124	\$96	\$79	\$67
	$C_s$	\$1.031	\$1.434	\$2.152	\$3.571	\$4.871	\$6.069
	<b>ETAC</b>	<b>\$13.479</b>	<b>\$14.322</b>	<b>\$15.853</b>	<b>\$18.946</b>	<b>\$21.763</b>	<b>\$24.330</b>

In tabel 8.7 wordt de opsplitsing van de logistieke kost voor de 'distributie-vrije' benadering weergegeven. Ook hier geven de resultaten hetzelfde inzicht als in scenario één en twee. De

voorraad- en tekortkosten liggen hoger dan in scenario één en twee. Dit verschil kan gezien worden als de marginale kost, wanneer enkel het gemiddelde en de variantie van de vraag tijdens de levertijd gekend zijn. Dit is ook het bedrag dat een onderneming bereid is om te betalen voor de informatie van de exacte verdeling van de vraag tijdens de levertijd. In figuur 8.1 wordt het verschil in de totale jaarlijkse logistiek kost tussen de drie scenario's weergegeven wanneer de gemiddelde levertijd respectievelijk vier en acht dagen bedraagt.

Figuur 8.1: Grafische voorstelling van het verschil in de totale logistieke kost



### Scenario 4: de exponentiële verdeling

In dit scenario wordt verondersteld dat de vraag tijdens de levertijd exponentieel verdeeld is. Om de totale jaarlijkse logistieke kost te minimaliseren wordt hetzelfde iteratiefproces gebruikt als bij de Normaal- en Gammaverdeling. De  $\Phi(s)$  term in vergelijking (8.6) vertegenwoordigt nu de cumulatieve Exponentiële verdeling. De initiële bestelhoeveelheid wordt opnieuw berekend door de totale logistieke kost te minimaliseren met behulp van een vast serviceniveau. Het bestelpunt bij een  $P_1$ -serviceniveau van 95% wordt in Excel bepaald door gebruik te maken van de inverse Gamma verdeling. De Exponentiële verdeling is immers een speciaal geval van de Gammaverdeling.

$$\bullet \quad s = \text{Gamma.inv.n}(0,95; 1; \beta) \quad (8.16)$$

Waarbij:  $\beta = \mu_L = \sigma_L$

Met dit bestelpunt kan vervolgens het aantal verwachte eenheden tekort per aanvulcyclus bepaald worden, waarmee de overeenkomstige bestelhoeveelheid bij een serviceniveau van 95% wordt vastgesteld. Dit is weer de initiële waarde van  $Q'$  waarmee het iteratiefproces begint. Aangezien het gemiddelde van de exponentiële verdeling gelijk is aan de standaarddeviatie, is de sensitiviteits-matrix in dit scenario minder uitgebreid. Het geeft met andere woorden enkel resultaten waar de relatieve variatie gelijk is aan één.

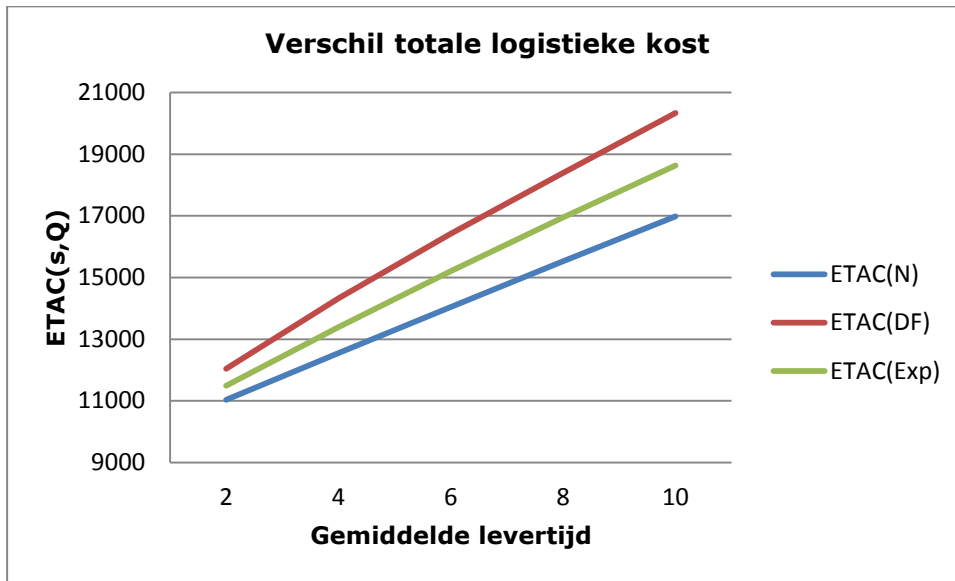
Tabel 8.8: Sensitiviteits-analyse voor de Exponentiële verdeling

Exponentieel element	Gemiddelde Levertijd				
	2	4	6	8	10
$\mu_L$	32	64	96	128	160
ES	2,1776	4,9350	8,4762	12,7731	17,8396
$s^*$	86	164	233	295	351
$Q^*$	323	373	425	479	534
<b>ETAC</b>	<b>\$11.493</b>	<b>\$13.389</b>	<b>\$15.206</b>	<b>\$16.952</b>	<b>\$18.631</b>
$P_2$	99,33%	98,68%	98,01%	97,33%	96,66%

Ook in dit scenario zijn de resultaten van de sensitiviteits-analyse gelijklopend met de andere resultaten. Opnieuw neemt de totale logistieke kost, de bestelhoeveelheid, het aantal tekorten per aanvulcyclus en het bestelpunt toe naarmate de gemiddelde levertijd en levertijd-variabiliteit toeneemt. Het serviceniveau daarentegen daalt met als de levertijdparameters stijgen. In figuur 8.2 wordt de totale logistieke kost vergeleken met de resultaten van scenario een en drie, indien de ratio tussen de standaarddeviatie en de gemiddelde levertijd gelijk is aan één.



Figuur 8.2: Grafische voorstelling van het verschil in de totale logistieke kost



In tabel 8.9 wordt een overzicht gegeven van de kostencomponenten van de totale logistieke kost. Deze resultaten komen overeen met de bevindingen uit de nadere scenario's. In het minst gunstige geval ligt de voorraadkost 2,5 keer zo hoog als het meest gunstige geval. De tekortkost is vijf maal hoger in het

geval.

Tabel 8.9: Opsplitsing van de totale logistieke kost voor exponentiële verdeling

Exponentieel element	Gemiddelde Levertijd				
	2	4	6	8	10
$C_t$	\$6.469	\$6.167	\$5.905	\$5.675	\$5.473
$C_h$	\$4.263	\$5.925	\$7.443	\$8.853	\$10.164
$C_o$	\$178	\$154	\$136	\$120	\$108
$C_s$	\$582	\$1.143	\$1.723	\$2.304	\$2.886
<b>ETAC</b>	<b>\$11.493</b>	<b>\$13.389</b>	<b>\$15.206</b>	<b>\$16.952</b>	<b>\$18.631</b>

### Scenario 5: de Poissonverdeling

In dit scenario wordt verondersteld dat de vraag tijdens de levertijd Poisson verdeeld is. Het is hier niet mogelijk om de inverse van de cumulatieve Poisson verdeling te bepalen met excel of een grafisch rekenmachine (TI-89). Met behulp van een *macro* werd een alternatieve methode uitgewerkt. Rekening houdende met de resultaten uit vorige scenario's, werd voor elke combinatie

van  $Q$  en  $s$  de totale logistieke kost berekend ( $0 < Q < 1000$  en  $0 \leq s < 1000$ ). De macro onthoudt de minimale kost met de bijhorende  $Q^*$  en  $s^*$  en geeft deze weer in de aangegeven cellen. Aangezien het gemiddelde van de Poissonverdeling gelijk is aan de variantie, is de sensitiviteits-matrix in dit scenario opnieuw minder uitgebreid.

Tabel 8.10: Sensitiviteits-analyse voor de Poissonverdeling

Poisson element	Gemiddelde Levertijd				
	2	4	6	8	10
$\mu_L$	32	64	96	128	160
ES	0,1139	0,0953	0,2149	0,2816	0,3365
$s^*$	38	75	111	146	180
$Q^*$	278	280	281	281	283
<b>ETAC</b>	<b>\$10.036</b>	<b>\$10.505</b>	<b>\$10.998</b>	<b>\$11.456</b>	<b>\$11.893</b>
$P_2$	99,96%	99,97%	99,92%	99,90%	99,88%

Uit tabel 8.11 blijkt dat de totale logistieke kost slechts met 18,50% toeneemt, indien de gemiddelde levertijd en de variantie toenemen van twee naar tien dagen. Dit is lager dan in scenario vier, waar de totale logistieke kost met 67,83% steeg in dezelfde omstandigheden. De stijging van het aantal tekorten per aanvulcyclus is ook vrij klein en de bestelhoeveelheid wordt amper groter. De daling van het serviceniveau is ook minimaal. Enkel de toename van het bestelpunt blijkt hier aanzienlijk te zijn. In tabel 8.11 wordt nog een opsplitsing gemaakt van de totale logistieke kost in de verschillende kostencomponenten.

Tabel 8.11: Opsplitsing van de totale logistieke kost voor de Poissonverdeling.

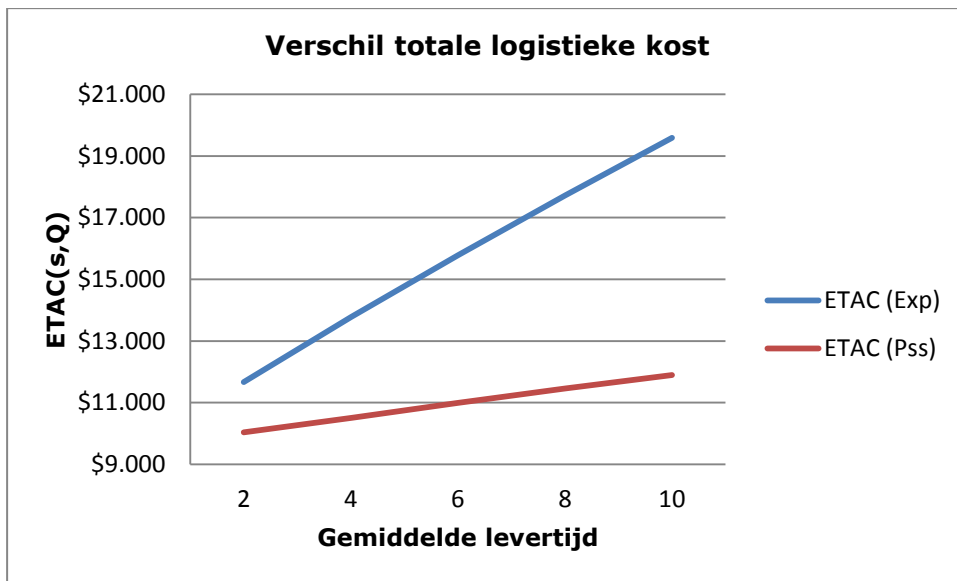
Poisson element	Gemiddelde Levertijd				
	2	4	6	8	10
$C_t$	\$6.800	\$6.784	\$6.776	\$6.776	\$6.760
$C_h$	\$2.994	\$3.486	\$3.951	\$4.389	\$4.827
$C_o$	\$207	\$206	\$205	\$205	\$204
$C_s$	\$35	\$29	\$66	\$87	\$103
<b>ETAC</b>	<b>\$10.036</b>	<b>\$10.505</b>	<b>\$10.998</b>	<b>\$11.456</b>	<b>\$11.893</b>

De transport- en bestelkost dalen slechts gestaag, aangezien de stijging van de bestelhoeveelheid ook zeer gering is. De tekortkost neemt wel toe, maar is nu slechts een kleine proportie van de totale logistiek kost (<1%). De voorraadkost neemt wel significant toe, maar deze stijging is voor 84% te verklaren door de gestegen 'in-transit' voorraad.

De verklaring is voor de hand liggend als de kenmerken van de Poissonverdeling worden vergeleken met die van de exponentiële verdeling. Zoals eerder vermeld is bij deze

laatstgenoemde het gemiddelde gelijk aan de standaarddeviatie. Dit wil zeggen dat de variantie toeneemt van vier in het meest gunstige geval naar honderd in het minst gunstige geval. Bij de Poisson verdeling stijgt de variantie slechts van twee naar tien. De variabiliteit van deze verdeling ligt dus veel lager. De resultaten die hierboven werden gevonden sluiten dus aan bij de eerder vermelde bevindingen. De veiligheidsvoorraad, tekortkost, totale logistieke kost, bestelhoeveelheid en aantal eenheden tekort per aanvulcyclus wordt voornamelijk beïnvloed door de levertijdvariabiliteit en in mindere mate door de gemiddelde levertijd. Ten slotte wordt in fig 8.3 de totale logistiek kost nog eens grafisch met elkaar vergeleken.

Figuur 8.3: grafische voorstelling van de totale logistieke kost bij Exponentiële en Poissonverdeling



## 9. Simulatie met Arena

In dit hoofdstuk worden twee onderzoeken besproken. Beide onderzoeken gebeuren aan de hand van een simulatiemodel dat werd opgesteld in het simulatiesoftwarepakket Arena 14.0.0. In het eerste onderzoek wordt de invloed van de onzekerheid van de levertijd op een *buyer-vendor* systeem geanalyseerd. In het tweede onderzoek wordt de invloed van de onzekerheid van de levertijd op de keuze van het transportmiddel bestudeerd.

### Deel A: simulatie van een buyer-vendor systeem

#### **Doelstelling**

In dit deel wordt een onderzoek uitgevoerd aan de hand van een simulatie. Hiervoor werd een simulatiemodel opgesteld in het simulatiesoftwarepakket Arena 14.0.0. Dit simulatiemodel beschouwt een *buyer-vendor* systeem, waarbij de fabrikant zijn productieproces afstelt op de vraag van (eind)klant. Het doel van deze simulatie is om het effect van de onzekerheid van de levertijd op de prestaties en de (voorraad)kosten van een *buyer-vendor* systeem te onderzoeken. In het simulatiemodel zullen verschillende simulaties worden uitgevoerd waarbij de waarden van de levertijd-parameters gewijzigd worden. Tijdens de simulatie worden gegevens over het voorraadniveau, het aantal eenheden tekort, het aantal bestellingen per jaar en de vraag tijdens de levertijd berekend. Met behulp van deze gegevens wordt de totale jaarlijkse relevante kost bepaald.

#### **Experimentenplanning**

Het *buyer-vendor* is een vorm van verticale integratie, waarbij de koper en leverancier gaan samenwerken door onder meer hun productie op elkaar af te stellen. Het doel is gezamenlijke winstmaximalisatie. Het *buyer-vendor* systeem dat hier wordt beschouwd is gebaseerd op het model van Beullens en Janssens (2011). Dit model wordt afgebeeld in figuur 9.1. Hier is te zien hoe de *koper* bestellingen plaatst in *Batches* en een constante vraag ( $y$ ) te verwerken krijgt. De leverancier heeft een eindig productieritme  $R \geq y$ . Verder wordt aangenomen dat de levertijd nul is en tekorten niet voorkomen. Het *buyer-vendor* systeem dat in deze simulatie veronderstelt echter een stochastische vraag en levertijd, waardoor tekorten wel zullen voorkomen.

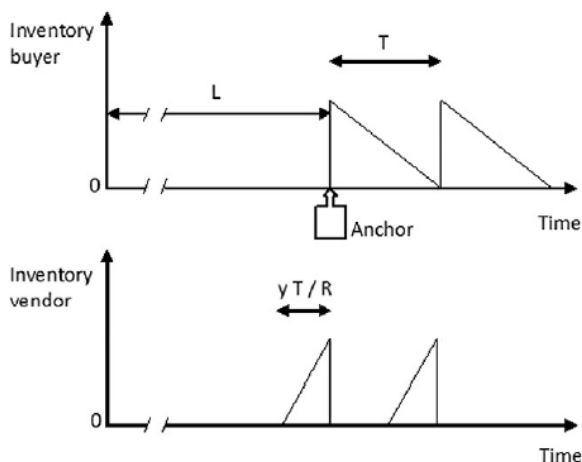
In de studie van Beullens en Janssens (2011) wordt ook cijfermateriaal gegeven, waarmee de auteurs hun numerieke voorbeelden uitwerken. De vraag ( $y$ ) is gelijk aan 4000 eenheden per jaar. In deze simulatie bedraagt de vraag echter 3960 eenheden. De simulatie heeft namelijk een

duurtijd van één jaar (360 dagen), waardoor de vraag per dag bijgevolg gelijk is aan elf eenheden. De fabrikant heeft een vaste instelkost per productie-run ( $s_p$ ) van €600 en een vaste verzendingskost ( $s_s$ ) van €25 per verzonden bestelling. De variabele kostprijs per product ( $c$ ) bedraagt €10. De kleinhandelaar heeft een vaste kost van €300 per geplaatste bestelling ( $s_b$ ) en betaalt een vaste prijs ( $w$ ) van €20 per aangekochte eenheid. De verkoopprijs ( $p$ ) bedraagt €40. De vaste bestelkost bevat onder meer de transport- en de administratieve kost. De voorraadkost bedraagt 20% van aankoopwaarde van het product. De kost per eenheid in *backorder* wordt niet gegeven, omdat dit model geen tekorten veronderstelt. Hier wordt aangenomen dat de *backorder*-kost onafhankelijk is van de tijd en €10 per eenheid bedraagt.

De productie van de fabrikant is afgestemd op de vraag van de eindklant. Het productieniveau ( $R$ ) ligt bijgevolg op elf eenheden per dag. Wanneer de levertijd strikt positief is, zal de productie moeten starten voor de aanvang van de vraag, wil de fabrikant de gewenste bestelhoeveelheid tijdig fabriceren. Daarom wordt in dit model aangenomen dat de beginvoorraad van de fabrikant gelijk is aan het bestelpunt van kleinhandelaar. Kort samengevat:

- $y = 3960$
- $\mu_D = 11$  eenheden per dag
- $s_p = € 600/\text{productie-run}$
- $s_s = € 25/\text{verzending}$
- $s_b = € 250/\text{bestelling}$
- $c = €25/\text{eenheid}$
- $w = € 50/\text{eenheid}$
- *discontovoet* ( $\alpha$ ) = 20%
- $B_2 = €10/\text{eenheid}$

Figuur 9.1: *Buyer-vendor* systeem met een eindig productieritme (bron: Beullens & Janssens, 2011)



In de meeste *buyer-vendor* systemen gebeurt de verticale samenwerking door een vaste bestelhoeveelheid te bepalen die de kosten van beide partijen minimaliseert. De bestelhoeveelheid kan bepaald worden aan de hand van volgende formule (Beullens en Janssens, 2011, p. 121):

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot (s_b + s_p + s_s) \cdot y}{\alpha(2p-c)^2 + \alpha c}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (600 + 300 + 25) \cdot 3960}{0,2(2 \cdot 40 - 10)^2 + 0,2 \cdot 10}} = 676,66 \text{ eenheden} \quad (9.1)$$

Aangezien de tijdseenheid in de simulatie discreet is (dagen), wordt deze bestelhoeveelheid herleid tot het dichtst bijliggende getal dat deelbaar is door de gemiddelde dagelijkse vraag. Dit wil zeggen dat de optimale bestelhoeveelheid in deze simulatie 671 eenheden bedraagt.

Voor de totale relevante kost te bepalen gebruiken Beullens en Janssens (2011) de zogenaamde *annuity stream* functies. Het is echter niet praktisch om de output van Arena in zulke functies te verwerken. Daarom is de totale relevante kost in dit model is gebaseerd op het *buyer-vendor* model van Banerjee (1986) en Goyal (1988) en ziet er als volgt uit:

$$TRC = (s_p + s_b + s_s) \cdot O + \alpha c \cdot \text{avg}(\text{invr}) + \alpha w \cdot \text{avg}(\text{invm}) + B_2 \cdot ES \quad (9.1)$$

$$TRC = 952 \cdot O + 2 \cdot \text{avg}(\text{invr}) + 4 \cdot \text{avg}(\text{invm}) + B_2 \cdot ES \quad (9.2)$$

Waarbij:

- O: aantal bestellingen/productie-runs per jaar
- avg(inv): gemiddelde jaarlijkse voorraad kleinhandelaar
- avg(invm): gemiddelde jaarlijkse voorraad fabrikant

### **Bouw van het simulatiemodel**

Het simulatiemodel (zie figuur in **bijlage 10**) heeft een duurtijd van één jaar (360 dagen) en de tijd in dit model is integer (dagen). Het veronderstelt een volledige *backorder*, indien de voorraad onvoldoende is. Er zijn met andere woorden geen verloren verkopen.

In het simulatiemodel wordt allereerst de vraag van de eindklant gecreëerd (*'create demand'*). Vervolgens wordt met behulp van een *decide module* gecheckt of de voorraad van de kleinhandelaar (*buyer*) voldoende groot genoeg is om aan deze vraag te voldoen (*'check inventory status'*). Indien dit zo is, wordt de voorraad van de kleinhandelaar verminderd met de vraag en wordt dit met behulp van een *record module* opgeslagen als *'satisfied demand'*. Indien de voorraad onvoldoende is wordt de voorraad naar nul gebracht en wordt de vraag met behulp van een *hold module* in een *backorder-wachtrij* geplaatst (*'hold for backorder'*). Deze gegevens worden opgeslagen als *'demand short'* en worden nadien gebruikt om het aantal eenheden tekort te bepalen. In de volgende stap van het proces wordt nagegaan of het nodig is om een bestelling te plaatsten bij de fabrikant (*'check stock'*). Dit gebeurt wanneer de voorraad van de kleinhandelaar

kleiner of gelijk is aan het bestelpunt. Zodra de levering bij de kleinhandelaar aankomt, wordt eerst de vraag in de *backorder* behandeld, zodat deze wachtrij wordt weggewerkt. In dit model kan de fabrikant ook maar één bestelling tegelijkertijd verwerken. Er vindt dus geen *ordercrossing* plaats.

Indien de voorraad van de fabrikant groot genoeg is om de volledige bestelhoeveelheid te leveren, wordt dit aan de hand van een *record module* opgeslagen onder '*satisfied order*'. Is de voorraad van de fabrikant onvoldoende om de volledige bestelhoeveelheid te leveren, dan bestaat de levering uit het resterende deel van de voorraad van de fabrikant. Tenslotte wordt met behulp van een *delay module* de levertijd toegekend aan de levering.

Tijdens de simulatie worden de gegevens van de vraag tijdens de levertijd opgeslagen met behulp van een *assign* en een *record module*. Hierdoor kunnen de gegevens worden weggeschreven in een tekstbestand. Via de *Input Analyzer* wordt nagegaan welke verdeling de vraag tijdens de levertijd heeft. De bekomen parameters voor de verdeling zullen nadien gebruikt worden om het bestelpunt  $s$  bij een serviceniveau van 95% te berekenen. Om betrouwbare informatie te verkrijgen, werd elke simulatie vijftig maal herhaald.

De simulatie wordt uitgevoerd onder verschillende scenario's. In scenario één wordt de totale relevante kost bepaald in het geval dat de kleinhandelaar geen veiligheidsvoorraad aanhoudt. In het tweede scenario wordt deze veronderstelling gewijzigd en houdt de kleinhandelaar wel een veiligheidsvoorraad aan. In beide scenario's wordt verondersteld dat de vraag en de levertijd stochastische variabelen zijn. De vraag per tijdseenheid volgt een Poissonverdeling. Voor de levertijd wordt een onderscheid gemaakt tussen de Normaal- en de Gammaverdeling.

### **Scenario 1: geen veiligheidsvoorraad**

In dit scenario wordt het *buyer-vendor* model gesimuleerd onder de veronderstelling dat de kleinhandelaar geen veiligheidsvoorraad aanhoudt. De vraag is Poissonverdeeld en de levertijd normaal verdeeld. De simulatie werd uitgevoerd voor verschillende combinaties van  $\mu_T$  en  $\sigma_T$ . In tabel 9.1 worden de resultaten van deze simulatie weergegeven. De arena-output van één combinatie wordt weergegeven in de **bijlage 8** ( $\mu_T = 6$  en  $\sigma_T = 3,6$ ). Tabel 9.2 toont de resultaten van de simulatie, indien de levertijd Gamma verdeeld is. Ook hier wordt de output weergegeven in **bijlage 9**. Waarbij de afkortingen in de tabellen het volgende betekenen:

- Voorraad F.: de gemiddelde jaarlijkse voorraad van de fabrikant.
- Voorraad KH: de gemiddelde jaarlijkse voorraad van de kleinhandelaar
- # tekorten: het aantal eenheden tekort op jaarbasis
- Order N. sat: aantal levering dat de fabrikant geen volledige bestelhoeveelheid kan afleveren

- Order sat.: aantal bestellingen dat de fabrikant de volledige bestelhoeveelheid kan afleveren
- TRC: totale relevante kost
- $P_2$ : het  $P_2$ -serviceniveau of 'fill rate'

Tabel 9.1: sensitiviteitsanalyse scenario 1 – normaalverdeling

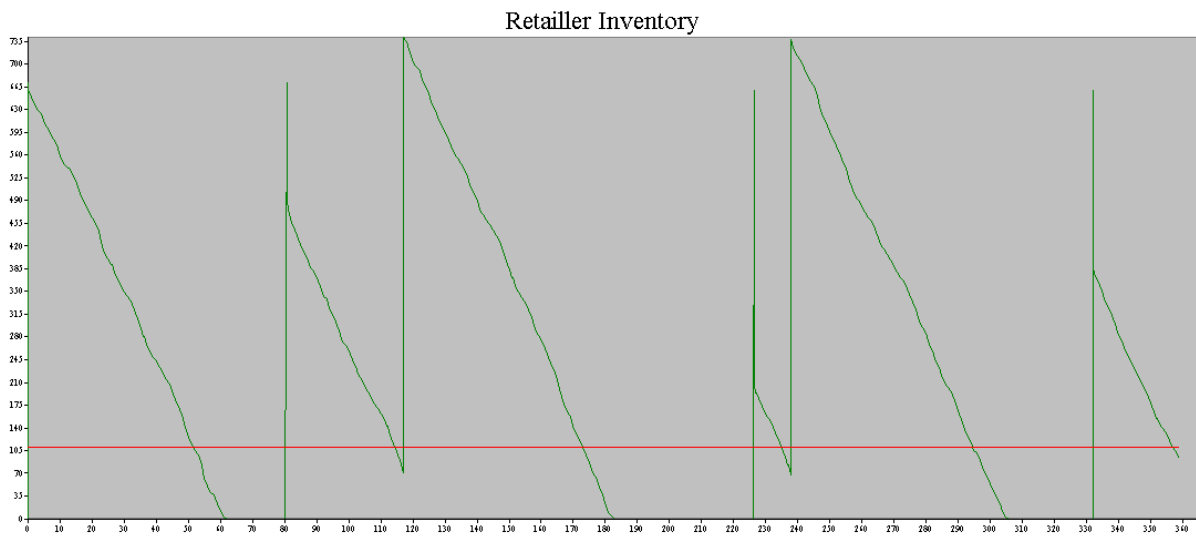
Normaal verdeling		Variatiecoëfficiënt ( $\sigma_L/\mu_L$ )		
$\mu_L \downarrow$	element	0,2	0,6	1
2	$\sigma_T$	0,4	1,2	2
	Voorraad F.	334	333	333
	Voorraad KH	333	333	332
	# tekorten	18	32	49
	Order N. sat.	3	3	3,02
	Order sat	2,52	2,56	2,54
	<b>TRC</b>	<b>€ 7.726</b>	<b>€ 7.866</b>	<b>€ 8.030</b>
	$P_2$	99,55%	99,19%	98,76%
6	$\sigma_T$	1,2	3,6	6
	Voorraad F.	337	337	336
	Voorraad KH	334	334	339
	# tekorten	33	88	115
	Order N. sat.	3,12	2,98	3,2
	Order sat	2,6	2,7	2,5
	<b>TRC</b>	<b>€ 7.890</b>	<b>€ 8.440</b>	<b>€ 8.728</b>
	$P_2$	99,15%	97,79%	97,09%
10	$\sigma_T$	2	6	10
	Voorraad F.	339	339	339
	Voorraad KH	334	335	333
	# tekorten	48	139	223
	Order N. sat.	3,1	3,18	3,18
	Order sat	2,76	2,66	2,66
	<b>TRC</b>	<b>€ 8.044</b>	<b>€ 8.958</b>	<b>€ 9.790</b>
	$P_2$	98,77%	96,47%	94,35%

Wanneer de gemiddelde jaarlijkse voorraad van de kleinhandelaar en fabrikant bij de verschillende combinaties van  $\mu_T$  en  $\sigma_T$  met elkaar worden vergeleken, valt het op dat deze vrij constant blijven. Merk op dat de voorraadniveaus in dit geval rond de theoretische cyclusvoorraad liggen ( $\frac{676}{2} = 338$ ). Hieruit zou besloten kunnen worden dat de levertijd-variabiliteit niet zorgt voor fluctuaties van het voorraadniveau. Dit is echter voorbarig. In figuur 9.2 wordt het voorraadniveau van de

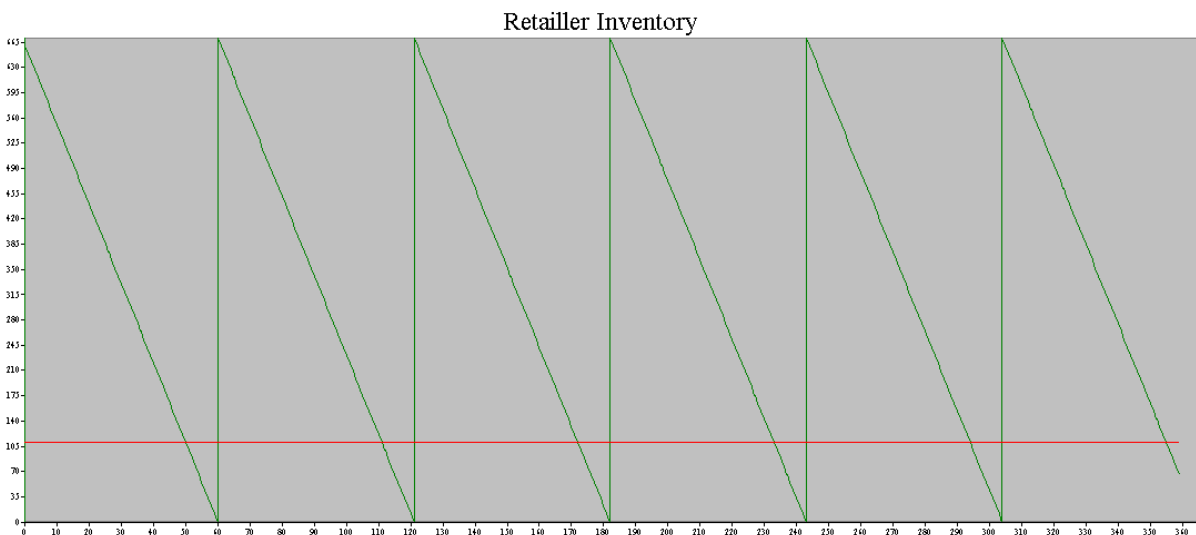


kleinhandelaar doorheen het jaar afgebeeld. De horizontale rode lijn is het bestelpunt. Deze figuur kan worden vergeleken met het voorraadniveau in het geval dat de vraag en de levertijd deterministisch zijn. Dit laatste geval wordt afgebeeld op figuur 9.3. Uit deze vergelijking blijkt dat het voorraadniveau van de kleinhandelaar doorheen het jaar niet het algemene 'zaagpatroon' volgt. Ook is hier te zien hoe er een grote *backorder* optreedt. Er kan besloten worden dat de gemiddelde jaarlijkse voorraad constant blijft, maar dat het voorraadniveau doorheen het jaar wel onderhevig is aan fluctuaties.

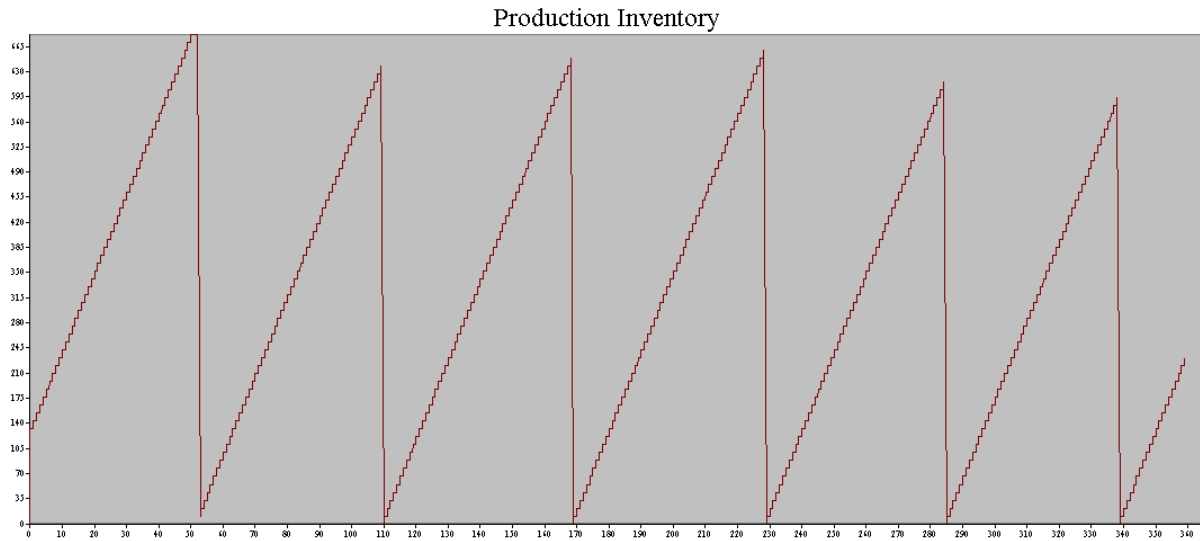
Figuur 9.2: Voorraadniveau kleinhandelaar – gamma verdeling ( $\mu_T = 10$  en  $\sigma_T = 10$ )



Figuur 9.3: Voorraadniveau kleinhandelaar – Vraag en levertijd deterministisch

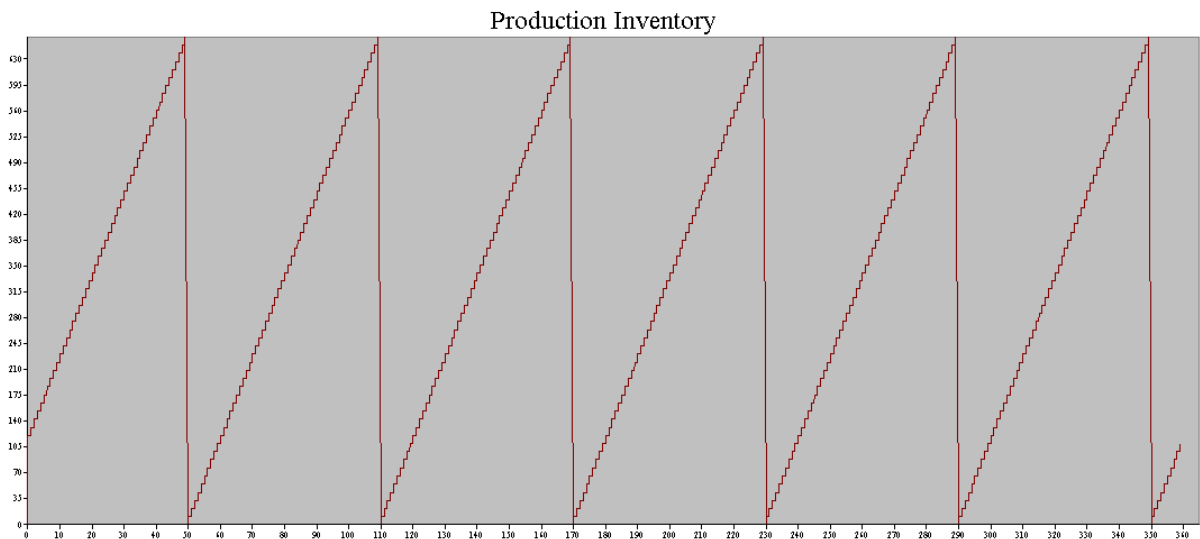


Figuur 9.4: Voorraadniveau fabrikant – gamma verdeling ( $\mu_T = 10$  en  $\sigma_T = 10$ )



In figuur 9.4 wordt het voorraadniveau van de fabrikant afgebeeld. Ook hier is te zien dat de pieken van het voorraadniveau van fabrikant doorheen het jaar licht fluctueren. In figuur 9.5 wordt de voorraad van de fabrikant afgebeeld indien enkel de levertijd stochastisch is. Als beide grafieken met elkaar worden vergeleken, kan besloten worden dat de fluctuaties van het voorraadniveau van de fabrikant voornamelijk veroorzaakt wordt door schommelingen in de vraag.

Figuur 9.5: Voorraadniveau fabrikant – Vraag deterministisch



Als tabel 9.1 en 9.2 verder bestudeerd worden blijkt dat het aantal eenheden tekort wel aanzienlijk toeneemt met de levertijd-variabiliteit. Het feit dat de voorraad vrij constant blijft en het aantal eenheden tekort toeneemt, is voorspelbaar indien er geen veiligheidsvoorraad wordt aangelegd, maar wordt in dit scenario nogmaals bevestigd. Deze stijging van het aantal eenheden tekort zorgt enerzijds voor een daling van het serviceniveau en anderzijds voor een stijging van de tekortkost

en totale relevant kost. Als levertijd normaal verdeeld is en de gemiddelde levertijd klein is ( $\mu_T = 2$ ), is dit effect niet zo sterk. Het serviceniveau daalt dan slechts met 0,79%. Voor een matige gemiddelde levertijd ( $\mu_T = 6$ ), zorgt een stijging van de variatiecoëfficiënt voor een matige daling van het serviceniveau (-2,06%). Voor een hoge gemiddelde levertijd ( $\mu_T = 10$ ), zorgt een stijging van de relatieve variatie voor matige tot grote daling van het serviceniveau (-4,42%).

De stijging van de totale relevant kost is hier vooral te danken aan de gestegen tekortkost. De toename van de logistieke kost als gevolg van een hogere gemiddelde levertijd is in dit geval eerder beperkt. Als  $\sigma_T = 2$  zorgt een stijging van de gemiddelde levertijd van twee naar tien dagen voor een stijging van de totale relevante kost met 0,76%.

Tabel 9.2: sensitiviteitsanalyse scenario 1 – Gammaverdeling

Gamma verdeling		Variatiecoëfficiënt ( $\sigma_L/\mu_L$ )		
$\mu_L \downarrow$	element	0,2	0,6	1
2	$\sigma_T$	0,4	1,2	2
	Voorraad F.	333	333	333
	Voorraad KH	333	333	333
	# tekorten	17	30	42
	Order N. sat.	3,02	3,04	3
	Order sat	2,5	2,5	2,54
	<b>TRC</b>	<b>€ 7.718</b>	<b>€ 7.848</b>	<b>€ 7.968</b>
	$P_2$	99,56%	99,25%	98,95%
6	$\sigma_T$	1,2	3,6	6
	Voorraad F.	337	351	336
	Voorraad KH	334	357	336
	# tekorten	34	77	130
	Order N. sat.	3,16	2,82	3,02
	Order sat	2,56	2,76	2,64
	<b>TRC</b>	<b>€ 7.900</b>	<b>€ 8.450</b>	<b>€ 8.866</b>
	$P_2$	99,14%	98,05%	96,70%
10	$\sigma_T$	2	6	10
	Voorraad F.	339	339	339
	Voorraad KH	334	339	342
	# tekorten	48	117	201
	Order N. sat.	3,14	3,04	3,12
	Order sat	2,74	2,78	2,74
	<b>TRC</b>	<b>€ 8.044</b>	<b>€ 8.754</b>	<b>€ 9.606</b>
	$P_2$	98,78%	97,03%	94,89%

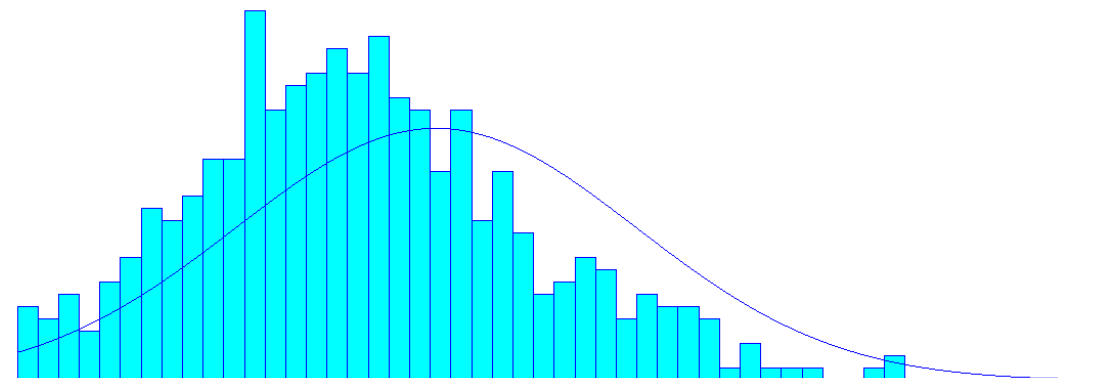
Een verandering van de levertijdparameters van de meest gunstige ( $\mu_T = 2$  &  $\sigma_T = 0,4$ ) naar de minst gunstige situatie ( $\mu_T = 10$  &  $\sigma_T = 10$ ) zorgt ervoor dat de totale relevante kost bij de normaalverdeling stijgt met 26,46%. Indien de levertijd een Gammaverdeling volgt stijgt de totale relevante kost met 24,46%. Indien de vraag en levertijd deterministisch zijn, is de jaarlijkse totale relevante kost gelijk aan € 7560. In vergelijking met het minst gunstige geval liggen de totale kosten 29,5% hoger bij de normaalverdeling en 28,31% hoger bij de Gammaverdeling.

Opmerkelijk is dat de totale relevante kost en het aantal eenheden tekort bij de Gammaverdeling iets lager is dan bij de normaalverdeling. In hoofdstuk 8 werd juist het omgekeerde effect vastgesteld. Een directe verklaring kan hiervoor niet onmiddellijk worden gevonden. Indien er meer herhalingen van het model worden uitgevoerd (bijvoorbeeld 150 in plaats van 50), dan blijft dit verschil bestaan. Vervolgens is er ook geen verband tussen het aantal leveringen dat de fabrikant geen volledige bestelhoeveelheid kan afleveren en de levertijdvariabiliteit. Samen met de conclusies van figuur 9.4 en 9.5 kan besloten worden dat dit hoogstwaarschijnlijk wordt veroorzaakt door de stochastische vraag.

## Scenario 2: veiligheidsvoorraad

In dit scenario wordt er verondersteld dat de kleinhandelaar een bepaalde veiligheidsvoorraad aanhoudt. Deze veiligheidsvoorraad is afhankelijk van de parameters van verdeling van de vraag tijdens de levertijd. Via de *Input Analyzer* wordt nagegaan welke verdeling de vraag tijdens de levertijd heeft. De bekomen parameters voor de verdeling worden dan gebruikt om het bestelpunt  $s$  bij een serviceniveau van 95% te berekenen. Figuur 9.6 geeft de verdeling van de vraag tijdens de levertijd weer, in het geval dat en de levertijd normaal verdeeld is met  $\mu_T = 2$  en  $\sigma_T = 2$ .

Figuur 9.5: verdeling van de vraag tijdens de levertijd – levertijd: normaalverdeling ( $\mu_T = 2$ ,  $\sigma_T = 2$ )



De *input analyzer* geeft aan dat een normaalverdeling met  $\mu_T = 22,2$  en  $\sigma_T = 7,99$  de beste fit geeft voor de data van de vraag tijdens de levertijd indien de *mean square error* (MSE) als

referentiepunt wordt gebruikt. Indien echter de chi-kwadrat waarde als referentiepunt wordt gebruikt, gaat de beste fit naar een Weibull verdeling. Hier wordt geopteerd voor de normaalverdeling, omdat de MSE enerzijds de standaard referentiewaarde is van de *input analyzer* en anderzijds omdat het verschil in de nodige veiligheidsvoorraad tussen beide verdelingen slechts één eenheid bedraagt. De overeenkomstige veiligheidsvoorraad voor de normaalverdeling is gelijk aan 13 eenheden.

Deze procedure wordt herhaald voor verschillende combinaties van van  $\mu_T$  en  $\sigma_T$ . Tabel 9.3 geeft de resultaten weer, indien de levertijd normaal verdeeld is. Tabel 9.4 toont de resultaten, indien de levertijd Gamma verdeeld is. **Bijlage 10 en 11** geven weer arena-ouput weer van één bepaalde combinatie.

Tabel 9.3: sensitiviteitsanalyse scenario 2 – normaalverdeling

Normaalverdeling		Variatiecoëfficiënt ( $\sigma_L/\mu_L$ )		
$\mu_L \downarrow$	element	0,2	0,6	1
2	$\sigma_T$	0,4	1,2	2
	Voorraad F.	332	335	334
	Voorraad KH	344	351	359
	# tekorten	2	3	6
	Order N. sat.	3,38	3,32	3,4
	Order sat	2,26	2,26	2,22
	<b>TRC</b>	<b>€ 7.610</b>	<b>€ 7.654</b>	<b>€ 7.714</b>
	$P_2$	99,95%	90,92%	99,85%
6	$\sigma_T$	1,2	3,6	6
	Voorraad F.	337	337	339
	Voorraad KH	353	401	415
	# tekorten	4	8	12
	Order N. sat.	3,44	3,48	3,4
	Order sat	2,32	2,5	2,56
	<b>TRC</b>	<b>€ 7.676</b>	<b>€ 7.908</b>	<b>€ 8.008</b>
	$P_2$	99,90%	99,82%	99,65%
10	$\sigma_T$	2	6	10
	Voorraad F.	337	337	339
	Voorraad KH	365	423	440
	# tekorten	5	20	36
	Order N. sat.	3,32	3,42	3,44
	Order sat	2,64	2,62	2,58
	<b>TRC</b>	<b>€ 7.734</b>	<b>€ 8.116</b>	<b>€ 8.348</b>
	$P_2$	99,87%	99,54%	99,10%

Uit Tabel 9.3 en 9.4 blijkt dat de totale relevante kost minder sterk stijgt, indien de veiligheidsvoorraad in rekening wordt gebracht. Het serviceniveau blijft bij elke combinatie boven het 99% niveau. De veiligheidsvoorraad wordt wel aanzienlijk groter, naarmate de levertijd-variabiliteit toeneemt. Bij beide verdelingen voor de levertijd is de gemiddelde jaarlijkse voorraad van de kleinhandelaar in het minst gunstige geval nu dubbel zo groot als in scenario één. De stijging van de totale relevante kost is in dit scenario vooral te danken aan de gestegen voorraadkost. Als levertijd normaal verdeeld en de gemiddelde levertijd klein is ( $\mu_T = 2$ ), zorgt een stijging van de variatiecoëfficiënt voor een stijging van het voorraadniveau (van de kleinhandelaar) met 4,36%. Voor een matige gemiddelde levertijd ( $\mu_T = 6$ ), zorgt een stijging van de relatieve variatie voor een matige tot grote stijging van het voorraadniveau (+17,56%). Voor een hoge gemiddelde levertijd ( $\mu_T = 10$ ), zorgt een stijging van de relatieve variatie hier ook voor een matige tot vrij grote stijging van het voorraadniveau (+20,55%). Merk op dat het serviceniveau in het laatste geval ook lichtjes gedaald is.

Een verandering van de levertijdparameters van het deterministisch geval en meest gunstige geval van de sensitiviteitsanalyse ( $(\mu_T = 2 \& \sigma_T = 0,4)$  naar de minst gunstige situatie ( $\mu_T = 10 \& \sigma_T = 10$ ) zorgt dit bij de normaalverdeling voor een stijging van de totale relevante kost met respectievelijk 14,29% en 13,33%. Bij een Gamma verdeling zorgt dit voor een stijging van respectievelijk 17,35% en 16,37%.

Tabel 9.4: sensitiviteitsanalyse scenario 2 – Gammaverdeling

Gamma verdeling		Variatiecoëfficiënt ( $\sigma_L/\mu_L$ )		
$\mu_L \downarrow$	element	0,2	0,6	1
2	$\sigma_T$	0,4	1,2	2
	Voorraad F.	334	332	335
	Voorraad KH	349	357	361
	# tekorten	1	2	6
	Order N. sat.	3,3	3,46	3,26
	Order sat	2,3	2,22	2,36
	<b>TRC</b>	<b>€ 7.624</b>	<b>€ 7.662</b>	<b>€ 7.724</b>
	$P_2$	99,98%	99,95%	99,83%
6	$\sigma_T$	1,2	3,6	6
	Voorraad F.	335	340	340
	Voorraad KH	357	410	438
	# tekorten	3	8	19
	Order N. sat.	3,46	3,36	3,1
	Order sat	2,36	2,62	2,9
	<b>TRC</b>	<b>€ 7.678</b>	<b>€ 7.950</b>	<b>€ 8.172</b>
	$P_2$	99,93%	99,81%	99,52%
10	$\sigma_T$	2	6	10

Voorraad F.	338,96	340	340
Voorraad KH	361,55	440	490
# tekorten	8,44	22	45
Order N. sat.	3,22	3,18	3,5
Order sat	2,72	2,84	2,62
<b>TRC</b>	<b>€ 7.759</b>	<b>€ 8.210</b>	<b>€ 8.640</b>
P <sub>2</sub>	99,79%	99,44%	98,86%

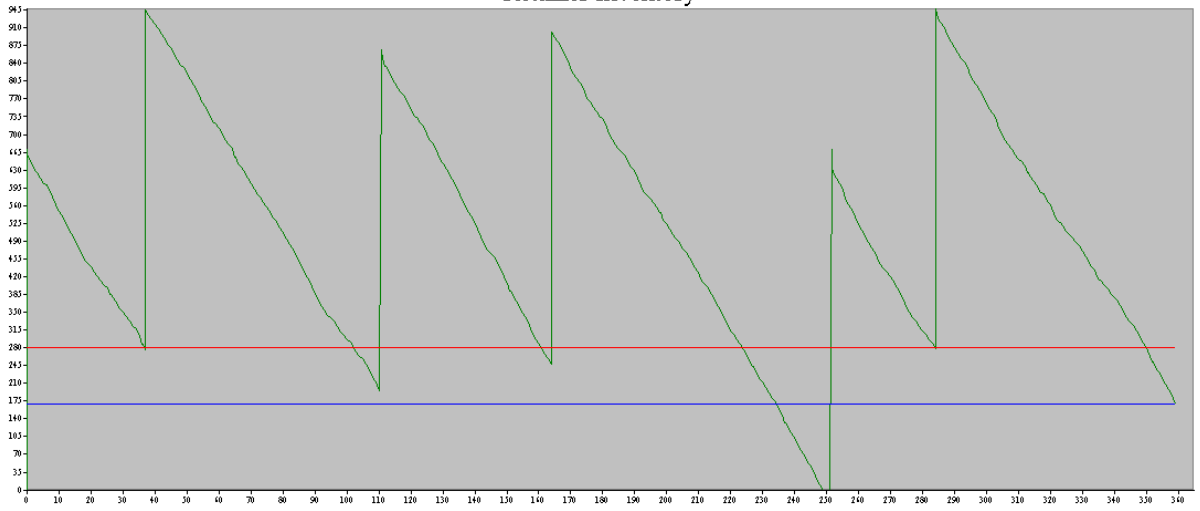
Deze stijging is minder groot dan in scenario één. Hieruit kan besloten worden dat het aanhouden van een veiligheidsvoorraad gunstig is voor de logistieke kost, indien de levertijd-variabiliteit toeneemt. Merk wel op dat dit afhankelijk is van de verhouding tussen de voorraad-en tekortkost. Indien de verhouding tussen de tekortkost en de voorraadkost gewijzigd wordt, verandert ook de toename van de totale relevante kost.

Merk ook op de totale relevante kost hoger ligt, indien de levertijd een Gamma verdeling heeft. Dit vooral voor hoge variatiecoëfficiënten. Dit is dus wel in overeenstemming met de literatuur en de bevindingen uit hoofdstuk 8. Vervolgens is ook hier geen verband tussen het aantal bestellingen dat de fabrikant geen volledige bestelhoeveelheid kan afleveren en de levertijdvariabiliteit.

Tot slot wordt in figuur 9.6 het voorraadniveau van de kleinhandelaar doorheen het jaar afgebeeld. Deze figuur kan opnieuw worden vergeleken met het voorraadniveau in het geval dat de vraag en de levertijd deterministisch zijn (figuur 9.3). Hieruit blijkt dat de pieken van het voorraadniveau van de kleinhandelaar doorheen het jaar ook hier niet gelijklopen. De *backorders* die hier optreden zijn wel aanzienlijk kleiner dan in scenario één. Dit is het gevolg van de aangelegde veiligheidsvoorraad (blauwe lijn). Ook hier kan besloten worden dat het voorraadniveau doorheen het jaar –als gevolg van de levertijd-variabiliteit- onderhevig is aan fluctuaties. Het voorraadniveau van de fabrikant volgt hier bij benadering hetzelfde patroon als in figuur 9.4.

Figuur 9.6: Voorraadniveau kleinhandelaar – gamma verdeling ( $\mu_T = 10$  en  $\sigma_T = 10$ )

Retailer Inventory





## **Deel B: invloed van de onzekerheid van de levertijd op keuze van het transportmiddel**

### ***Doelstelling en achtergrond***

De simulatie die hier wordt uitgevoerd, is gebaseerd op een studie van Vernimmen et al. (2008). In deze studie presenteren de auteurs een gevalstudie, waarin ze de keuze van het transportmiddel bestuderen vanuit het perspectief van de totale logistieke kost. De data van deze studie wordt in deze simulatie gebruikt om een representatief model te bouwen. Het simulatiemodel is vergelijkbaar met het model uit deel A. Hier wordt de fabrikant of leverancier echter buiten beschouwing gelaten. Indien een bestelling wordt geplaatst, wordt de volledige bestelhoeveelheid geleverd na een bepaalde levertijd. Er is dus geen sprake van een eventuele 'order not satisfied' bij de leverancier. Er wordt met andere woorden verondersteld dat de capaciteit van de leverancier 'oneindig' is. Bij de onderneming die de bestelling plaatst wordt wel gewerkt met het *backorder* systeem. De vraag wordt in deze wachtrij geplaatst, als blijkt dat de voorraad van de onderneming onvoldoende is. In deze simulatie wordt gebruik van een  $P_2$ -serviceniveau om de veiligheidsvoorraad te bepalen. Dit is een betere maatstaf, wanneer transportmodi met verschillende laadcapaciteiten met elkaar worden vergeleken. Deze servicemaatstaf houdt immers rekening met de grootte van de bestelhoeveelheid, terwijl het  $P_1$ -serviceniveau hier geen rekening mee houdt (Dullaert et al., 2007).

### ***Implementatie in Arena simulatiesoftware***

Het simulatie model wordt weergegeven in **bijlage 8**. De simulatie heeft een duurtijd van één jaar (360) en om representatieve informatie te verkrijgen, wordt de simulatie twintig maal herhaald. Tijdens de simulatie worden de nodige gegevens verzameld om de logistieke kost te bepalen. Hier worden de gegevens van de vraag tijdens de levertijd niet opgeslagen, omdat deze simulatie uitgaat van een  $P_2$  serviceniveau. Deze maatstaf is direct af te lezen uit de standaardoutput van Arena. De veiligheidsvoorraad wordt hier ingesteld op een bepaalde waarde. Vervolgens wordt de simulatie uitgevoerd, die het overeenkomstige  $P_2$ -serviceniveau aangeeft. De veiligheidsvoorraad wordt dan gewijzigd, totdat het vereiste serviceniveau is bereikt.

Het model beschouwt een onderneming, gelegen in Vlaanderen, met een inkomende stroom van vloeibare bulkgoederen. Vier transportmodi zijn beschikbaar om de goederen naar de ontvanger te vervoeren. De eerste transportmodus is het wegvervoer via vrachtwagen vanuit Antwerpen. Deze transportmodus is het snelst en meest betrouwbaar, maar heeft tegelijk ook de hoogste transportkost en laagste laadcapaciteit. De tweede mogelijkheid is het vervoer via pijpleiding. Dit transportmiddel is vrij traag, maar heeft wel de hoogste capaciteit en de levertijd-variabiliteit is gelijk aan nul. De laatste twee transportmodi zijn binnenvaartschepen. Er kan een onderscheid

worden gemaakt naargelang de haven van verschepping. Het derde transportmiddel is een binnenvaartschip dat vertrekt vanuit Antwerpen en het vierde transportmiddel is binnenvaartschip dat vertrekt vanuit Vlissingen (Nederland). In tabel 9.9 wordt een overzicht gegeven van de specifieke logistiek kenmerken van de vier transportmodi.

De totale jaarlijkse vraag ( $y$ ) van de onderneming bedraagt 25 200 ton. De onderneming verbruikt gemiddelde gezien 70 ton per dag met een variantie van 625 ton<sup>2</sup>. De waarde van de goederen ligt op €400 per ton en de voorraadkost op jaarbasis bedraagt aan 15% van de waarde van de goederen. De onderneming vereist een  $P_2$  serviceniveau van 98%. De bestelkost bedraagt €10 per bestelling. Er wordt verondersteld dat de vraag en de levertijd Gamma verdeeld zijn.

Tabel 9.9: Data ten behoeve van het simulatiemodel (bron: Vernimmen et al., 2008)

	<b>Wegtransport</b>	<b>Pijpleiding</b>	<b>Binnenvaart (Ant)</b>	<b>Binnenvaart (VI)</b>
<b>TC (per eenheid)</b>	€ 5,61	€ 2,13	€ 3,06	€ 2,48
<b><math>\mu_T</math> (dag)</b>	0,21	4,33	5,85	5,88
<b><math>\sigma_T^2</math> (dag)</b>	0,02	0,00	0,18	0,47
<b>Q (ton)</b>	30	1662	500	1000

De totale logistieke kost bestaat in dit model uit de transportkost, de bestelkost en de voorraadkost voor het aanhouden van een cyclus-, een 'in-transit'- en een veiligheidsvoorraad. In het simulatiemodel wordt deze totale logistieke kost als volgt berekend:

$$\bullet \quad TLC = TC + A * O + v * h * avg(inv) + v * h * \frac{\mu_T}{360} * y \quad (9.1)$$

waarbij:

- TC: de jaarlijkse transportkost
- A: bestelkost per bestelling
- O: het aantal bestellingen per jaar
- v: waarde van de goederen (per ton)
- h: voorraadkost per eenheid per jaar
- avg(inv): gemiddelde jaarlijkse voorraad
- y: jaarlijkse vraag
- $\mu_T$ : verwachte levertijd

Het aantal bestellingen per jaar, de gemiddelde jaarlijkse cyclus- en veiligheidsvoorraad en de gemiddelde levertijd worden berekend door Arena.

### Experimentenplanning

De simulatie wordt uitgevoerd onder twee verschillende scenario's. In het eerst scenario ligt de waarde van de goederen op €400 per ton en bedraagt de voorraadkost 15% van deze waarde. In het tweede scenario wordt aangenomen dat de goederen €600 waard zijn en de overeenkomstige voorraadkost 20% bedraagt. In de simulatie wordt onderzocht in welke mate de levertijd-parameters van de verschillende transportmodi de totale logistieke kost beïnvloeden. De onderneming zal kiezen voor het transportmiddel dat de logistieke kost minimaliseert.

### Scenario 1

In dit scenario gaat het om vloeibare bulkgoederen met een lage tot matige waarde. De simulatie wordt uitgevoerd voor de vier transportalternatieven. De totale logistieke kost wordt vervolgens berekend aan de hand van formule 9.2 en de resultaten van de simulatie. De bijhorende totale logistieke kost weergegeven in tabel 9.10. Dit is het basismodel van scenario één. De arena output van het wegtransport en binnenvaart (vlissingen) wordt weergegeven in **bijlage 12 en 13**.

Tabel 9.10: totale logistieke kost basismodel – scenario 1

<b>v=400 / h=15%</b>	<b>Wegtransport</b>	<b>Pijpleiding</b>	<b>Binnenvaart (Antw)</b>	<b>Binnenvaart (VI)</b>
<b>TC (per eenheid)</b>	5,61	2,13	3,06	2,48
<b><math>\mu_T</math> (dag)</b>	0,21	4,33	5,85	5,88
<b><math>\sigma_T</math> (dag)</b>	0,14	0,00	0,42	0,69
<b><math>\sigma_T/\mu_T</math></b>	<b>0,67</b>	<b>0,00</b>	<b>0,07</b>	<b>0,12</b>
<b>Q (ton)</b>	120	1662	750	1000
<b>Transportkost</b>	€ 141.372	€ 53.676	€ 77.112	€ 62.496
<b>Bestelkost</b>	€ 2.100	€ 156	€ 340	€ 256
<b>Cyclusvoorraad</b>	€ 3.647	€ 49.774	€ 22.634	€ 30.092
<b>veiligheidsvoorraad</b>	€ 3.360	€ 240	€ 2.400	€ 2.160
<b>in-transit voorraad</b>	€ 831	€ 17.937	€ 24.233	€ 24.358
<b>Totale logistieke kost</b>	<b>€ 151.310</b>	<b>€ 121.783</b>	<b>€ 126.720</b>	<b>€ 119.361</b>
<b>P<sub>2</sub></b>	98,07%	98,00%	98,00%	98,03%

Uit tabel 9.10 blijkt dat de onderneming haar voorraad het best het kan aanvullen door gebruik te maken van het binnenvaartschip vanuit Vlissingen. De tweede en derde keuze gaan respectievelijk naar het binnenvaartschip vanuit Antwerpen en het vervoer via pijpleiding. Het wegtransport is in

dit geval het duurste. Voor dit laatste transportmiddel werd de assumptie gemaakt dat de levering gebeurt door vier vrachtwagens. De tijd in de simulatie is immers discreet (dagen) en er kan maar één bestelling tegelijk geplaatst worden. Hierdoor kan een bestelhoeveelheid van dertig ton op lange termijn nooit voldoen aan een dagelijkse vraag van zeventig eenheden. Daarom werd bepaald dat een levering altijd bestaat uit vier vrachtwagens, terwijl dit in de realiteit ook twee, drie of vijf vrachtwagens kunnen zijn, aangezien de vraag stochastisch is.

Stel nu dat de levertijd-variabiliteit van alle transportmiddelen zou toenemen. Welke invloed heeft dit op de keuze van het transportmiddel? Tabel 9.11 geeft de totale logistieke kost weer indien de relatieve variatie zou verdubbelen. Aangezien de levertijd-variabiliteit van de het vrachtvervoer via pijpleiding gelijk is aan nul, wordt nu aangenomen de relatieve variatie voor dit transportmiddel gelijk is aan 0,2. De totale logistieke kost per transportmodi onder deze omstandigheden wordt weergegeven in tabel 9.11.

Tabel 9.11: Totale logistieke kost model 2 –scenario 1

<b>v=400 / h=15%</b>	<b>Wegtransport</b>	<b>Pijpleiding</b>	<b>Binnenvaart (Antwerpen)</b>	<b>Binnenvaart (Vlissingen)</b>
<b>TC (per eenheid)</b>	5,61	2,13	3,06	2,48
<b><math>\mu_T</math> (dag)</b>	0,21	4,33	5,85	5,88
<b><math>\sigma_T</math> (dag)</b>	0,28	0,87	0,85	1,37
<b><math>\sigma_T/\mu_T</math></b>	<b>1,35</b>	<b>0,20</b>	<b>0,15</b>	<b>0,23</b>
<b>Q (ton)</b>	120	1662	750	1000
<b>Transportkost</b>	€ 141.372	€ 53.676	€ 77.112	€ 62.496
<b>Bestelkost</b>	€ 2.100	€ 156	€ 340	€ 256
<b>Cyclusvoorraad</b>	€ 3.586	€ 49.861	€ 22.648	€ 30.938
<b>veiligheidsvoorraad</b>	€ 3.900	€ 720	€ 3.360	€ 4.800
<b>in-transit voorraad</b>	€ 662	€ 17.937	€ 24.233	€ 24.358
<b>Totale logistieke kost</b>	<b>€ 151.619</b>	<b>€ 122.349</b>	<b>€ 127.693</b>	<b>€ 122.847</b>
<b>P<sub>2</sub></b>	98,03%	98,00%	98,00%	98,02%

Uit tabel 9.11 blijkt dat totale logistieke kost van het wegtransport slechts is toegenomen met 0,20%. De totale logistieke kost van het vrachtvervoer via pijpleiding is toegenomen met 0,47%. De totale logistieke kost van de twee binnenvaart opties zijn respectievelijk gestegen met 0,77% en 2,92%. Verder blijkt ook dat de onderneming haar voorraad het best kan aanvullen door gebruik te maken van het vervoer via pijpleiding. De tweede en derde keuze gaan respectievelijk naar het binnenvaartschip vanuit Vlissingen en Antwerpen. Het wegtransport is in dit geval het opnieuw het duurste. Dit resultaat is toch een beetje opmerkelijk, aangezien we de relatieve variatie van het vervoer via pijpleiding ook hebben laten stijgen. Indien meer congesties optreden in het

wegvervoer of langere wachttijden zijn aan terminals en havens, blijkt de optie van een pijpleiding zeer geschikt voor bulkgoederen met een lage tot matige waarde.

Vervolgens wordt onderzocht onder welke omstandigheden het wegtransport interessant wordt. Tabel 9.12 geeft de totale logistieke kost weer, indien de gemiddelde levertijd van de drie alternatieve transportmodi met 50% wordt verhoogd en de standaardafwijking van de levertijd verdubbelen (i.v.m. het basismodel). De levertijd van het wegtransport wordt met 25% gereduceerd en de relatieve variatie wordt gelijk gesteld aan nul. In vergelijking met het basis model daalt de totale logistiek kost van het wegtransport slechts met 0,20%. De totale logistieke kost van het vrachtvervoer via pijpleiding, binnenvaart via Antwerpen en binnenvaart via Vlissingen stijgen respectievelijk met 8,01%, 10,82% en 12,31%. Dit is echter onvoldoende om het wegtransport aantrekkelijk te maken. In dit geval is het vrachtvervoer via pijpleiding opnieuw het meest interessant, gevolgd door respectievelijk de binnenvaart vanuit Vlissingen en Antwerpen.

Tabel 9.12: totale logistieke kost model 3 – scenario 1

<b>v=400 / h=15%</b>	<b>Wegtransport</b>	<b>Pijpleiding</b>	<b>Binnenvaart (Antwerpen)</b>	<b>Binnenvaart (Vlissingen)</b>
<b>TC (per eenheid)</b>	5,61	2,13	3,06	2,48
<b><math>\mu_T</math> (dag)</b>	0,1575	6,495	8,775	8,82
<b><math>\sigma_T</math> (dag)</b>	0,00	0,87	0,85	1,37
<b><math>\sigma_T/\mu_T</math></b>	<b>0,00</b>	<b>0,13</b>	<b>0,10</b>	<b>0,16</b>
<b>Q (ton)</b>	120	1662	750	1000
<b>Transportkost</b>	€ 141.372	€ 53.676	€ 77.112	€ 62.496
<b>Bestelkost</b>	€ 2.100	€ 156	€ 340	€ 256
<b>Cyclusvoorraad</b>	€ 3.867	€ 49.899	€ 22.487	€ 29.969
<b>veiligheidsvoorraad</b>	€ 3.000	€ 900	€ 4.140	€ 4.800
<b>in-transit voorraad</b>	€ 662	€ 26.905	€ 36.350	€ 36.537
<b>Totale logistieke kost</b>	<b>€ 151.001</b>	<b>€ 131.536</b>	<b>€ 140.429</b>	<b>€ 134.057</b>
<b>P<sub>2</sub></b>	98,05%	98,00%	98,03%	98,02%

Merk op dat de verandering in de totale logistieke kost nu gevoelig hoger ligt. Blijkbaar heeft de gemiddelde levertijd een significantie invloed in dit simulatie model. Meer zelfs, het effect van de gemiddelde levertijd op de totale logistieke kost is groter dan het effect van de levertijdvariabiliteit. Dit valt enerzijds te verklaren door het feit dat de relatieve variatie hier vrij laag is. De gemiddelde levertijd is veel groter in vergelijking met de standaardafwijking. Anderzijds is het aandeel van de 'in-transit' voorraad hier vrij groot en deze factor wordt enkel beïnvloed door de gemiddelde levertijd.

## Scenario 2

In het tweede scenario wordt de totale logistieke kost van de verschillende transportmodi berekend indien de bulkgoederen een matige tot hoge waarde hebben. De waarde per ton ligt nu op €600 en de voorraadkost bedraagt, in dit geval 20% van deze waarde. In tabel 9.13 wordt deze kost weergegeven voor de vier transportalternatieven. Hieruit blijkt dat de onderneming haar voorraad het best kan aanvullen door gebruik te maken van het wegtransport. De tweede en derde keuze gaan respectievelijk naar de binnenvaart vanuit Vlissingen en Antwerpen. Het vrachtvervoer via pijpleiding is in dit geval het minst aantrekkelijk.

Tabel 9.13: totale logistieke kost basismodel – scenario 2

<b>v=400 / h=15%</b>	<b>Wegtransport</b>	<b>Pijpleiding</b>	<b>Binnenvaart (Antwerpen)</b>	<b>Binnenvaart (Vlissingen)</b>
<b>TC (per eenheid)</b>	5,61	2,13	3,06	2,48
<b><math>\mu_T</math> (dag)</b>	0,21	4,33	5,85	5,88
<b><math>\sigma_T</math> (dag)</b>	0,14	0,00	0,42	0,69
<b><math>\sigma_T/\mu_T</math></b>	<b>0,67</b>	<b>0,00</b>	<b>0,07</b>	<b>0,12</b>
<b>Q (ton)</b>	120	1662	750	1000
<b>Transportkost</b>	€ 141.372	€ 53.676	€ 77.112	€ 62.496
<b>Bestelkost</b>	€ 2.100	€ 156	€ 340	€ 256
<b>Cyclusvoorraad</b>	€ 7.294	€ 99.548	€ 45.269	€ 60.184
<b>veiligheidsvoorraad</b>	€ 6.720	€ 480	€ 4.800	€ 4.320
<b>in-transit voorraad</b>	€ 1.662	€ 35.874	€ 48.467	€ 48.715
<b>Totale logistieke kost</b>	<b>€ 159.148</b>	<b>€ 189.734</b>	<b>€ 175.988</b>	<b>€ 175.970</b>
<b>P<sub>2</sub></b>	98,07%	98,00%	98,00%	98,03%

Vervolgens wordt opnieuw een tweede model opgesteld, waarbij de relatieve variatie wordt verdubbeld. De relatieve variatie van het transport via pijpleiding wordt aangepast naar 0,2. De totale logistieke kost per transportmodus onder deze omstandigheden wordt weergegeven in tabel 9.14. Hieruit blijkt dat de toename van de totale logistieke kost van het wegtransport opnieuw vrij klein is. Deze kost stijgt amper met 0,67%. De totale logistieke kost van het vrachtvervoer via pijpleiding is toegenomen met 0,60%. De totale logistieke kost van de twee binnenvaart opties zijn respectievelijk gestegen met 1,11% en 3,96%. Verder blijkt ook dat de keuze van het transportmiddel niet is veranderd en dat de onderneming haar voorraad nog altijd het best kan aanvullen door gebruik te maken van het wegtransport. De tweede en derde keuze gaan

respectievelijk naar het binnenvaartschip vanuit Vlissingen en Antwerpen. Het transport via pijpleiding is ook hier het duurst.

Tabel 9.14: totale logistieke kost model 2 – scenario 2

<b>v=600 / h=20%</b>	<b>Wegtransport</b>	<b>Pijpleiding</b>	<b>Binnenvaart (Antwerpen)</b>	<b>Binnenvaart (Vlissingen)</b>
<b>TC (per eenheid)</b>	5,61	2,13	3,06	2,48
<b><math>\mu_T</math> (dag)</b>	0,21	4,33	5,85	5,88
<b><math>\sigma_T</math> (dag)</b>	0,28	0,87	0,85	1,37
<b><math>\sigma_T/\mu_T</math></b>	<b>1,35</b>	<b>0,20</b>	<b>0,15</b>	<b>0,23</b>
<b>Q (ton)</b>	120	1662	750	1000
<b>Transportkost</b>	€ 141.372	€ 53.676	€ 77.112	€ 62.496
<b>Bestelkost</b>	€ 2.100	€ 156	€ 340	€ 256
<b>Cyclusvoorraad</b>	€ 7.171	€ 99.721	€ 45.295	€ 61.876
<b>veiligheidsvoorraad</b>	€ 7.800	€ 1.440	€ 6.720	€ 9.600
<b>in-transit voorraad</b>	€ 1.764	€ 35.874	€ 48.467	€ 48.715
<b>Totale logistieke kost</b>	<b>€ 160.207</b>	<b>€ 190.867</b>	<b>€ 177.934</b>	<b>€ 182.942</b>
<b>P<sub>2</sub></b>	98,03%	98,00%	98,00%	98,02%

Tabel 9.15: totale logistieke kost model 3 – scenario 2

<b>v=600 / h=20%</b>	<b>Wegtransport</b>	<b>Pijpleiding</b>	<b>Binnenvaart (Antwerpen)</b>	<b>Binnenvaart (Vlissingen)</b>
<b>TC (per eenheid)</b>	5,61	2,13	3,06	2,48
<b><math>\mu_T</math> (dag)</b>	0,63	3,2475	4,3875	4,41
<b><math>\sigma_T</math> (dag)</b>	0,42	0,00	0,21	0,34
<b><math>\sigma_T/\mu_T</math></b>	<b>0,67</b>	<b>0,00</b>	<b>0,05</b>	<b>0,08</b>
<b>Q (ton)</b>	120	1662	750	1000
<b>Transportkost</b>	€ 141.372	€ 53.676	€ 77.112	€ 62.496
<b>Bestelkost</b>	€ 2.100	€ 156	€ 340	€ 256
<b>Cyclusvoorraad</b>	€ 7.388	€ 99.947	€ 45.035	€ 60.044
<b>veiligheidsvoorraad</b>	€ 8.280	€ 0	€ 3.720	€ 2.040
<b>in-transit voorraad</b>	€ 5.292	€ 26.905	€ 36.350	€ 36.537
<b>Totale logistieke kost</b>	<b>€ 164.432</b>	<b>€ 180.684</b>	<b>€ 162.557</b>	<b>€ 161.372</b>
<b>P<sub>2</sub></b>	98,01%	98,01%	98,03%	98,02%

Tenslotte wordt onderzocht onder welke omstandigheden de drie alternatieven vervoersmiddelen interessant worden. Stel dat de zowel de gemiddelde levertijd als de relatieve variatie van het

wegtransport zou verdrievoudigen. Bij de drie andere transportmodi wordt de gemiddelde levertijd en de standaardafwijking met respectievelijk 25% en 50% verlaagd. De resultaten van deze wijziging worden weergegeven in tabel 9.15. In vergelijking met het basis model stijgt de totale logistieke kost van het wegtransport met 3,32%. De totale logistieke kost van het vrachtvervoer via pijpleiding, binnenvaart via Antwerpen en binnenvaart via Vlissingen dalen respectievelijk met 4,77%, 7,36% en 8,30%. Nu geldt hier het omgekeerde als in scenario één. De veranderingen van de levertijd-parameters zijn onvoldoende om de alternatieve transportmodi aantrekkelijk te maken. In dit geval is het wegtransport opnieuw het meest interessant, gevolgd door de binnenvaart. Het transport via pijpleiding is nu het minst aantrekkelijk. Merk op dat de gemiddelde levertijd opnieuw meer invloed heeft op de totale logistiek dan de levertijd-variabiliteit.

De resultaten van scenario één staan in contrast met de bevindingen van Wiegmans (2010). Hij gaf immers aan dat bedrijven veelal opteren voor het wegtransport, ondanks de hogere transportkost. Uit deze analyse blijkt echter dat rekening moet gehouden worden met de totale logistiek kost bij het bepalen van de optimale transportmodus. In het tweede scenario is het wegtransport, ondanks zijn hogere transportkost wel de beste keuze. Zelfs als de levertijd-parameters in het voordeel van de alternatieve transportmodi zijn, blijft het transport via wegvervoer het aantrekkelijkst. Dit is wel in overeenstemming met de conclusies van Wiegmans (2010).

Uit deze analyse blijkt dus dat de invloed van de onzekerheid van de levertijd eerder beperkt is en dat andere factoren zoals de waarde van de goederen en de gemiddelde levertijd in dit geval meer invloed hebben op de totale voorraadkost.





## 10. Interview H. Essers

Het laatste hoofdstuk van deze eindverhandeling bestaat uit een interview. De bedoeling van dit interview is om de verschillende stellingen, bevindingen, hypothesen en conclusies van de literatuurstudie te vergelijken met de situatie in de praktijk. Hiervoor heb ik Dhr. Salvatore Napolitano geïnterviewd die *Business Unit Manager Logistics* is bij H. Essers in Genk. Dit gesprek was zeer leerrijk en er kwamen buiten de kernbegrippen van de literatuurstudie ook verschillende andere zaken aan bod die interessant waren. Hieronder wordt een samenvatting gegeven van het interview.

### ***Hoe zit het met de onzekerheid van levertijd in de praktijk? Hoeveel percent van de bestellingen komt binnen de overeengekomen levertijd aan bij de klant?***

Ten eerste is het belangrijk door welke partij de onzekerheid van levertijd wordt bekeken. *Essers* bekijkt dit begrip vanuit het standpunt van transporteur en opslagbeheerder. De klant langs de andere kant, kan hier een heel andere kijk op hebben. Ten tweede is de onzekerheid van levertijd altijd al belangrijk geweest binnen de logistieke sector, maar is het belang van deze onzekerheid de laatste jaren nog toegenomen. Als logistieke dienstverlener zie je hoe de markt gedurende de laatste vijf tot tien jaar is veranderd. Vroeger werd een leveringsperformance (servicegraad) van 95% of lager aanvaard. Nu wordt een leverings-performance van 97 of 98% bijna niet meer aanvaard of wordt hier toch hard over gediscuteerd.

### ***Wordt de klant gevoeliger voor de onzekerheid van de levertijd?***

Ja, maar dit heeft ook deels te maken met verschuivingen in de maatschappij en het kritischer worden van de klant. Ze willen de leveringen ook zelf kunnen opvolgen. Dit is nu ook mogelijk dankzij allerlei internetapplicaties en technologische innovaties (bv. Track & trace). Bij *Essers* heeft elke pallet een uniek nummer en kan men op elk moment controleren waar de pallet zich bevindt en wat de verwachte levertijd is. Het is voor *Essers* (en de klant) dus mogelijk om hun eigen paletten 24u per dag op te volgen. Stipte levertijden worden zeker geëist door klanten die op dat moment, op die dag, tussen die bepaalde uren open zijn. Deze technologie (die eigenlijk niks toevoegt aan het product) wordt dus geëist door de markt. Daarnaast is het voor de transporteur belangrijk om zich met deze nieuwe technologie te onderscheiden van de rest, zodat je een meerwaarde kunt bieden aan de klant. Verder zijn er ook klanten die zeer kleine bestellingen plaatsen. Ziekenhuizen bestellen bijvoorbeeld een nieuwe doos, nog niet eens een volledige pallet, als ze vandaag weten dat ze morgen zonder vallen. De ziekenhuizen hebben immers een 24u levergarantie, maar als er dan ergens iets misgaat in de ketting zit het ziekenhuis zonder voorraad.

***Gebeurt dit dan regelmatig dat u deze 24u levertijd niet kan waarmaken?***

Nee, maar hier moet wel een kleine nuance worden gemaakt tussen 'ons' en de 'markt'. Wij zitten op 97-98%, maar het is een heel ander gegeven wat de markt doet. *Hoe zit het dan met de markt?* Die zit lager. Welk leveringsperformance hier heerst, is moeilijk te schatten, maar die zal waarschijnlijk liggen rond de 90%.

***Hoe zit het met de betrouwbaarheid van de levertijden voor de verschillende transportmodi? Is het wegvervoer werkelijk betrouwbaarder dan de binnenvaart en/of spoorvervoer?***

De betrouwbaarheid van een transportmodus is natuurlijk ook afstand gerelateerd. Kijk bijvoorbeeld naar het zeetransport. Dit transportmiddel wordt gebruikt voor zeer lange afstanden. In vergelijking met vroeger is de levertijd van dit transportmiddel nu al een stuk beter in te schatten, dit mede dankzij nieuwe technologie. Toch is heeft het zeetransport misschien de grootste onzekerheid wat betreft levertijden. Sommige zaken zoals storm, stroming, (haven) kapiteins die moeilijkheden veroorzaken, wachttijden aan de kade veroorzaken onbetrouwbare levertijden. Daarnaast is er het spoorvervoer. Dit transportmiddel is populair bij middellange afstanden over het vaste land. Het spoorvervoer gaat echter door diverse landen en elk land heeft zijn eigen politiek wat betreft spoorvervoer. Ook hier is de betrouwbaarheid van de levertijd beter als vroeger, maar nog altijd niet 'exact'. Nogmaals de afgelegde weg speelt een belangrijke rol. Uit ervaring weet ik dat er een positief verband is tussen de afgelegde weg en de onzekerheid van de levertijd. Een schip van Antwerpen naar de VS is veel langer onderweg als een trein van België naar Moldavië en die is op zijn beurt weer langer onderweg dan een vrachtwagen van Genk naar Noord-Frankrijk. Er is voor het containership en de goederentrein dus ook meer tijd dat er iets fout kan lopen. Wegvervoer heeft dus inderdaad de hoogste betrouwbaarheid, maar is relatief ook het kortste. Het wegtransport is eigenlijk 'binnen Europa' en hier wordt een onderscheid gemaakt tussen 24/48/72u leveringen. Bij 24u leveringen zitten we aan een leveringsperformance van bijna 100%, bij 48u leveringen ligt de leveringsperformance iets lager en bij 72u leveringen zal die nog iets minder zijn.

***Zorgen factoren zoals slechte uitwisseling van informatie, weersveranderingen, verkeersopstoppingen, congesties dan niet voor problemen bij het wegtransport?***

Toch wel. Er zijn een heel aantal zaken waar de klant geen rekening mee houdt als hij een bestelling plaatst. In de winter als het sneeuwt of vriest kan de klant wel een levergarantie hebben van 24u, maar probeer dit dan maar eens waar te maken. De klant bestelt dus hij verwacht binnen

de 24u zijn levering. Maar hij houdt vaak geen rekening met sneeuw, vorst, hagel, file of accidenten.

***De onzekerheid van de levertijd bij het vrachtvervoer is dus lager dan de onzekerheid van de levertijd bij andere transportmodi. Heeft dit een invloed op de keuze van transportmiddel door bedrijven?***

Die stelling gaat absoluut op, maar tegelijk wil ik deze stelling ook nuanceren. Het is logisch dat een vrachtwagen die 30 paletten vervoerd en die een bepaalde afstand moet rijden vrij accuraat is. Met een boot is dit heel anders. In principe wordt de keuze van het transportmiddel eerder bepaald door de afstand en in hoeverre het traject is geoptimaliseerd. Is het traject kort en geoptimaliseerd, dan is de levertijd onzekerheid waarschijnlijk klein. Is het traject lang en niet geoptimaliseerd, dan is er waarschijnlijk een grote levertijd onzekerheid. De betrouwbaarheid van de levertijd heeft dus eerder indirect een invloed op de keuze van het transportmiddel. Het is pas mogelijk om multimodaal te gaan als de afstand groot genoeg is. *Essers* heeft bijvoorbeeld een trein tussen België en Moldavië en een trein tussen België en Italië. Dat zijn rendabele afstanden om bijvoorbeeld het vracht/trein vervoer te combineren. Binnenvaart kan ook een goede keuze zijn als het traject voldoende geoptimaliseerd is. Goederen die binnenkomen in Antwerpen gaan met de binnenvaart tot in Meerhout, daar is een terminal. Dit soort optimalisaties zijn er wel voor de binnenvaart, maar andere trajecten zijn veelal niet rendabel.

***Zorgt levertijdvariabiliteit voor fluctuaties van het voorraadniveau, in het bijzonder de veiligheidsvoorraad? Gaan ondernemingen een hogere veiligheidsvoorraad aanhouden als er meer levertijdvariabiliteit is?***

Dit klopt voor een stuk, maar ligt ook aan de leveringsstrategie van het bedrijf. Ford Genk volgt bijvoorbeeld het 'just-in-time' principe. Dit zijn bedrijven die letterlijk stilvallen als er vertragingen optreden in het transport. Alom wordt aangenomen dat men met het 'just-in-time' principe geld wint en dit zal ook wel zo zijn in het geval van Ford Genk, maar het kan ook veel geld kosten als er zaken mislopen met de leveringen. Persoonlijk ben ik ervan overtuigd dat er altijd een zekere buffer moet worden aangehouden, zodat men toch een dag of twee verder kan. Op kritische onderdelen mag deze buffer zelfs hoger zijn, zodat men minstens één week verder kan, moest er iets mislopen. Maar het klopt dat men meer voorraad nodig heeft als gevolg van de onzekerheid van de levertijd. De vraag die elke onderneming zichzelf moet stellen is natuurlijk: wil men investeren in levertijden die 100% betrouwbaar zijn of wil men investeren in een bepaalde buffervoorraad?

***Zorgt de levertijdvariabiliteit voor fluctuaties van de bestelhoeveelheid?***

Dit kan ik niet onmiddellijk bevestigen en deze stelling is in de praktijk misschien minder relevant. De bestelhoeveelheid is naar mijn mening eerder afhankelijk van het verbruik (vraag) van het product. Het uitgangspunt dat hier gebruikt wordt is dat er een stabiel verbruik is en dat enkel het transport een invloed heeft op de bestelhoeveelheid. Ik kan u bevestigen dat wij bij sommige klanten de ene week één vrachtwagen leveren en de week daarop twee of zelfs drie vrachtwagens leveren, terwijl onze levertijd toch gerespecteerd wordt.

***In sommige studies is enkel de levertijd variabel en de vraag constant. Dit wordt gedaan om het 'zuivere' effect van de levertijd variabiliteit te onderzoeken. Is het dan voorbarig om conclusies van zulke studies te veralgemenen?***

Dat de resultaten van zulke studies niet correct zijn, wil ik zeker niet beweren. Ze zijn alleszins niet realistisch genoeg. In werkelijkheid wordt het verkoopcijfer in een bepaalde periode van het jaar bijvoorbeeld opgevoerd door middel van kortingen en dergelijke om toch maar het gewenste *sales* niveau van die periode te halen. Dit is natuurlijk interessant voor de verkoopmanagers, maar het heeft wel belangrijke implicaties voor de logistieke keten, die als het ware 'ontploft'. De bestelhoeveelheden verdubbelen misschien, maar de logistieke dienstverlener moet ook alles tijdig krijgen geleverd.

***Stel dat de levertijd toch langer is dan verwacht en de klant heeft hierdoor schade geleden (bijvoorbeeld lost sales). Wie draait er in dit geval op voor deze kost?***

Dat ligt aan het contract dat gebruikt wordt en is natuurlijk afhankelijk van klant tot klant. Indien het gaat om kleine bestellingen (bv. één pallet) heeft de klant vaak geen contract en heeft hij dus weinig om op te staan. Bij grote klanten zijn er wel contracten en afspraken rond de verwachte levertijd. Hier hebben wij de 24/48/72u levercontracten, afhankelijk van de afstand en eisen van de klant. De financiële consequenties van laattijdige leveringen, ook wel 'consequential losses' genoemd, worden uitgesloten en worden dus niet vergoed. Deze 'losses' zijn ook moeilijk berekenbaar. Stel dat *Essers* te laat is met een levering van een nieuw product in Italië. Wat is de 'consequential loss' die hieraan verbonden is? Is heel de potentiële markt dan verloren?

**De reden om de leveringen stipt uit te voeren is dus niet om kosten te vermijden, maar om de service naar de klant zo hoog mogelijk te houden?**

Inderdaad, zoals eerder gezegd heeft *Essers* een vrij hoge leveringsperformance en dragen zij dit ook hoog in het vaandel.

**Gemiddelde levertijd vs. levertijd variabiliteit: welke zou u het liefst reduceren?**

De levertijd variabiliteit, want de levertijden zelf verminderen gaat bijna niet meer. Er zijn snelheidsbeperkingen voor vrachtwagens en afstanden die overbrugd moeten worden. De levertijdvariabiliteit is bij *Essers* kleiner in vergelijking met de markt, maar standaarden kunnen natuurlijk altijd worden verbeterd.

***Kan Essers klanten winnen (verliezen) indien zij een betere (slechtere) levertijd betrouwbaarheid hebben? Is de levertijd betrouwbaarheid een factor die bepalend is voor de klant?***

Absoluut. Dit is namelijk een van de redenen waarom *Essers* duurder is dan andere logistieke dienstverleners. Er is absoluut een onderscheid in kwaliteit. Kwaliteit vertaalt zich wel niet in beter kunnen rijden, maar wel in de technologie die erachter zit.

**In de literatuur spreekt men soms over het splitsen van bestellingen/leveringen om de gevolgen van levertijdvariabiliteit te omzeilen. Gebeurt dit in de praktijk?**

Dit gebeurt niet veel in de praktijk. De meeste ondernemingen trachten juist zoveel mogelijk te consolideren. Het komt wel eens voor in de Farmaceutische of dure technologie sector, waar het gaat om 'high-value' producten. Hier kan het wel eens voorkomen dat een bestelling wordt gesplit over verschillende vrachtwagens die afzonderlijk worden verzonden. *En het splitsen van de bestelling bij verschillende leveranciers?* Hier hetzelfde verhaal. Dit wordt weinig gedaan in de praktijk en komt enkel voor bij 'high-value' producten.

***Hoe zit het met de Back-up Levering, eventueel via een alternatieve transportmodus. Een onderneming bestelt bijvoorbeeld een reguliere levering via zeevaart, maar opteert voor een back-up via luchtvaart indien blijkt dat de levering te laat gaat zijn. Gebeurt dit in de praktijk?***

Zoiets gebeurt wel eens, maar zeker niet dagelijks. Als het gebeurt, is dit uitdrukkelijk op vraag van de klant. Het is niet de logistieke provider die zoiets beslist. Wat wel gebeurt, is een *Express delivery* met het vliegtuig. Men weet dat een levering naar bijvoorbeeld Spanje onder een 72u contract valt en dat een vliegtuig binnen een termijn van 24u kan leveren. De enigen die echt gebruik maken van een back-up levering is de automobielsector, omdat zij vaak met het 'just-in-time' principe of kleine voorraden werken. De automobielsector heeft ook enorme fabrieken. Ze kennen de kosten verbonden aan een productie stilval en willen dit natuurlijk ten alle kosten vermijden.

***Hebt u nog iets toe te voegen aan dit interview? Zijn er nog suggesties of opmerkingen die u zeker kwijt wil?***

Ja, er zijn nog enkele zaken die het vermelden waard zijn. Ten eerste wil ik nog even inpikken op het aspect van technologie en informatiesystemen. Vroeger was alles meer beheersbaar. Het kleinste magazijn is nu bij wijze van spreken 50 000m<sup>2</sup>. Er is geen enkele persoon die nog een pallet terug vindt, enkel de computer weet waar de betreffende pallet staat. Bij grote bedrijven is het vaak zelfs geen persoon meer die bestelt, maar een computer die deze functie uitvoert. De software geeft aan wanneer de voorraad van een bepaald artikel onder het minimum gaat en die een bestelhoeveelheid doorgeeft. Veel grote bedrijven werken met SPR, met gevolg dat men hoogopgeleid moet zijn om dit programma goed te kunnen instellen. Wat zijn de gevolgen van een foute instelling? Wie is er zeker dat het computerprogramma nog behoorlijk werkt na verloop van tijd? De kosten van dergelijke zaken kunnen hoog oplopen en hebben ook een invloed op bestelhoeveelheid en het leverpatroon van de logistieke provider. Daarom moet er altijd een goede combinatie zijn tussen technologie en gezond verstand. Ten tweede wil ik nog iets meer vertellen over de evoluties van de markt. Tegenwoordig is het mogelijk om alles te bestellen via internet. Vroeger kocht men een boek in de standaardboekhandel en moest de leverancier één grote bestelling leveren. Nu moet hij veel kleine leveringen doen bij individuele particulieren thuis, maar niemand staat er bij stil dat hier ook een hele logistieke keten aan verbonden is.

**Zorgt dit niet voor extra druk op de logistieke sector?**

Jawel, maar hier valt ook veel geld mee te verdienen. Een onderneming hoeft immers geen warehouse te plaatsen, minder personeel aan te werven, enz. Bijgevolg blijft er meer geld over voor de logistieke dienstverlener. Wat in mijn ogen een zeer belangrijk aspect gaat worden naar de toekomst toe is: hoe evalueert de markt en wat zijn de implicaties voor de logistieke sector. Uiteindelijk doen wij gewoon wat de eindklant vraagt.

## Conclusies

In deze eindverhandeling werd de invloed van de onzekerheid van de levertijd op het voorraadbeheer, de totale logistieke kost en op de keuze van het transportmiddel onderzocht. Uit de literatuurstudie bleek dat de conclusies van de studies zeker niet overal gelijklopen, maar ze toch wel enkele gezamenlijke resultaten bevatten. Over het algemeen is er een consensus dat de onzekerheid van de levertijd een negatieve invloed heeft op het voorraadbeheer en de totale logistieke kost. Het is mogelijk hier enkele bevindingen rond te formuleren.

Ten eerste moet rekening worden gehouden met de levertijd-variabiliteit bij het bepalen van de optimale voorraadpolitiek. Ten tweede zorgt een stijging van de levertijd-onzekerheid of levertijd-variabiliteit enerzijds voor een stijging van de voorraad- en logistieke kosten en anderzijds voor een stijging van de bestelhoeveelheid en de veiligheidsvoorraad. Ten derde zorgt de levertijd-variabiliteit voor een daling van het serviceniveau. Ten vierde heeft de gemiddelde levertijd minder geen invloed op de optimale voorraadkost en de optimale bestelhoeveelheid. De gemiddelde levertijd heeft wel een invloed op het bestelpunt en de veiligheidsvoorraad, hoewel de impact van de gemiddelde levertijd op deze laatste factor minder groot is als de levertijd-variabiliteit.

Verder beïnvloedt de onzekerheid van de levertijd het voorraadsysteem in een toeleveringsketen door een verandering van de variatie van de bestelhoeveelheden. Een stijging van de levertijd-variantie zorgt ervoor dat het verschil tussen opeenvolgende bestelhoeveelheden groter wordt. Een ander belangrijk effect van de levertijd-variantie is het feit dat het fluctuaties van het voorraadniveau veroorzaakt. Een stijging van de levertijd-variantie kan zorgen voor een simultane stijging van zowel het voorraadniveau als het aantal stockbreuken.

Verschillende van deze theoretische stellingen werden vervolgens onderzocht aan de hand van een praktijkstudie. Hieruit bleek dat de levertijd-variabiliteit inderdaad zorgt voor een stijging van de voorraad- en de totale logistieke kost. Daarnaast klopt het dat ondernemingen een grotere veiligheidsvoorraad gaan aanhouden als er veel levertijd-variabiliteit aanwezig is. Uit de praktijkstudie bleek ook dat de bestelhoeveelheid stijgt als gevolg van een hogere levertijd-onzekerheid. Deze stelling kon echter niet bevestigd worden door M. Napolitano. Volgens hem is de fluctuatie van de bestelhoeveelheid in de praktijk eerder het gevolg van een variabele vraag.

In de praktijkstudie werd ook opgemerkt dat het aantal eenheden tekort per aanvulcyclus stijgt, indien de levertijd-variabiliteit toeneemt. Dit zorgt inderdaad ook voor een lager serviceniveau. Uit de praktijkstudie bleek ook dat de levertijd-variabiliteit meer invloed heeft op de totale logistieke kost dan de gemiddelde levertijd. Hieruit blijkt dus dat ondernemingen zich beter kunnen focussen op het reduceren van de levertijd-variabiliteit dan de gemiddelde levertijd. Dit werd ook bevestigd door M. Napolitano. Enkel in het de laatste simulatie was de invloed van de gemiddelde levertijd



groter dan die van de levertijd-variabiliteit. Dit was wel vooral te danken aan het grootte aandeel van de 'in-transit' voorraadkost.

In de literatuurstudie werd ook aandacht besteed aan een studie van Chopra et al. (2004). Hierin stelde de auteurs dat voor  $P_2$ -serviceniveaus rond de 97-99%, een verhoging van de levertijd-variabiliteit zorgt voor een *verlaging* van de nodige veiligheidsvoorraad. Deze stelling kan op basis van het afgenomen interview en de uitgevoerde praktijkstudies echter niet bevestigd worden. In de simulatie van het *buyer-vendor* systeem werd ook bevestigd dat de levertijd-variabiliteit fluctuaties op het voorraadniveau veroorzaakt.

De praktijkstudie geeft ook nog enkele andere interessante inzichten in verband met de onzekerheid van levertijd en het voorraadbeheer. Ten eerste geeft de Gamma verdeling een realistischere weergave van de verdeling van de vraag gedurende de levertijd, indien de spreiding van de levertijd groot. Deze verdeling heeft namelijk een staart naar rechts, die deze onzekerheid vermoedelijk beter weergeeft. Bijgevolg onderschat de symmetrische normaalverdeling de nodige veiligheidsvoorraad, waardoor het geleverde serviceniveau in de praktijk aanzienlijk lager kan liggen. Ten tweede blijkt dat de 'distributie-vrije' benadering een vrij goede, maar robuuste, oplossing kan bieden indien enkel het gemiddelde en de variantie van de vraag tijdens de levertijd gekend zijn.

Over de invloed van de onzekerheid van de levertijd op de keuze van het transportmiddel kan het volgende gezegd worden. Uit de literatuurstudie bleek dat ondernemingen betrouwbare levertijden appreciëren en bereid zijn om een hogere prijs te betalen voor een transportmiddel met een lagere levertijd-onzekerheid. In een studie van Wiegmans (2010) wordt een afweging gemaakt tussen de betrouwbaarheid en de kost van verschillende transportmodi. Hieruit blijkt dat de betrouwbaarheid van het spoorvervoer en binnenvaart gevoelig lager liggen dan de betrouwbaarheid van het wegvervoer. Het lagere kost-betrouwbaarheid profiel van het spoorvervoer en de binnenvaart wegen volgens de auteur niet op tegen het hogere kost-betrouwbaarheid profiel van het wegvervoer. Vanuit dit standpunt - en het feit dat ondernemingen bereid zijn om meer te betalen voor de betrouwbaarheid van een transportmiddel- is het wegtransport bijgevolg een 'logische' keuze. Tot slot geeft Wiegmans (2010) aan dat het huidig beleid zich moet richten op maatregelen die de betrouwbaarheid van de binnenvaart en spoorvervoer verhogen en de kosten verlagen, om deze transportmiddelen aantrekkelijker te maken voor ondernemingen en verladers.

In de praktijkstudie werd de invloed van de levertijd-onzekerheid op de keuze van het transportmiddel bekeken vanuit het perspectief van de totale logistieke kost. Indien de goederen een lage tot matige waarde hebben, zorgt een stijging van de levertijd-variantie van de alternatieve transportmodi niet voor een omschakeling naar het wegtransport. Merk op dat dit niet in overeenstemming is met de conclusies van Wiegmans (2010). Hebben de goederen echter een matige tot hoge waarden, dan is het wegtransport aantrekkelijker. Indien de betrouwbaarheid van het wegvervoer sterk zou afnemen en de betrouwbaarheid van de alternatieve transportmodi zou

toenemen, blijft het wegtransport nog steeds de beste keuze. Dit is wel in overeenstemming met de conclusies van Wiegmans (2010). Uit de praktijkstudie blijkt dus dat de keuze van het transportmiddel sterk wordt beïnvloed door de waarde van de vervoerde goederen en de gemiddelde levertermijn van de transportmodi en in mindere mate door de levertijd-onzekerheid.

M. Napolitano geeft ook enkele interessante inzichten in de betrouwbaarheid van de levertijden de keuze van het transportmiddel. Ten eerste haalt hij aan dat de betrouwbaarheid van een transportmodus afstand gerelateerd is. De betrouwbaarheid van het vrachtvervoer is volgens hem inderdaad groter dan de betrouwbaarheid van de binnenvaart en het vrachtvervoer per spoor. De stelling dat deze betrouwbaarheid een directe invloed heeft op de keuze van het transportmiddel, nuanceert hij wel. Volgens M. Napolitano geeft aan dat de keuze van het transportmiddel eerder bepaald wordt door de afstand en in hoeverre het traject 'geoptimaliseerd' is. Is het traject kort en geoptimaliseerd, dan is de levertijd-onzekerheid waarschijnlijk klein. De onzekerheid van de levertijd heeft dus eerder een indirecte invloed op de keuze van het transportmiddel. De keuze van het transportmiddel wordt in de eerste plaats beïnvloed door de afweging tussen transport- en voorraadkosten en in mindere mate door de betrouwbaarheid van de levertijd. Wat betreft de invloed van de onzekerheid van de levertijd op de keuze van het transportmiddel, kan er geen eenduidig antwoord worden geformuleerd. Wel kan er besloten worden dat bedrijven betrouwbare levertijden appreciëren en bereid zijn om hier meer voor te betalen, maar dat de afweging van de totale logistiek kost –afweging tussen voorraad- en transportkost- toch het zwaarst doorweegt in de uiteindelijke beslissing.

Ten slotte werd in de literatuur ook aandacht besteedt hoe ondernemingen de negatieve gevolgen van de levertijd-onzekerheid kunnen omzeilen. Dit kan gebeuren door de leveringen op te splitsen in verschillende verzendingen. Het resultaat is een lagere variantie van de aankomsttijden. Een andere mogelijk bestaat erin om gebruikt te maken van een flexibele back-up levering om de verschillen in kosten en prestaties van verschillende transportmodi of leveranciers te benutten. Deze methoden worden volgens M. Napolitano in de praktijk echter weinig toegepast. Enkel als het gaat om extreme 'high-value' producten, overwegen bedrijven zulke praktijken. Veelal wordt er in de realiteit gestreefd naar consolidatie.



## Lijst van geraadpleegde werken

- Bagchi, U., Hayya, J.C., & Ord., J.K. (1984). 'Modelling demand during lead time.' *Decision Sciences*, Vol. 15, pp. 157-176.
- Bagchi, U., Hayya, J.C., & Chu, C.H. (1986). 'The effect of lead time variability: The case of independent demand.' *Journal of Operations Management*, Vol. 6, No. 2, pp. 159-177.
- Ballou, R.H. (1999). '*Business Logistisc Management*.' 4the edition.
- Banerjee, A. (1986). 'On 'a quantity discount pricing model to increase vendor profits.' *Management Science*, Vol. 32, No. 11, pp. 1513-1517.
- Baumol, W.J., & Vinod, H.D. (1970). 'An inventory theoretic model of freight transport demand.' *Management Science*, Vol. 16, No. 7, pp. 413-421.
- Blauwens, G., Vandale, N., Van de Voorde, E., Vernimmen, B., & Witlox, F. (2006). 'Towards a modal shift in freight transport? A business logistics analysis of some policy measures.' *Transport Review*, Vol. 26, No., pp. 239-261.
- Blauwens, G., De Baere, P., & Van de Voorde, E. (2008). '*Transport Economics*.' 3<sup>nd</sup> ed. Antwerpen: Uitgeverij De Boeck nv.
- Benson, D., Bugg, R., & Whithead, G. (1994). '*Transport and Logistics*.' 1<sup>ste</sup> ed., Hertfordshire: Woodhead-Faulkner.
- Beullens, P., & Janssens, G.K. (2011) 'Holding cost under push or pull conditions – The impact of the anchor point.' *European Journal of Operational Research*, Vol. 215, pp. 115-125.
- Chiang, C. (2001). 'Order splitting under periodic review inventory systems.' *International Journal Production Economics*, Vol. 70, pp. 67-76.
- Chopra, S., Reinhardt, G., & Dada, M. (2004). 'The effect of lead time uncertainty on safety stock.' *Decision Sciences*, Vol. 35 No. 1, pp. 1-24.
- Danielis, R., Marcucci, E., & Rotaris, L. (2005). 'Logistics manager's stated preferences for freight service attributes.' *Transportation Research*, Vol. 51, pp. 201-2115.
- Dullaert, W., Vernimmen, B., Aghezzaf, E.H., & Raa, B. (2007). 'Revisiting service-level measurement for an inventory system with different transport modes.' *Transport Reviews*, Vol. 27, No. 3, pp. 273-283.
- Evers, P.T., Harper, D.V., & Needham, P.M. (1996). 'The determinants of Shipper Perceptions of modes.' *Transportation Journal*, Vol. 36, No. 2, pp. 13-25.

- Fowkes et al. (2004). 'How highly does the freight transport industry value journey time reliability – and for what reasons?' Universities of Leeds: Sheffield and York
- Gallego, G. (1990). 'A minmax distribution free procedure for the (Q,r) inventory model.' *Operations Research Letters*, Vol. 11, pp. 55-60.
- Gallego, G., & Moon, I. (1993). 'The distribution free newsboy problem: review and extensions.' *Operation Research Society*, Vol. 44, No. 8, pp. 825-834.
- Geunes, J., & Zeng, A.Z. (2001). 'Impacts of inventory shortage policies on transportation requirements in two-stage distributions.' *European Journal of Operational Research*, Vol. 129, pp.290-310.
- Goyal, S.K. (1988). 'A joint economic lot-size model for purchaser and vendor: A comment' *Decision Sciences*, Vol. 19, pp. 236-241.
- Grubbström, R.W. (1980). 'A principle for determining the correct capital costs of work-in-progress and inventory.' *International journal of production research*, Vol. 18, No. 2, pp. 259-271.
- He, J.X., Kim, J.G., & Hayya, J.C. (2005). 'The cost of lead-time variability: the case of the exponential distribution.' *International Journal of Production Economics*, Vol. 97, pp. 137-142.
- He, J.X. (2009). 'The impact of stochastic lead time: the mean or the variance.' *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, Vol. 2
- He, J.X., Xu, X., & Hayya, J.C. (2011). 'The effect of lead-time on the supply chain: the mean versus the variance.' *International Journal of Information Technology & Decision Making*, Vol. 10, No. 1, pp. 175-185.
- He, J.X., Harrison, T.P., & Hayya, J.C. (2011). 'The impact of stochastic lead time reduction on inventory cost under order crossover.' *European Journal of Operational Research*, Vol. 211, pp. 274-281.
- Heydari, J., & Kazemzadeh, R.B., & Chaharsooghi, K.S. (2009). 'A study of lead time variation impact on supply chain performance.' *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 40, pp. 1206-1215.
- Heydari, J., & Chaharsooghi, K.S. (2010). 'LT variance or LT mean reduction in supply chain management: which one has a higher impact on SC performance?' *International Journal of Production Economics*, Vol. 124, pp. 475-481.
- Kim, J.G., Sun, D., He, J.X., & Hayya, J.C. (2004). 'The (s,q) inventory model with erlang lead time and deterministic demand.' *Naval Research Logistics*, Vol. 51, pp. 906-922.

Kouvelis, P., & Li, J. (2008). 'Flexible backup supply and the management of lead-time uncertainty.' *Production and Operations Management Society*, Vol. 17, No. 2, pp. 184-199.

Kelton, D.W, Sadowski, R.P., & Swets, N.B. (2010). '*Simulation with Arena.*' 5<sup>th</sup> ed., Singapore: McGraw-Hill Education.

Liberatore, M.J. (1979). 'A model of freight transport selection.' *Transportation Journal*, Vol. 18 No. 4, pp. 92-100.

Namit, K, & Chen, J. (1999). 'Solutions to the (Q,r) inventory model for gamma lead-time demand.' *International Journal of Physical Distributions & Logistics Management*, Vol. 29, No. 2, pp. 138-151.

Niewenhuyse, I.V., & Vandaele, N. (2006). 'The impact of delivery lot splitting on delivery reliability in a two-stage supply chain.' *International Journal of Production Economics*, Vol. 104, pp. 694-708.

McKinnon, A., Button, K., & Nijkamp, P. (2002). '*Transport Logistics.*' 1<sup>ste</sup> ed., Northampton: Edward Elgar Publishing.

McCue, D. (2012). 'Intermodal: A new level of Reliability.' *World Trade*.

Moon, I., & Choi, S. (1994). 'The distribution free continuous review inventory system with a service level constraint.' *Computers industrial engineering*, Vol. 27, No. 1-4, pp. 209-212.

McGinnis, M.A. (1989). 'A comparative evaluation of freight Transportation Choice Models.' *Transportation Journal*, Vol. 29, No. 2, pp. 36-46.

Ouyang, L.Y., & Wu, K.S. (1997). 'Mixture inventory model involving variable lead time with a service level constraint.' *Computers Operations Research*, Vol. 24, No. 9, pp. 875-882.

Scarf, H., Arrow, K.J., & Karlin, S. (1958). '*Studies in the mathematical theory of inventory and production.*' Standford: Standford University Press.

Song, J.S. (1994). 'The effect of leadtime uncertainty in a simple stochastic inventory model.' *Management Science*, Vol. 40, No. 5, pp. 603-613.

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

Thomas, D.J., & Tyworth, J.E. (2007). 'Is pooling lead-time risk by order splitting orders simultaneously worthwhile?' *Journal of business logistics*, Vol. 25, No. 1, pp. 169-192.

Tyworth, J.E. (1991). 'The inventory theoretic approach in transportation selection models: a critical review.' *The logistics and transportation review*, Vol. 27, No. 4, pp. 299-318.

Tyworth, J.E. (1992). 'Modeling transportation-inventory trade-offs in a stochastic setting.' *Journal of Business Logistics*, Vol. 13, No. 2, pp.97-124.

Tyworth, J.E., & Zeng, A.Z. (1998). 'Estimating the effects of carrier transit-time performance of logistics cost and service.' *Transportation Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 89-97.

Tyworth, J.E., & Ganeshan, R. (2000). 'A note on solutions to the (Q,r) inventory model for gamma lead-time demand.' *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol. 30, No. 6, pp. 534-539.

Vernimmen, B. (2003) 'The inventory-theoretic approach to modal choice in freight transport: literature review and case study.' *Brussels economic review*, Vol. 46, No. 2, pp. 33-58.

Vernimmen, B., Dullaert, W., Willemé, P., & Witlox, F. (2008). 'Using the inventory-theoretic framework to determine cost-minimizing supply strategies in a stochastic setting.' *International Journal of Production Economics*, Vol. 115, pp. 248-259.

Witlox, F., & Vandaele, E. (2005). 'Determining the monetary value of quality attributes in freight transportation using a stated preference approach.' *Transportation Planning and Technology*, Vol. 28, No. 2, pp. 77-92.

Wang, P., & Hill, J.A. (2006). 'Recursive behavior of safety stock reduction: the effect of lead-time uncertainty.' *Decision Sciences*, Vol. 37, No. 2, pp. 285-290.

Wiegmans, B.W. (2010). 'The freight transport portfolio: a new way to analyze intermodal freight transport as compared to single-mode road transport.' *Transportation Journal*, Vol. 49, pp. 44-52.

Zamarini, L., Layaa, J., & Dullaert, W; (2011). 'Monetary values of freight transport quality attributes: a sample of Tanzanian firms.' *Journal of Transport Geography*, Vol. 19, pp. 1222-1234.

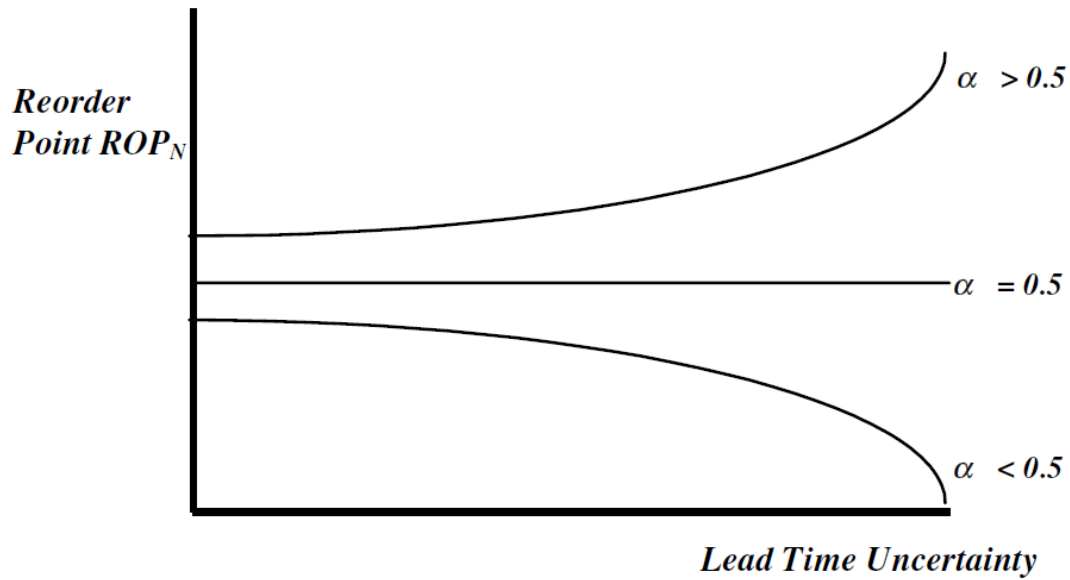
## Bijlages

**Bijlage 1:** sensitiviteitsanalyse *Tyworth & Zeng* (1998)

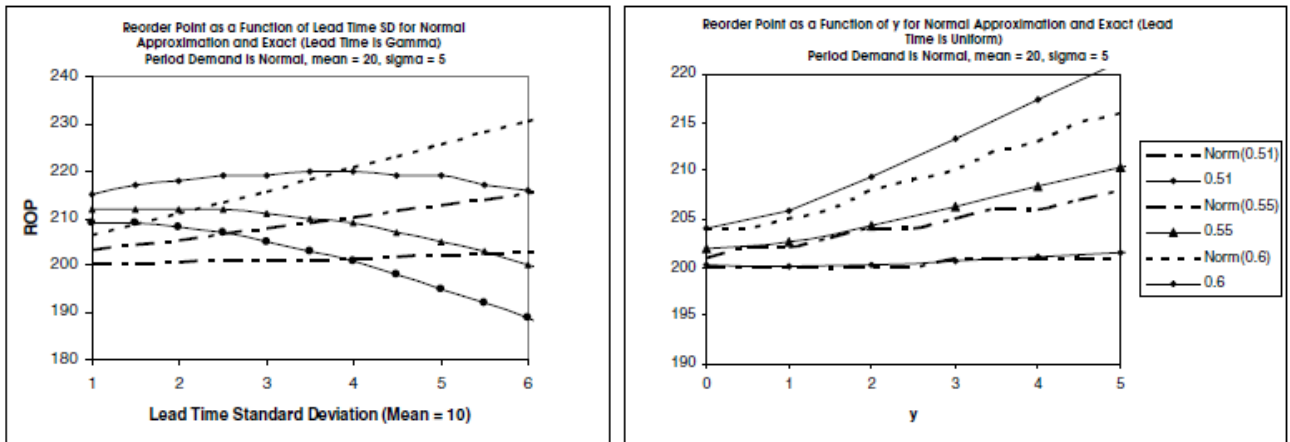
$\mu_T$	Element	Coefficient of variation of $T$ ( $\sigma_T/\mu_T$ )				
		0.00	0.20	0.40	0.80	1.60
1	$\sigma_T$	0.00	0.20	0.40	0.80	1.60
	ETAC	\$9962	\$10,278	\$10,299	\$10,513	\$11,186
	Fill rate	99.85%	99.80%	99.79%	99.69%	99.26%
2	$\sigma_T$	0.00	0.40	0.80	1.60	3.20
	ETAC	\$10,308	\$10,598	\$10,751	\$11,297	\$12,679
	Fill rate	99.81%	99.77%	99.71%	99.45%	98.57%
3	$\sigma_T$	0.00	0.60	1.20	2.40	4.80
	ETAC	\$10,618	\$10,935	\$11,214	\$12,087	\$14,098
	Fill rate	99.78%	99.73%	99.63%	99.22%	97.90%
4	$\sigma_T$	0.00	0.80	1.60	3.20	6.40
	ETAC	\$10,911	\$11,271	\$11,679	\$12,869	\$15,445
	Fill rate	99.76%	99.69%	99.54%	98.98%	97.24%
5	$\sigma_T$	0.00	1.00	2.00	4.00	8.00
	ETAC	\$11,192	\$11,604	\$12,143	\$13,643	\$16,728
	Fill rate	99.74%	99.66%	99.45%	98.74%	96.59%
6	$\sigma_T$	0.00	1.20	2.40	4.80	9.60
	ETAC	\$11,465	\$11,935	\$12,607	\$14,407	\$17,952
	Fill rate	99.72%	99.62%	99.36%	98.50%	95.95%
7	$\sigma_T$	0.00	1.40	2.80	5.60	11.20
	ETAC	\$11,732	\$12,264	\$13,070	\$15,162	\$19,124
	Fill rate	99.70%	99.58%	99.28%	98.26%	95.32%
8	$\sigma_T$	0.00	1.60	3.20	6.40	12.80
	ETAC	\$11,994	\$12,592	\$13,532	\$15,907	\$20,247
	Fill rate	99.69%	99.55%	99.19%	98.02%	94.70%
9	$\sigma_T$	0.00	1.80	3.60	7.20	14.40
	ETAC	\$12,252	\$12,919	\$13,992	\$16,642	\$21,325
	Fill rate	99.67%	99.51%	99.10%	97.78%	94.09%
10	$\sigma_T$	0.00	2.00	4.00	8.00	16.00
	ETAC	\$12,507	\$13,245	\$14,451	\$17,369	\$22,360
	Fill rate	99.66%	99.47%	99.01%	97.54%	93.50%



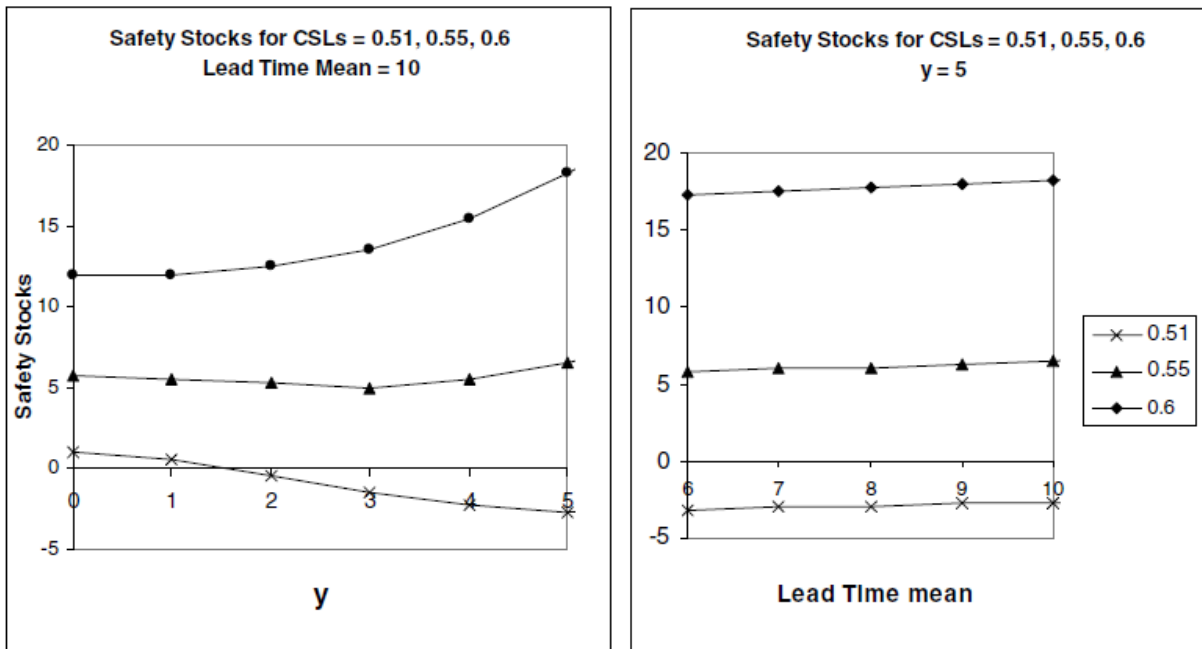
**Bijlage 2:** Bestelpunt in functie van de levertijd-onzekerheid voor serviceniveaus boven, beneden en gelijk aan 0,5. (bron: Chopra et al, 2004)



**Bijlage 3:** bestelpunt in functie van een levertijd-onzekerheid voor een lage variantiecoëfficiënt (bron: Chopra et al., 2004)



**Bijlage 4:** veiligheidsvoorraad in functie van de levertijd-variabiliteit (links) en gemiddelde levertijd (rechts) voor Uniforme levertijden (bron: chopra et al. 2004)



**Bijlage 5:** codering van de macro voor het oplossen van vergelijking (9.3)

```
Sub Simpson()
```

```
Dim interval As Double
```

```
Dim i As Integer
```

```
Dim X As Double, xmax As Double
```

```
Dim steps As Long
```

```
Dim func As Double, sumfunc As Double
```

```
    s = Range("b9").Value
```

```
    xmax = Range("b7").Value + 20 * Range("b8").Value 'de 20 kan eventueel meer
```

```
    steps = Range("b10").Value
```

```
    interval = xmax / steps
```

```
    sumfunc = 0
```

```
    X = s
```

```
    For i = 0 To steps
```

```
        Range("b5").Value = X
```

```
        func = Range("b4").Value * (X - s)
```

```
        sumfunc = sumfunc + func
```

```
        If i > 0 And i < steps Then
```

```
            If (i / 2) = Int(i / 2) Then sumfunc = sumfunc + func Else sumfunc = sumfunc + 3 * func
```

```
        End If
```

```
        X = X + interval
```

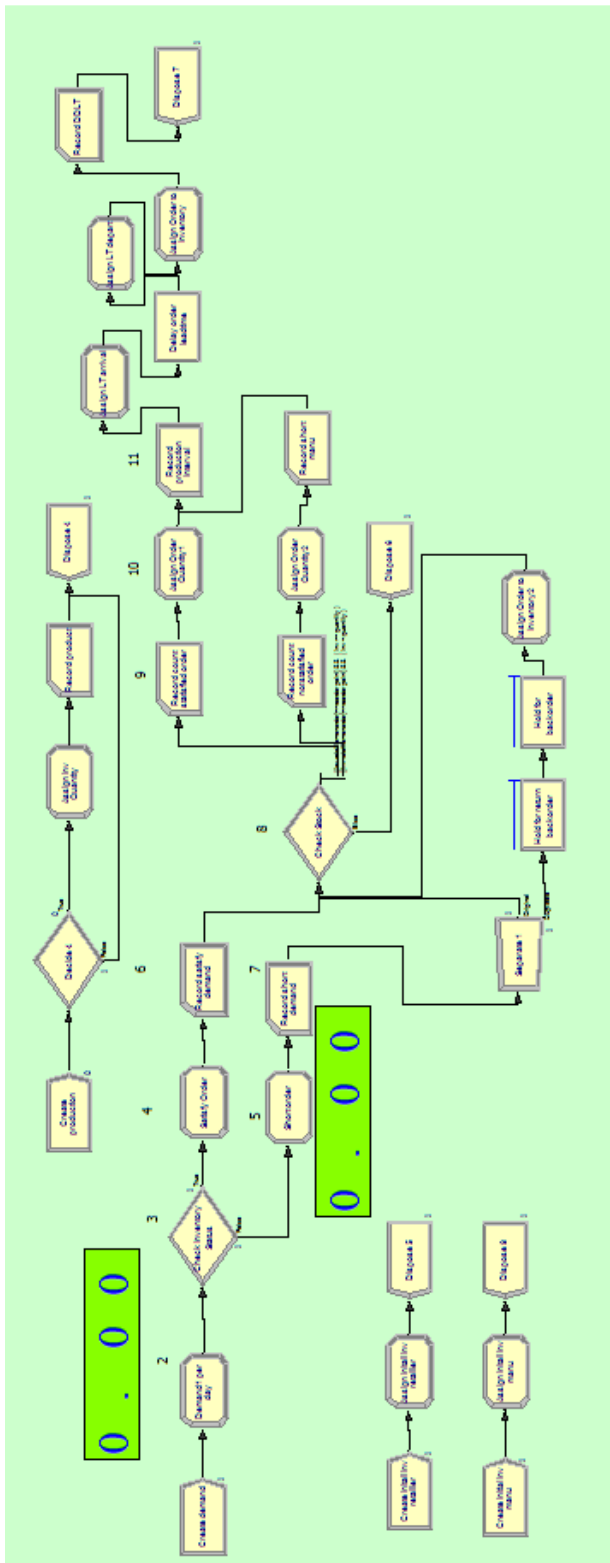
```
        If X > xmax Then X = xmax
```

```
    Next i
```

```
    Range("b3").Value = sumfunc * interval / 3
```

```
End Sub
```

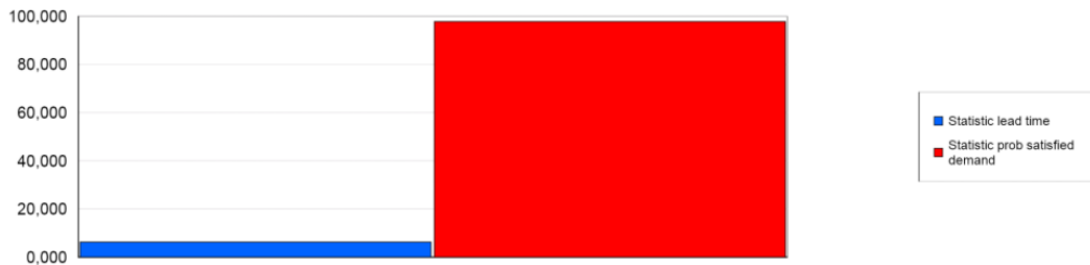
**Bijlage 6:** Het simulatiemodel in Arena 14.0.0 (Bron: Janssens G., persoonlijke communicatie)



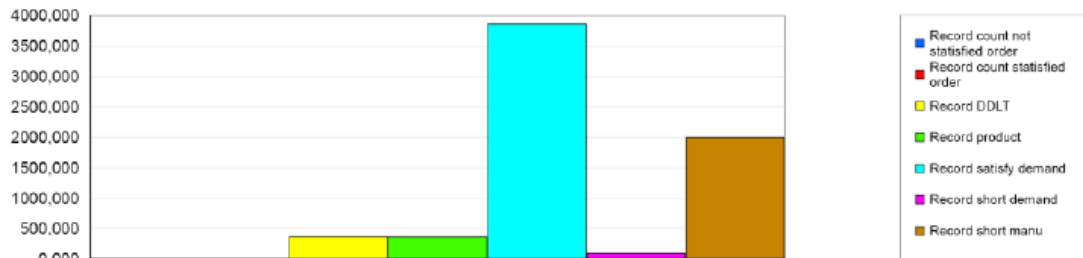


**Bijlage 8:** Arena output Deel A - scenario één: Normaalverdeling  $\mu_T = 6$  &  $\sigma_T = 3,6$

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Statistic lead time	6.2575	0,98	-2	12.4005
Statistic prob satisfied demand	97.7867	0,45	94.5660	100.00



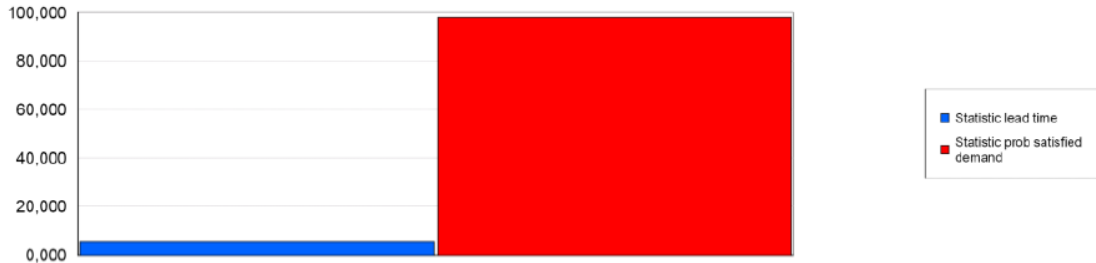
Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Record count not satisfied order	2.9800	0,58	0.00	7.0000
Record count satisfied order	2.7000	0,46	0.00	5.0000
Record DDLT	357.90	31,59	133.00	638.00
Record product	357.36	0,77	351.00	360.00
Record satisfy demand	3858.88	22,26	3680.00	4077.00
Record short demand	87.5400	17,86	0.00	216.00
Record short manu	1999.58	390,14	0.00	4697.00



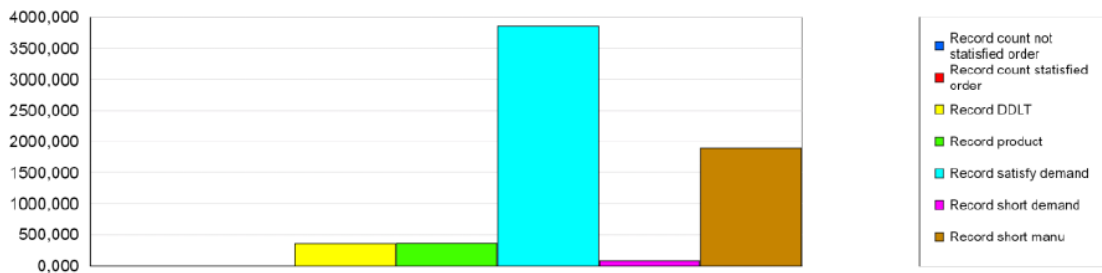
Variable	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
inv	336.99	5,07	298.66	357.39	0.00	682.6
inv retailer	334.32	5,10	300.11	380.14	0.00	736.6

Bijlage 9: Arena output Deel A - scenario één: Gammaverdeling  $\mu_T = 6$  &  $\sigma_T = 3,6$

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Statistic lead time	5.5987	0,78	1.7848	13.3470
Statistic prob satisfied demand	98.0476	0,42	93.4521	100.00



Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Record count not statisfied order	2.8200	0,59	0.00	6.0000
Record count statisfied order	2.7600	0,48	0.00	5.0000
Record DDLT	351.18	27,98	174.00	663.00
Record product	356.86	0,89	348.00	360.00
Record satisfy demand	3859.40	24,96	3688.00	4072.00
Record short demand	76.8800	16,75	0.00	261.00
Record short manu	1892.22	398,13	0.00	4026.00

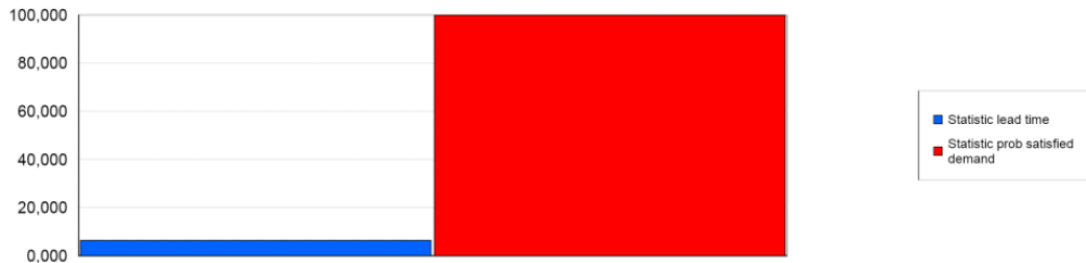


Variable	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
inv	338.85	5,01	301.69	358.31	0.00	682.00
inv retailer	335.82	4,17	290.18	363.30	0.00	726.00

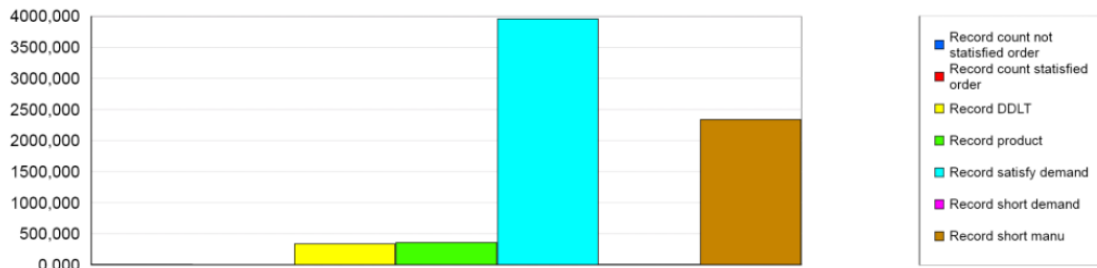


Bijlage 10: Arena output Deel A - scenario twee: Normaalverdeling  $\mu_T = 6$  &  $\sigma_T = 3,6$

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Statistic lead time	6.3399	0,90	-1	13.6918
Statistic prob satisfied demand	99.88	0,07	98.8534	100.00



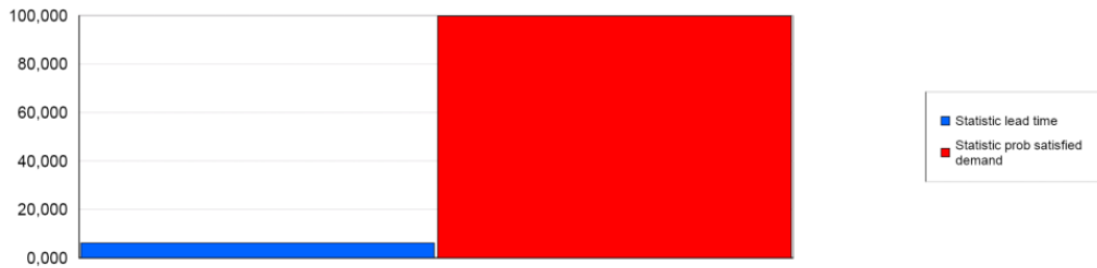
Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Record count not satisfied order	3.4800	0,54	0.00	7.0000
Record count satisfied order	2.5000	0,51	0.00	5.0000
Record DDLT	333.66	29,89	156.00	652.00
Record product	357.02	0,86	349.00	360.00
Record satisfy demand	3956.46	18,77	3813.00	4116.00
Record short demand	4.6200	2,75	0.00	46.0000
Record short manu	2335.08	359,63	0.00	4697.00



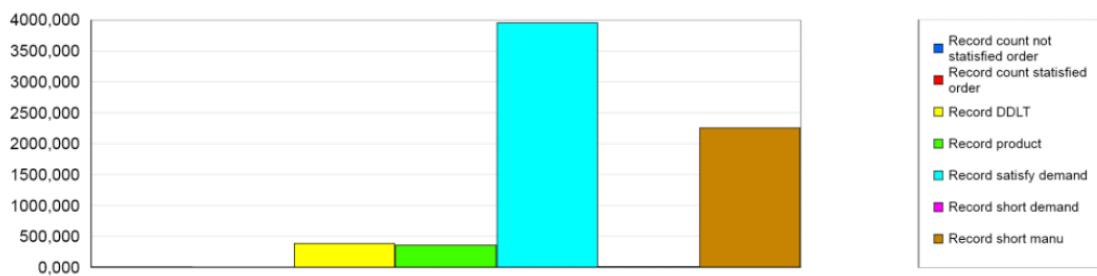
Variable	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
inv	337.01	4,87	299.61	363.28	0.00	682.00
inv retailer	401.05	4,82	369.71	428.68	0.00	807.00

**Bijlage 11:** Arena output Deel A - scenario twee: Gammaverdeling  $\mu_T = 6$  &  $\sigma_T = 3,6$

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Statistic lead time	6.2129	0,92	1.1501	15.9603
Statistic prob satisfied demand	99,81	0,16	97.1672	100,00



Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Record count not statisfied order	3.3600	0,55	0.00	7.0000
Record count statisfied order	2.6200	0,52	0.00	6.0000
Record DDLT	382.92	34,99	228.00	798.00
Record product	356.74	0,93	349.00	360.00
Record satisfy demand	3952.14	21,17	3815.00	4116.00
Record short demand	7.5400	6,18	0.00	113.00
Record short manu	2254.56	366,90	0.00	4697.00



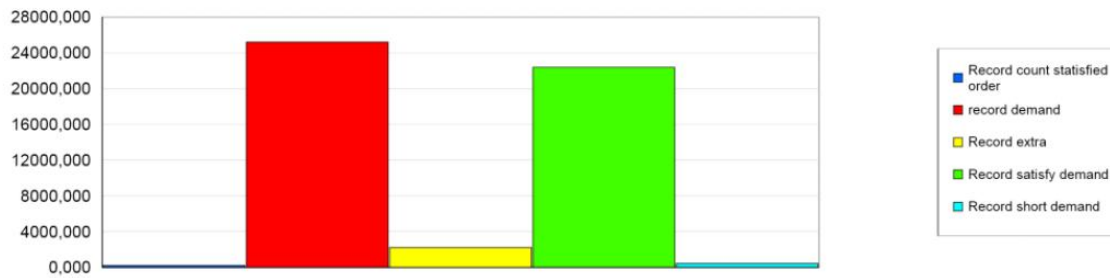
Variable	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
inv	339.83	5,00	301.46	367.31	0.00	682.00
inv retailer	410.44	4,74	368.38	440.54	0.00	818.00

**Bijlage 12:** Arena output Deel B – wegtransport

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Statistic lead time	0.1979	0,08	0.02682585	0.7537
Statistic prob satisfied demand	98.0739	0,20	97.1619	98.8074
Statistic safety stock	56.0000	0,00	56.0000	56.0000



Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Record count statisfied order	210.10	1,67	204.00	216.00
record demand	25204.45	208,45	24544.00	26424.00
Record extra	2198.30	142,92	1742.00	2796.00
Record satisfy demand	22375.05	220,22	21441.00	23238.00
Record short demand	439.40	46,03	265.00	639.00



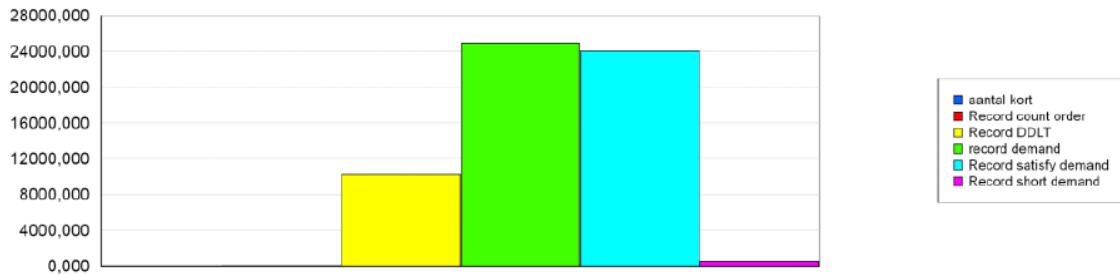
Variable	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
inv retailer	116.78	0,57	114.32	118.89	0.00	190.00

**Bijlage 13:** Arena output Deel B – Binnenvaart Vlissingen

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Statistic lead time	5.6085	0,27	4.7553	6.8658
Statistic prob satisfied demand	98.0271	0,29	97.0233	99.30
Statistic safety stock	36.0000	0,00	36.0000	36.0000



Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
aantal kort	11.5500	1,77	6.0000	17.0000
Record count order	25.5500	0,28	25.0000	27.0000
Record DDLT	10215.50	367,60	8588.00	11463.00
record demand	24936.45	215,96	24179.00	25859.00
Record satisfy demand	24022.10	193,01	23538.00	25039.00
Record short demand	484.20	72,74	169.00	739.00



Variable	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
inv retailer	880.60	4,06	868.43	894.30	0.00	1844.8

## **Auteursrechtelijke overeenkomst**

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

**Invloed van de onzekerheid van levertijd via verschillende transportmodi op de voorraadbeslissingen en op de keuze van transportmiddel door bedrijven**

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

Jaar: **2012**

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

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

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

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

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

Voor akkoord,

**Nullens, Wim**

Datum: **1/06/2012**