

Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen, de gevraagde informatie in te vullen (en de overeenkomst te ondertekenen en af te geven).

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

Titel: Simulatie-optimalisatie van beslissingen in verband met voorraadbeheer

Richting: 3de jaar handelsingenieur - major operationeel management en logistiek

Jaar: 2008

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.

Ik ga akkoord,

JOOKEN, Tom

Datum: 5.11.2008

Simulatie-optimalisatie van beslissingen in verband met voorraadbeheer

Tom JOOKEN

promotor :
Prof. dr. Gerrit JANSSENS

Woord vooraf

Als laatstejaarsstudent Handelsingenieur, met als Major en verdiepende Minor Operationeel Management en Logistiek, aan de Universiteit Hasselt, heb ik deze eindverhandeling geschreven in het kader van mijn opleiding.

In onze opleiding hebben we meerdere cursussen gevolgd die handelen over optimalisatie en over voorraadbeheer. Verder ben ik door mijn keuze voor de afstudeerrichting 'operationeel management en logistiek' ook in aanraking gekomen met cursussen die handelen over simulatie en logistiek. De integratie van simulatie en optimalisatie kwam echter niet aan bod in onze opleiding. Gezien de cursussen omtrent simulatie, optimalisatie en logistiek mijn interesse dragen en logistiek sterk naar voor komt in het huidige bedrijfsleven, vond ik het onderwerp met de titel 'Simulatie-optimalisatie van beslissingen in verband met voorraadbeheer' een gepaste problematiek om te bestuderen.

Deze eindverhandeling was niet tot stand kunnen komen zonder de hulp van een aantal personen, die ik dan ook zou willen bedanken. Hierbij denk ik in het bijzonder aan mijn promotor prof. dr. Gerrit Janssens. Ik zou hem willen bedanken voor zijn geleverde inspanningen en zijn nuttige aanwijzingen om deze eindverhandeling tot een goed einde te brengen. Verder wil ik ook een woord van dank richten aan mevrouw Katrien Ramaekers voor de hulp bij de toepassing van de methodologie van responsoppervlakken. Zonder haar hulp had ik de toepassing van deze techniek waarschijnlijk niet tot een goed einde kunnen brengen. Ook mevrouw An Caris wil ik bedanken voor de hulp bij het opstellen van het simulatiemodel rond de gezamenlijke bijvulling van voorraden.

Tot slot wil ik ook nog een woord van dank richten aan alle mensen die mij gesteund hebben gedurende mijn opleiding, met name aan mijn ouders en mijn vriendin die altijd achter mij gestaan hebben.

Samenvatting

Het belang van logistiek neemt de laatste jaren toe. Op het vlak van logistiek en logistieke ketens kunnen nog vele verbeteringen doorgevoerd worden. Simulatie en optimalisatie zijn twee technieken die veel in verband gebracht worden met logistiek. Nochtans zijn de technieken op zich beperkt in hun mogelijkheden. Via simulatie alleen kunnen processen niet verbeterd worden. De beste oplossing kan, via simulatie, alleen gevonden worden door alle mogelijke scenario's uit te testen. Dit is echter onbegonnen werk omdat een groot aantal combinaties gevormd kunnen worden met de parameters van het model, en deze parameters ook veel verschillende waarden kunnen aannemen. Een leidraad om goede oplossingen te vinden is dus noodzakelijk. Aan de andere kant is het zo dat de problemen, die veelal voorkomen in de werkelijkheid, te complex zijn om opgelost te worden aan de hand van wiskundige modellen die aan de basis liggen van pure optimalisatiemethoden. Zuivere optimalisatiemodellen op zich zijn niet geschikt om alle ingewikkeldheden en de dynamica van een systeem te vatten, waardoor toevlucht gezocht moet worden in simulatie. De combinatie van simulatie en optimalisatie en de hierbij ontwikkelde technieken kunnen een oplossing bieden voor deze problemen. Deze problematiek wordt in deze eindverhandeling verder onderzocht.

Allereerst wordt uitgelegd wat onder logistiek en een logistieke keten verstaan wordt. Logistiek bevat namelijk meer dan het vervoeren van goederen alleen. Andere activiteiten zoals opslag van goederen, materiaalbeheer, voorraadbeheer, het bepalen van de beste lay-out van voorzieningen, het bepalen van de beste locatie van voorzieningen en dergelijke meer behoren ook tot de logistieke keten. Al deze activiteiten hebben bovendien een invloed op elkaar. Een verandering in één schakel van de keten kan zowel een positieve als negatieve invloed uitoefenen op een andere schakel. Naast de activiteiten binnen de logistieke keten worden ook de verschillende stromen binnen een logistieke keten besproken. De drie stromen zijn de goederenstroom, de geldstroom en de informatiestroom.

Hierna wordt overgegaan tot een korte bespreking van simulatie en optimalisatie als aparte technieken, elk met hun eigen voor- en nadelen. Vervolgens wordt de combinatie van

simulatie en optimalisatie besproken. Hierbij wordt aandacht besteed aan de mogelijkheden die de integratie van beide technieken biedt, alsook aan enkele barrières die de toepassing ervan nog kent. Om dit hoofdstuk af te sluiten wordt nagegaan hoe de integratie van de twee technieken zou moeten evolueren in de toekomst.

Een volgend hoofdstuk haalt kort enkele technieken aan die binnen simulatie-optimalisatie gebruikt worden. Hierbij wordt dieper ingegaan op de methodologie van responsoppervlakken, welke ook gedemonstreerd wordt aan de hand van een voorbeeld. In dit voorbeeld, gebaseerd op het model van Posner en Berg (1989), worden drie parameters geoptimaliseerd om te komen tot een zo groot mogelijke winst. Het model van Posner en Berg (1989) gaat uit van een systeem met één imperfecte machine die rechtstreeks in voorraad produceert. Via de methodologie van responsoppervlakken worden de optimale waarden voor de hersteltijd van de machine, de buffergrootte van de voorraad en de tijd tussen twee defecten van de machine (drie controleerbare factoren) bepaald om de resultaten van het model te maximaliseren.

Het laatste hoofdstuk handelt over de techniek rond de gezamenlijke aanvulling van voorraden (joint replenishment). Hiervoor werd in Arena een simulatiemodel ontwikkeld van een voorraadsysteem met twee producten. Als één van beide producten zijn bestelpunt bereikt, gaat het model na of het andere product zijn can-order punt bereikt heeft. Alle andere producten waarvan het can-order punt bereikt wordt, worden mee opgenomen in de bestelling om vaste bestelkosten te besparen. De interne parameters waarmee gewerkt worden in dit systeem zijn het bestelpunt, de bestelgrootte en het can-order punt van de twee producten (zes controleerbare factoren). Verder worden drie externe factoren veranderd. Deze externe parameters bestaan uit de verdeling van de vraag, de grootte van de vaste bestelkost en de grootte van de variabele bestelkosten (hier gelijk verondersteld aan de aankoopkosten van de producten). Hierdoor ontstaan achttien verschillende situaties. Deze achttien verschillende situaties worden geoptimaliseerd aan de hand van de techniek van responsoppervlakken. De resultaten, bekomen uit de toepassing van deze techniek, worden vervolgens vergeleken met elkaar of na te gaan of significante verschillen zich voordoen. Hierbij wordt gekeken naar de significante parameters uit de eerste fase van de methodologie van responsoppervlakken, de optima en de verloren verkopen. Tevens wordt

een vergelijking gemaakt van de bekomen optima en de verloren verkopen tussen het werken met gezamenlijke bijvulling van voorraden en dezelfde situatie waarbij de producten apart behandeld worden. Ten slotte wordt ook nog besproken hoe het model uitgebreid kan worden naar meerdere producten ($n > 2$).

Inhoudsopgave

WOORD VOORAF	II
SAMENVATTING	III
INHOUDSOPGAVE.....	VI
LIJST VAN FIGUREN	X
LIJST VAN TABELLEN	XI
LIJST VAN TABELLEN	XI
1. PROBLEEMSTELLING EN ONDERZOEKSOPZET.....	1
1.1. <i>Probleemstelling</i>	1
1.1.1. Omschrijving en situering praktijkprobleem	1
1.1.2. Formulering van de centrale onderzoeksvraag	2
1.1.3. Formulering deelvragen	2
1.2. <i>Onderzoeksopzet</i>	3
2. WAT IS EEN LOGISTIEKE KETEN?	5
2.1. <i>Inleiding</i>	5
2.2. <i>Geschiedenis</i>	6
2.3. <i>Wat is logistiek?</i>	6
2.4. <i>Strategieën in de logistiek</i>	8
2.5. <i>Het logistiek netwerk</i>	9
2.6. <i>Invloeden op de structuur van het netwerk</i>	11
2.7. <i>Voordelen van een logistiek netwerk voor ondernemingen</i>	11
3. ACTIVITEITEN BINNEN DE LOGISTIEKE KETEN	13
3.1. <i>Vervoer</i>	13
3.2. <i>Vorraden</i>	13
3.3. <i>Materiaalbeheer (Material handling)</i>	14
3.4. <i>Voorzieningen (magazijn, productiehal, distributiecentra)</i>	14

3.5.	<i>Het informatiesysteem</i>	15
3.6.	<i>Kosten van een logistiek netwerk</i>	15
3.7.	<i>Klantenservice (Customer service)</i>	16
3.8.	<i>Computer- en andere modellen in een logistiek netwerk</i>	16
3.8.1.	<i>Veelgebruikte technieken</i>	17
4.	SIMULATIE-OPTIMALISATIE	20
4.1.	<i>Inleiding</i>	20
4.2.	<i>Simulatie</i>	20
4.2.1.	<i>Inleiding</i>	20
4.2.2.	<i>Voor- en nadelen</i>	21
4.3.	<i>Optimalisatie</i>	23
4.3.1.	<i>Inleiding</i>	23
4.3.2.	<i>Voor- en nadelen</i>	23
4.4.	<i>Integratie van simulatie en optimalisatie</i>	24
4.5.	<i>Barrières en toekomst</i>	26
4.5.1.	<i>Barrières</i>	26
4.5.2.	<i>Toekomst</i>	27
5.	SIMULATIE-OPTIMALISATIE TECHNIEKEN	29
5.1.	<i>Inleiding</i>	29
5.2.	<i>Stochastische benadering</i>	30
5.2.1.	<i>Gradient-based search</i>	30
5.2.2.	<i>Random Search</i>	31
5.3.	<i>Metaheuristieken en evolutietheorie</i>	32
5.3.1.	<i>Evolutietheorie</i>	32
5.3.2.	<i>Metaheuristieken</i>	32
5.3.2.1.	<i>Tabu search</i>	33
5.3.2.2.	<i>Simulated annealing</i>	34
5.3.2.3.	<i>Genetische algoritmes (genetic algorithms)</i>	35

5.3.2.4.Scatter Search	35
5.4. <i>Sample path optimalisatie</i>	36
5.5. <i>Methodologie van responsoppervlakken</i>	36
5.5.1. Uitgewerkt voorbeeld	42
5.5.1.1.Het model in meer detail	42
6. GEZAMENLIJKE BIJVULLING VAN VOORRADEN	51
6.1. <i>Inleiding</i>	51
6.2. <i>Gezamenlijke bijvulling van de voorraad</i>	51
6.3. <i>Voor- en nadelen van gezamenlijke aanvulling van de voorraad</i>	52
6.4. <i>Uitgewerkt voorbeeld van de gezamenlijke bijvulling van de voorraad voor 2 producten</i>	53
6.4.1. Experimenteel ontwerp: de externe factoren	54
6.4.2. Berekening van bestelpunten, bestelhoeveelheden en can-order punten.. -	58 -
6.4.2.1.Bestelpunten	- 58 -
6.4.2.2.Bestelhoeveelheden.....	- 58 -
6.4.2.3.Can-order punten.....	- 59 -
6.4.3. Kosten van de uitvoering van de simulatie	- 61 -
6.4.4. Keuze van een ontwerp.....	- 62 -
6.4.5. Bespreking van de resultaten	- 64 -
6.4.5.1.Vergelijking significante parameters bij veranderingen in de externe parameters	- 64 -
6.4.5.2.Vergelijking van de optimale waarden	- 68 -
6.4.6. Uitbreiding van het model naar n producten ($n > 2$).....	- 72 -
7. CONCLUSIES	- 76 -
8. AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK	- 79 -
9. LIJST VAN GERAADPLEEGDE WERKEN	- 80 -
9.1. <i>Boeken en artikels</i>	- 80 -
9.2. <i>Websites</i>	- 84 -

BIJLAGEN

Bijlage 1: Model van Posner en Berg (1989)

Bijlage 2: Spss output eerste orde (1^{ste} stap)

Bijlage 3: Spss output eerste orde (2^{de} stap)

Bijlage 4: Spss output tweede orde

Bijlage 5: Model voor gezamenlijke aanvulling voorraden

Bijlage 6: De verschillende situaties

Bijlage 7: Berekening EOQ voor de verschillende situaties

Bijlage 8: Berekening can-order punten voor de verschillende situaties

Bijlage 9: Berekening van de kosten voor 1 replicatie

Bijlage 10: Output van de 7 verschillende ontwerpen

Bijlage 11: Aantal bestellingen, gemiddelde voorraad en verschil in vraag

Bijlage 12: Berekening van de verschillen in optima tussen de situaties

Lijst van figuren

<i>Figuur 1: Terminologie goederenstroombesturing (Van Amstel e.a., 1999)</i>	7
<i>Figuur 2: Drie mogelijke concurrentiestrategieën (Van Amstel e.a., 1999)</i>	9
<i>Figuur 3: De logistieke keten (Van Amstel e.a., 1999)</i>	10
<i>Figuur 4: Simulatie-optimalisatie cyclus (Gehlsen en Page, 2001)</i>	25
<i>Figuur 5: De zes domeinen voor de toekomst (Bowden en Hall, 1998)</i>	27
<i>Figuur 6: Methodologie van responsoppervlakken (Neddermeijer e.a., 2000)</i>	41
<i>Figuur 7: De achttien verschillende situaties</i>	57
<i>Figuur 8: Factoren voor het bepalen van het ontwerp</i>	- 64 -
<i>Figuur 9: Aanpassing module Decide om het bestelpunt te controleren</i>	- 73 -
<i>Figuur 10: Aanpassing module Decide om het can-order punt te controleren</i>	- 74 -
<i>Figuur 11: Extra rijen in de module Statistics</i>	- 75 -

Lijst van tabellen

<i>Tabel 1: Niveaus voor de drie experimentele parameters</i>	<i>44</i>
<i>Tabel 2: Berekening van het pad van steepest ascent.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabel 3: Achtereenvolgende pogingen via het pad van steepest ascent</i>	<i>48</i>
<i>Tabel 4: Niveaus voor de 3 experimentele parameters</i>	<i>48</i>
<i>Tabel 5: Niveaus voor de punten op de as voor de 'central composite design'.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabel 6: Verschillende gevallen van de vraag</i>	<i>54</i>
<i>Tabel 7: Verschillende gevallen van de vaste bestelkost.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabel 8: Verschillende gevallen van de variabele bestelkost.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabel 9: Berekening van de bestelpunten.....</i>	<i>- 58 -</i>
<i>Tabel 10: Berekening van de bestelhoeveelheden</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Tabel 11: Berekening van de can-order punten.....</i>	<i>- 60 -</i>
<i>Tabel 12: Overzicht reductie van het factorieel ontwerp</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Tabel 13: Regressiecoëfficiënten voor de ontwerpen in tabel 12</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Tabel 14: Optima van de zes interne parameters</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Tabel 15: De te vergelijken situaties bij de wijziging van 1 externe parameter</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Tabel 16: Optima voor de verschillende situaties.....</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Tabel 17: Verloren verkopen voor product 1 en product 2</i>	<i>- 72 -</i>

1. Probleemstelling en onderzoekopzet

1.1. Probleemstelling

1.1.1. Omschrijving en situering praktijkprobleem

De hedendaagse maatschappij kent enorme evoluties en veranderingen die hun invloed uitoefenen op de concurrentie tussen bedrijven. Deze veranderingen volgen elkaar bovendien sneller op. De globalisering van de economie is één van deze belangrijke veranderingen. Daar waar de concurrentie vroeger vooral optrad binnen de eigen landgrenzen, komt de concurrentie de laatste decennia eveneens in belangrijke mate uit het buitenland. Ook de economische- en de bevolkingsgroei hebben geleid tot een scherpere concurrentie tussen bedrijven. (Witlox, 2006)

Logistiek en een goede logistieke keten (netwerk) zijn voor alle ondernemingen van wezenlijk belang. Logistiek bevat meer dan het vervoeren van goederen alleen. Voorraadbeheer, orderafwerking, in- en verkoop, magazijnbeheer, materiaalbeheer (material handling), verpakken, het handhaven van de standaarden op het gebied van klantenservice (customer service), het aanwijzen van locaties voor opslagplaatsen, de selectie van de transportmethoden en het beheer van het informatiesysteem behoren ook tot de activiteiten van het logistieke netwerk. (Ballou, 1992)

Vroeger ging de aandacht binnen bedrijven voornamelijk uit naar het productiegebeuren en via deze weg werd ook geprobeerd voordeel te behalen ten opzichte van de concurrentie. De globalisering van de economie, de economische groei en de bevolkingsgroei maakt dit echter zeer moeilijk. De toegenomen concurrentie dwingt bedrijven ertoe om alle aspecten van de logistieke keten op elkaar af te stemmen om zo te komen tot een synergie. Daar veranderingen in de componenten van de logistieke keten (zoals bijvoorbeeld de lay-out van een opslagplaats, het ingezette materiaal, ...) hoge kosten met zich meebrengen, worden deze veranderingen best eerst onderzocht via modellen van het reële systeem. Binnen een logistieke keten kunnen veel veranderingen aangebracht worden, maar het is moeilijk op voorhand de beste oplossing te kennen.

Deze modellen van het reële systeem maken het mogelijk de veranderingen aan een logistieke keten op een kostenefficiënte manier te onderzoeken. (Lammers e.a., 2006)

1.1.2. Formulering van de centrale onderzoeksvraag

Simulatie-optimalisatie kan gebruikt worden om beslissingen te nemen die zorgen voor een (bijna) optimale werking van een logistieke keten. Via deze techniek kunnen een aantal mogelijke veranderingen gesimuleerd en achteraf geoptimaliseerd worden. De kosten om dit via simulatie-optimalisatie te doen zijn te verwaarlozen ten opzichte van de kosten om dit toe te passen op het werkelijke systeem. Ook qua tijd levert het gebruik van simulatie-optimalisatie enorme besparingen op.

Dit leidt tot de volgende centrale onderzoeksvraag:

Kan simulatie-optimalisatie gebruikt worden om beslissingen te nemen die de logistieke keten efficiënter doet werken?

1.1.3. Formulering deelvragen

Via een aantal deelvragen wordt getracht een antwoord te formuleren op de centrale onderzoeksvraag.

- Wat is een logistieke keten en uit welke activiteiten bestaat een logistieke keten?
- Is het nuttig simulatie en optimalisatie te koppelen?
- Welke technieken van simulatie-optimalisatie bestaan?
- Hoe werkt de methodologie van responsoppervlakken?
- Wat is gezamenlijke aanvulling van de voorraad?

- Is gezamenlijke aanvulling van voorraden voordelig?
- Variëren de resultaten van het model sterk bij veranderingen in externe factoren?

1.2. Onderzoeksopzet

In de eindverhandeling zijn een literatuurstudie en een onderzoek uiteengezet. Voor de literatuurstudie werd vooral gebruik gemaakt van wetenschappelijke artikels, terug te vinden via de elektronische zoekmachines van het internet en in universitaire bibliotheken. Boeken werden gebruikt om extra informatie te zoeken.

In het eerste hoofdstuk wordt dieper ingegaan op wat logistiek en een logistieke keten precies zijn, en worden de begrippen die hierin voorkomen verder uitgelegd. Ook de strategieën die in de logistiek gebruikt worden en de voordelen die de keten kan hebben voor bedrijven komen hierin aan bod.

Het tweede hoofdstuk handelt over de activiteiten die plaatsvinden binnen een logistieke keten. Kennis van deze verschillende activiteiten is van belang omdat al deze aspecten op elkaar afgestemd moeten worden om te komen tot een synergie.

Het derde hoofdstuk handelt over simulatie en de voor- en nadelen hieraan verbonden voor ondernemingen, over optimalisatie en de voor- en nadelen hieraan verbonden voor ondernemingen, de integratie van beide methoden en de voordelen die deze integratie biedt en ten slotte over de barrières en de toekomst van simulatie-optimalisatie.

In hoofdstuk vier worden een aantal simulatie-optimalisatie technieken aangehaald. De theorie van de 'Methodologie van responsoppervlakken' ('Response Surface Methodology') wordt dieper bestudeerd omdat deze techniek gebruikt wordt in de rest van de eindverhandeling. Op het einde van het hoofdstuk wordt deze techniek ook gedemonstreerd aan de hand van een uitgewerkt voorbeeld.

Tenslotte wordt de problematiek rond de gezamenlijke bijvulling van de voorraad aangehaald. Hierbij werd een model ontwikkeld binnen Arena, waarbij een aantal externe

factoren veranderd worden om te kijken welke invloed deze veranderingen hebben op het model. De externe factoren bestaan uit de verdeling van de vraag, de vaste bestelkost en de variabele kost per eenheid die aangekocht wordt bij een leverancier. Door veranderingen in deze externe factoren worden achttien verschillende situaties bekomen. Deze verschillende situaties worden geoptimaliseerd via de techniek van responsoppervlakken en vergeleken met elkaar om na te gaan of er grote verschillen optreden als enkele externe factoren veranderen. Tot slot wordt ook meegedeeld hoe het ontwikkelde model uitgebreid kan worden naar meerdere producten.

2. Wat is een logistieke keten?

2.1. Inleiding

Door de jaren heen is het vervoer van groot belang geweest voor de goede werking van de economie en het maatschappelijke leven. Vervoer is een dienstverlenende activiteit en dient bijna altijd bekeken te worden in samenhang met een andere activiteit. De reden waarom de verplaatsing gebeurt, is ondergeschikt aan de beoogde activiteit die mogelijk wordt door die verplaatsing. Vervoer vertoont dus een intermediair of afgeleid karakter. (Witlox, 2006)

Verder worden producten zelden geproduceerd op de plaats waar en op het tijdstip dat ze nodig zijn voor gebruik. Producten komen op veel verschillende plaatsen en slechts op enkele tijdstippen van het jaar voor. Dit zorgde vroeger voor problemen, omdat geen goed ontwikkelde vervoers- en opslagfaciliteiten bestonden. Hierdoor kon slechts een beperkt aantal producten gebruikt worden, die ook niet lang bewaard konden worden wanneer het ging om bederfbare goederen. (Ballou, 1992)

In de hedendaagse maatschappij vonden heel wat evoluties plaats die hun invloed hadden op het vervoerswezen. Eén van deze evoluties is de globalisering van de economie. De markten worden geografisch groter, tot over de landgrenzen heen. Dit leidt tot grotere afzetmarkten en mogelijkheden om grondstoffen, productcomponenten en arbeid goedkoper, met inachtneming van de gewenste kwaliteit, te bekomen. De afstemming van de verschillende schakels binnen de keten wordt ook belangrijker. De opkomst van allerlei communicatiemiddelen, zoals telecommunicatie- en internetontwikkelingen, zorgen ervoor dat snel en over lange afstand kan gecommuniceerd worden. (Lammers e.a., 2002) Naast de hierboven aangehaalde evoluties vermelden Bolis en Maggi (2003) ook de liberalisering van de transportmarkten en de economische- en de bevolkingsgroei.

Door deze evoluties komt de logistiek steeds sterker naar voor als een middel om voordeel te behalen ten opzichte van de concurrentie, zodat ondernemingen steeds

afhankelijker worden van deze integratie van de logistieke keten. De evoluties hebben de ontwikkeling van logistieke systemen in de hand gewerkt. (Brewer en Hensher, 2001)

2.2. Geschiedenis

In het verleden werden ondernemingen voornamelijk opgebouwd rond de functies marketing en productie. De meeste ondernemingen hadden een goed beeld van het gat in de markt, wie hun klanten waren en welke producten deze klanten wilden. Over hoe de logistieke keten moest werken om de producten bij de eindconsument te krijgen, werd echter nauwelijks iets geschreven. De voordelen die behaald konden worden door het goed beheren van de logistieke functie bleven grotendeels onbenut. (Lammers e.a., 2005)

De baten van een goed beheer van de logistiek vallen meestal binnen een andere afdeling, zoals een omzetstijging (afdeling verkopen) of de betere benutting van de productielijnen (afdeling productie). Dit punt zat de erkenning van logistiek vroeger in de weg. (Lammers en Sauton, 2003)

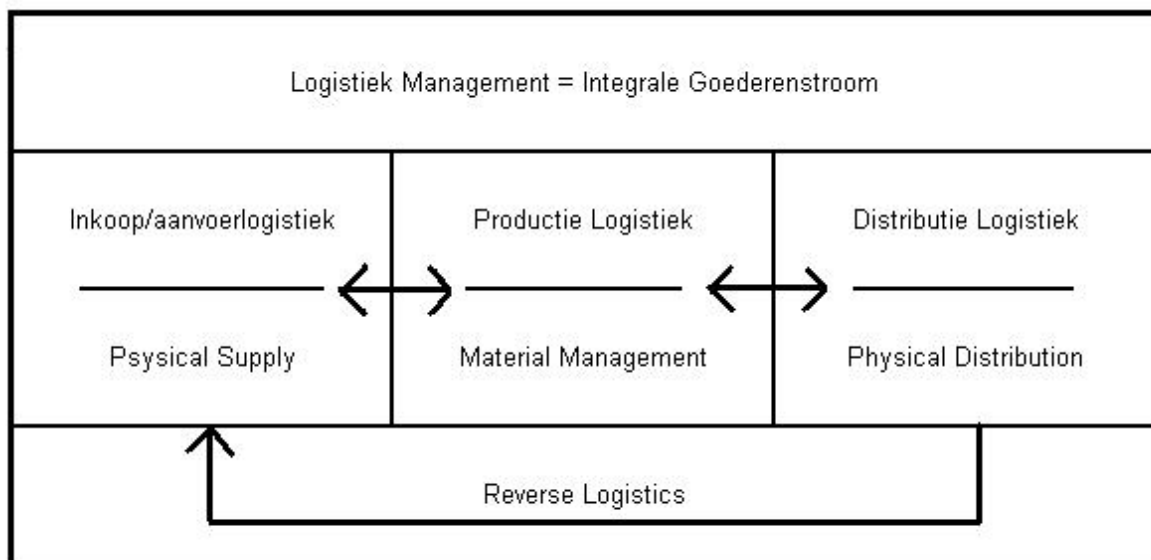
Tegenwoordig wordt meer en meer aandacht geschonken aan de logistieke functie. Activiteiten als vervoer, inkoop, opslag, productie en productontwikkeling worden nu niet meer beschouwd als ondersteunende taken. Dit zijn veelal de taken die ervoor zorgen dat de verschillen in plaats en tijd worden opgevangen, bestaande omdat de locatie van inkoop, productie en levering niet dezelfde zijn. Deze taken maken deel uit van de logistieke inspanningen van ondernemingen en hangen in sterke mate samen met de functies marketing en productie. (Ballou, 1992)

2.3. Wat is logistiek?

De definitie van de 'council of logistics management' luidt als volgt: "Logistiek omvat het plannen, invoeren en besturen van een doelmatige en kostenbesparende verplaatsing en opslag van grondstoffen, voorraden goederen in bewerking en eindproducten. De

overdracht van informatie die aan deze activiteiten van verplaatsing en opslag zijn verbonden, behoort eveneens tot de logistiek. Het logistieke proces begint bij de vindplaats van de grondstoffen en eindigt bij de eindconsument. Logistiek probeert zo goed mogelijk tegemoet te komen aan de wensen van de afnemer." (Center for logistics management, 2007)

De logistieke keten wordt meestal onderverdeeld in vier subsystemen zoals aangegeven in figuur 1. Deze vier subsystemen bestaan uit inkoop/aanvoerlogistiek, productie logistiek, distributie logistiek en reverse logistics. De inkoop- of aanvoerlogistiek betreft het beheersen van de goederenstromen en de daarmee verbonden informatiestromen van de grondstoffen en halffabricaten tot aan het begin van het productieproces. De productie logistiek heeft betrekking op alle activiteiten die gebruikt worden om de producten zo efficiënt en effectief mogelijk naar en door het productieproces te leiden. De efficiënte en effectieve doorstuwing van de goederen- en informatiestromen tussen producenten en afnemers van het afgewerkt product behoren tot het subsysteem distributie logistiek. Reverse logistics tenslotte dient voor de terugstroom van materialen en producten voor hergebruik. (Ploos van Amstel e.a., 1999)



Figuur 1: Terminologie goederenstroombesturing (Van Amstel e.a., 1999)

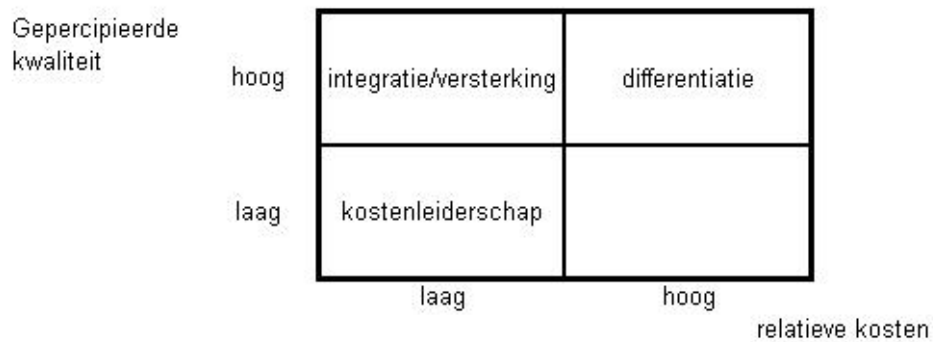
Via een goed beheer van de logistiek wordt getracht de juiste goederen op de juiste plaats, op het juiste moment en in de gewenste staat te leveren. (Lammers e.a., 2006)

De managementtaak houdt in dit op de meest winstgevende of kosteneffectieve manier te bewerkstelligen. Een goede sturing van de logistieke activiteiten is dus zeer belangrijk in deze wereld met toenemende concurrentie in binnen- en buitenland. (Brewer en Hensher, 2001)

2.4. Strategieën in de logistiek

Het plannen van logistieke strategieën is echter een complex proces en het vereist een grondige kennis van hoe de verschillende activiteiten uit de logistieke keten met elkaar samenhangen. De meeste tijd bij het plannen van de strategie wordt besteed aan het zoeken van informatie, omdat slechts beperkt beschikt wordt over nuttige informatie. Hierbij wordt vaak vertrouwd op de informatie waarover de onderneming beschikt. De vier aspecten die aan bod moeten komen bij de strategievorming zijn de klanten, de leveranciers, de concurrenten en de onderneming zelf. (Chan e.a., 2005) Porter (1985) vermeldt ook nog de substituten voor het product dat aangeboden wordt en de mogelijke toetreders als belangrijke aspecten die in overweging moeten genomen worden bij de strategievorming.

De drie gebruikte strategieën in de logistiek, als in andere afdelingen, zijn kostenleiderschap, differentiatie en integratie/versterking (zie figuur 2). Op de verticale as wordt de gepercipieerde kwaliteit weergegeven. Dit geeft aan hoe de afnemers de kwaliteit van de onderneming percipiëren in vergelijking met die van de concurrentie. Wordt hier hoog op gescoord, dan wil dit zeggen dat de afnemers een hoge waardering geven aan het kwaliteitsimago van uw merk, product of onderneming. Op de horizontale as staan de relatieve kosten. Hoe meer naar rechts, hoe hoger uw kosten zijn in vergelijking met die van de concurrenten. (Ploos van Amstel e.a., 1999)



Figuur 2: Drie mogelijke concurrentiestrategieën (Van Amstel e.a., 1999)

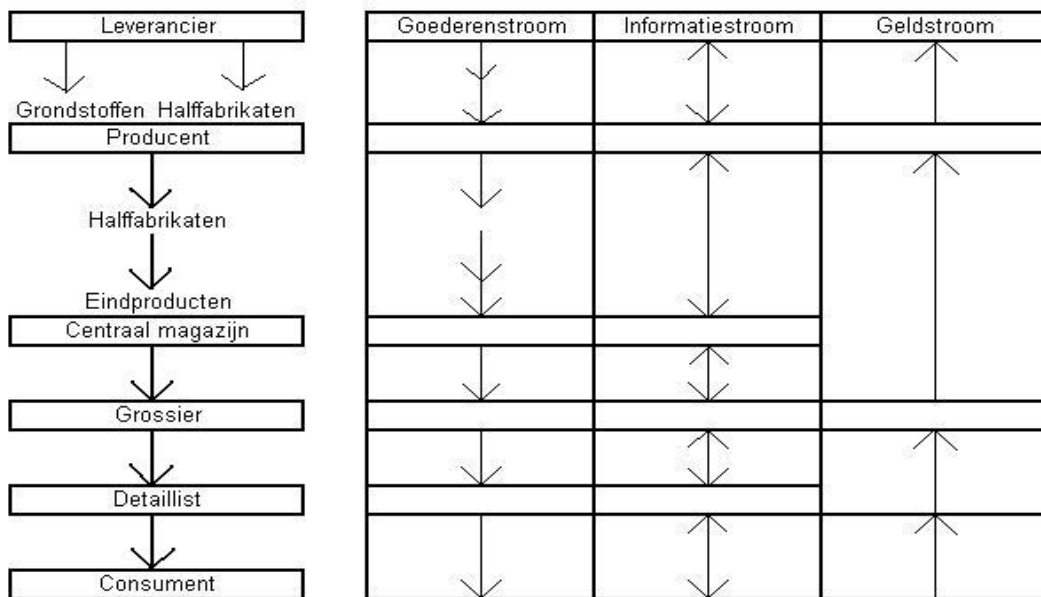
2.5. Het logistiek netwerk

In de wereld van vandaag is logistiek voor alle ondernemingen van wezenlijk belang. Logistiek bevat meer dan het vervoeren van goederen zoals hierboven al besproken is. Voorraadbeheer, orderafwerking, in- en verkoop, magazijnbeheer, materiaalbeheer, verpakken, handhaven van de standaarden op het gebied van klantenservice, aanwijzen van locaties voor opslagplaatsen, de selectie van de transportmethoden en het beheer van het informatiesysteem behoren ook tot de activiteiten van het logistiek netwerk. (Ballou, 1992)

Een geïntegreerde planning en ontwerp van een logistiek netwerk draagt tegenwoordig sterk bij aan de waardecreatie voor de klant. (Ackermann en Müller, 2007) Bij het schatten van een netwerk zijn het niet de vroegere of huidige gegevens die van belang zijn, maar wel een voorspelling van de vraag voor een of meerdere toekomstige jaren. Na het verzamelen van informatie kan deze informatie geanalyseerd worden om zo te komen tot de beste netwerkstructuur. (Ballou, 1992)

De netwerkstructuur geeft aan hoe de goederen doorheen het netwerk bewegen naar de klant. In een logistieke keten bestaan drie belangrijke stromen (zie figuur 3). Allereerst de goederenstroom die loopt van het punt van oorsprong tot aan de levering bij de klant. Deze goederen doorgaan enkele processen zoals opslag, bewerking, ophaling en levering. De tweede stroom is de geldstroom, namelijk de betaling van de goederen als ze van eigenaar veranderen. De informatiestroom tenslotte is tegengesteld aan de

goederenstroom. Dit vereist een logistiek informatienetwerk. (Chiu, 1995) De drie stromen en de componenten binnen een logistiek systeem, zoals magazijnen, afzetkanalen, productievestigingen, voorraden, transportdiensten en informatieverwerkende systemen moeten goed op elkaar afgestemd worden om zo te komen tot een synergie. Beslissingen op één gebied hebben namelijk een invloed op de andere terreinen. Wat goede resultaten oplevert in één schakel uit het netwerk, kan problemen opleveren voor andere schakels. De totale keten is maar zo sterk als de zwakste schakel binnen deze keten. (Lammers e.a., 2006)



Figuur 3: De logistieke keten (Van Amstel e.a., 1999)

Bij het ontwerpen van een netwerk moet ook aandacht besteed worden aan zowel het tijds- als het ruimtelijk aspect. Bij ruimtelijke aspecten gaat het om de locatie, het aantal en de grootte van voorzieningen, en dit hangt samen met de gewenste servicegraad. (Ballou, 1992) Bij het tijdsaspect staat de klantenservice centraal. Klanten wensen hun producten sneller te ontvangen in de gewenste vorm en met een goede kwaliteit. De doorlooptijd, de tijd die verloopt tussen het ingeven van de order en de uiteindelijke ontvangst van het bestelde goed op de gewenste plaats door de afnemer, wordt steeds korter. De gebruikte apparatuur en systemen, samen met de gevolgde werkwijze, de gewenste klantenservice en de ingezette vervoersmodi bepalen grotendeels de snelheid van het afwerken van de orders. (Chiu, 1995)

2.6. Invloeden op de structuur van het netwerk

Zoals hierboven beschreven, levert een kortere doorlooptijd een betere servicegraad. De kortere doorlooptijd beïnvloedt op haar beurt de situering van de netwerkvoorzieningen. Hierbij wordt een afweging gemaakt van de kapitaalkosten, orderafwerkingskosten en transportkosten ten opzichte van de gewenste klantenservice. De servicegraad moet niet dezelfde zijn voor alle producten. (Chiu, 1995)

Het netwerk wordt ook bepaald door de vraag zelf, meer bepaald het niveau van de vraag en de plaatsen waar de vraag het hoogst is. De vraag verschilt van markt tot markt. Als de vraag van de markt verandert, kan het noodzakelijk zijn sommige voorzieningen te sluiten, terwijl elders voorzieningen geopend moeten worden. (Ploos van Amstel e.a., 1999)

De grootte (aantal artikelen) en de afmetingen (hoogte, breedte en diepte) van een order is een derde factor die de opbouw van het netwerk bepaalt. Veel kleine zendingen samenvoegen tot één grote zending, consolidatie genoemd, is meestal voordeliger. Daar deze kleine zendingen niet allemaal tegelijkertijd geschieden, zijn opslagplaatsen in de nabijheid van de afnemers noodzakelijk om deze zendingen tijdelijk op te slaan en om een hoge servicegraad te realiseren. (Ballou, 1992)

2.7. Voordelen van een logistiek netwerk voor ondernemingen

Door de globalisatie van de economie en de verbeterde vervoers- en opslagfaciliteiten zijn hedendaagse ondernemingen meer internationaal gericht. Hierdoor kunnen de voordelen die sommige landen bieden, zoals lagere lonen, goedkopere grond- en hulpstoffen, betere productiviteit en de vestiging van productieplaatsen, magazijnen en distributiecentra op locaties waar voordelen aan verbonden zijn beter benut worden. De goederen worden afgezet op een grotere markt omwille van de verbeterde transportsystemen. Deze verbeterde transportsystemen maakt het ondernemingen mogelijk goederen te vervoeren naar waar dat voorheen niet mogelijk was. De totale afzet van bedrijven kan hierdoor opgevoerd worden. (Krueger, 2003)

De verbeteringen in communicatienetwerken en transport- en opslagsystemen hebben schaalvoordelen met zich meegebracht. Een hogere productie door de grotere afzetmarkten laat een beter gebruik van de productiemiddelen toe, met meestal het voordeel van arbeidsspecialisatie tot gevolg. Verbeteringen in de opslagmogelijkheden laat de aankoop van grotere hoeveelheden toe, hetgeen kostenbesparingen met zich kan meebrengen. De voordelen van de aanschaf van grotere hoeveelheden dient wel afgewogen te worden tegenover de kosten van de extra opslag. (Suga, 2005)

Tijd is het nieuwe strategische wapen dat in de strijd wordt geworpen om een voordeel te behalen ten opzichte van de concurrentie. Een kortere doorlooptijd van het logistieke proces, waarin planning, fabricage, opslag, orderafwerking en transport zit, stelt een onderneming beter in staat om te voldoen aan de veranderende marktomstandigheden. Het zijn dus nu veeleer verkoop en distributie die in aanmerking komen voor deze reductie in tijd. (Ballou, 1992)

3. Activiteiten binnen de logistieke keten

3.1. Vervoer

Vermits vervoer een belangrijk aspect is binnen de logistiek, moet hier zeker aandacht aan geschonken worden. (Chiu, 1995) De grote variatie in de in te zetten vervoersmodi, elk met hun eigen voor- en nadelen, maakt een weloverwogen keuze noodzakelijk over de in te zetten modus of modi. Een andere optie die ondernemingen hier hebben, is het outsourcen van deze activiteit aan een logistieke dienstverlener. Vervolgens moet beslist worden over de afmetingen van zendingen, routeplanning, rittenschema's voor de vervoersmodi en of van consolidatie gebruik gemaakt moet worden. Het hierboven genoemde wordt sterk beïnvloed door allerhande factoren, denkend bijvoorbeeld aan de aard van de goederen, bederfbaar of niet, hoog- of laagwaardig, aan de afstand die afgelegd moet worden en aan de bereikbaarheid van gebieden, om er maar enkele te noemen. (Witlox, 2006) Chiu (1995) stelt verder dat standaardisatie een belangrijk concept is. Dit kan voor besparingen zorgen. Hierbij gaat het voornamelijk om laadeenheden, pallets en opslagrekken.

3.2. Vorraden

Zijn opslag en beheer van goederen nodig in een logistiek systeem? Bij een exact gekende vraag en de mogelijkheid de goederen onmiddellijk te leveren op de gewenste plaats zou dit niet nodig zijn. De vraag is echter nooit exact gekend, dus het zou niet verstandig zijn op deze manier te werken. Zelfs al sluiten vraag en aanbod perfect op elkaar aan, dan zou het nog onmogelijk zijn te werken zonder voorraden vermits variatie kan bestaan in de productie en het vervoer van de goederen. Bedrijven leggen voorraden aan om de vraag en het aanbod beter op elkaar af te stemmen. (Ploos van Amstel e.a., 1999)

De opslag van goederen brengt kosten met zich mee, maar deze kosten zorgen indirect voor besparingen op andere gebieden, wat kan leiden tot meeropbrengsten. Aan het

aanhouden van voorraden zijn enkele voordelen verbonden. Voorbeelden van deze voordelen zijn grotere en langere productieruns, besparingen bij aankoop door hoeveelheidskortingen, meer aankopen bij verwachte prijsstijgingen in de toekomst, het opvangen van de variatie in productie en transport en het opvangen van onvoorziene schokken (staking, natuurrampen, ...). De besparingen van deze vijf voordelen verbonden aan het aanhouden van voorraden moeten opwegen tegen de extra kosten die eraan vasthangen. (Ballou, 1992)

3.3. Materiaalbeheer (Material handling)

Magazijnbeheer en materiaalbeheer hangen in sterke mate samen met het aanhouden van voorraden. Deze activiteiten zijn gerechtvaardigd omdat ze besparingen teweegbrengen bij de kosten van transport, fabricage en inkoop. Ze hebben een invloed op de duur van de bestelcyclus en daarmee de servicegraad. Standaardisering van laadeenheden, een goede inrichting van de opslagplaats en geschikter materiaal voor opslag en verplaatsing van de goederen in de opslagplaats bevorderen de efficiëntie van materiaalbeheer. (Ballou, 1992)

Het proces van materiaalbeheer kan onderverdeeld worden in drie fasen, namelijk inslag, opslag en uitslag. De doelstellingen die worden nagestreefd bij materiaalbeheer zijn een maximale bezetting van de voorziening, beperking van de interne transportafstanden, een zo efficiënt mogelijke uitvoering van materiaalbeheer, de best mogelijke doorstroom van goederen realiseren doorheen de voorziening en voldoende flexibiliteit om met veranderingen te kunnen omgaan. (Esmeijer, 2001)

3.4. Voorzieningen (magazijn, productiehal, distributiecentra)

Klanten, leveranciers en de onderneming zelf maken ook deel uit van de keten. Bij het zoeken naar een locatie voor een voorziening is het belangrijk om deze schakels aan elkaar te linken. Zo kan een betere doorstroom van de goederen doorheen de keten verkregen worden. (Gao e.a., 2006) Ondernemingen moeten beslissen over het aantal,

de plaats en de grootte van de voorzieningen. Deze beslissingen zijn belangrijk vermits hierdoor de vorm, structuur en omtrek van het logistieke systeem bepaald wordt. Bij de bepaling van de locatie wordt vaak gekeken naar één cruciale factor, de economische voordelen verbonden aan een welbepaalde plaats. Bij een dienstverlenende functie is deze factor de toegankelijkheid van de locatie. (Ballou, 1992)

De ruimte-indeling, financiering, het ontwerp van stellingen en de methode van materiaalbeheer zijn de factoren die de afmetingen en inrichting van opslagplaatsen bepalen. Een goede inrichting van voorzieningen (magazijnen, productiehallen en distributiecentra) vermindert niet alleen de kosten, maar het verhoogt ook de productiviteit en de winst. Hierbij wordt gekeken naar de lange termijn doelstelling om te voorzien in een efficiënte tijdelijke opslag in en een efficiënte productenstroom van goederen doorheen de voorziening. (Gao e.a., 2006)

3.5. Het informatiesysteem

Het goed beheer van de logistieke functie vereist een goed informatiesysteem. De gebruikte informatietechnologie moet goed geïntegreerd worden in het beheer van de logistieke functie. (Chiu, 1995) Het informatiesysteem staat het plannen en het besturen van de goederenstroom bij en bestaat uit gegevens, apparaten, personeel en methoden om logistieke problemen op te lossen. De meeste ondernemingen beschikken niet over zulke systemen, waardoor het de taak van de logistiek wordt om de benodigde gegevens te putten uit bronnen, zowel binnen als buiten de onderneming. Deze informatie kan gehaald worden uit verkoopsopbrengsten, productiekosten, voorraadniveaus, magazijngebruik, voorspellingen en transporttarieven. (Ballou, 1992)

3.6. Kosten van een logistiek netwerk

De idee van de totale logistieke kosten is belangrijk binnen het logistieke systeem omdat alles van elkaar afhangt. Ter vereenvoudiging berekenen ondernemingen de totale logistieke kosten door deze kosten uit te splitsen in de subsystemen uit figuur 1.

Allereerst zijn er de fabricagekosten die bestaan uit de fabricagekostprijs, inclusief de kosten van grondstoffen en halffabricaten. De marketingkosten bestaan uit de som van de kosten die de fabrikanten, groothandels en kleinhandels maken om de producten af te zetten. De fysieke distributiekosten ten slotte, worden verder onderverdeeld in voorraadkosten, magazijnkosten, transportkosten en nog enkele overige kosten zoals administratiekosten, kosten van informatievoorzieningen en overheadkosten. Voorraadkosten zijn de kosten voor het bestellen en het beheren van een voorraad, de kosten verbonden aan het aanhouden van voorraden en de kosten van de neen-verkopen, die bestaan indien niet aan de vraag kan worden voldaan. Magazijnkosten hebben te maken met opslag, intern vervoer en verpakking, transportkosten met het externe vervoer vanaf het begin, vervoer van grondstoffen, tot het afleveren van het afgewerkte product bij de klant. (Ploos van Amstel e.a., 1999)

3.7. Klantenservice (Customer service)

Via een logistiek systeem wordt getracht een zo groot mogelijke klantenservice te leveren. (Chiu, 1995) Via een betere klantenservice behalen ondernemingen voordelen ten opzichte van de concurrentie. Een belangrijk onderwerp van de klantenservice is de benodigde tijd om een product op de plaats te bezorgen die de klant wenst. Het opmaken van een bestelling, de verzending van de order, de registratie daarvan en het voor verzending klaarzetten van de bestelde goederen neemt de helft tot twee derde van de totale tijd van de bestelcyclus in beslag. Een goed beheer van deze activiteiten is noodzakelijk om deze cyclus zo kort en betrouwbaar mogelijk te maken. (Boberg e.a., 1999)

3.8. Computer- en andere modellen in een logistiek netwerk

Voor de configuratie van een netwerk wordt tegenwoordig veel gebruik gemaakt van computer- en wiskundige modellen die bewerkingen uitvoeren op grote hoeveelheden gegevens, die in de analyse een rol spelen. Hierbij kunnen volgende doelstellingen worden nagestreefd: beperking van de relevante logistieke kosten zonder aantasting van

de klantenservice, het verhogen van de klantenservice zonder dat de totale logistieke kosten uit de hand lopen en het maximaliseren van de bijdrage die de logistiek aan de ondernemingswinst kan leveren door de maximalisatie van het verschil tussen de opbrengsten en de kosten die voortvloeien uit de klantenservice. Deze modellen helpen bij het zoeken naar een optimale verhouding tussen tegengestelde kostenpatronen, voorkomend bij productie (en/of inkoop), opslag en transport. Hierbij moet ook aan een aantal beperkingen voldaan worden zoals de productiecapaciteit, opslagruimte en klantenservice. (Ballou, 1992)

Vele optimaliseringmodellen maken gebruik van wiskundige formules om tot een oplossing te komen die wiskundig gezien de beste is. De meeste van de deterministische modellen in operationeel onderzoek en managementwetenschappen behoren tot dit type. Verder zijn een groot deel van de optimaliseringmodellen algemeen toepasbaar gemaakt en zijn zij ook beschikbaar in de vorm van computerpakketten. Hieronder worden enkele van de gebruikte technieken besproken. (Ballou, 1992)

3.8.1. Veelgebruikte technieken

Lineaire programmering kent een hele brede toepassing en wordt ook gebruikt voor allerhande logistieke problemen. Bij lineaire programmering zijn alle functies binnen het probleem lineair en moet voldaan worden aan de assumpties van 'proportionaliteit, optelbaarheid, deelbaarheid, zekerheid' ('proportionality, additivity, divisibility en certainty'). Voor de oplossing van lineaire problemen wordt gebruik gemaakt van de (duale) simplex methode (met aangepaste versies voor het transportprobleem, het toewijzingsprobleem en netwerkoptimalisatie), de interior-point benadering en de upper-bound techniek. (Hillier en Lieberman, 2005)

Het transportprobleem en het toewijzingsprobleem zijn twee belangrijke soorten van lineaire programmering. Het transportprobleem is zo genoemd omdat veel van zijn toepassingen proberen te bepalen hoe goederen optimaal vervoerd moeten worden. Het toewijzingsprobleem wordt zo genoemd omdat het een toewijzing doet van 'assignees' om bepaalde taken uit te voeren. Deze 'assignees' bestaan niet enkel uit personen, maar kunnen ook machines en voertuigen zijn om maar enkele mogelijkheden te noemen. De

transportproblemen worden opgelost met een eigen gestroomlijnde versie van de simplex methode, die ook gebruikt wordt voor de toewijzingsproblemen. Binnen deze 'transport' simplex methode kan gekozen worden uit drie alternatieven, zijnde de Noordwesthoekregel, de methode van Vogel en de methode van Russel. Voor de oplossing van toewijzingsproblemen wordt, naast de 'transport' simplex methode, gebruik gemaakt van het Hungarian Algoritme. (Hillier en Lieberman, 2005)

Vele netwerk optimalisatiemodellen zijn eigenlijk speciale soorten van lineaire programmeringproblemen. De presentatie van problemen in de vorm van netwerken komt voor in gebieden als productie, distributie, projectplanning, locaties van voorzieningen, resource management en financiële planning. Netwerk optimalisatieproblemen kunnen opgelost worden met de 'netwerk' simplex methode. Voor de oplossing van netwerk optimalisatieproblemen kan gekozen worden uit het kortste-route probleem, het minimum spanning tree probleem, het maximum flow probleem, het minimum cost flow probleem en van PERT/CPM (program evaluation and review technique/critical path method) methodes. (Hillier en Lieberman, 2005)

Ook dynamische programmering wordt gebruikt voor de oplossing van logistieke problemen. Voor dynamische programmering bestaat echter geen standaard wiskundige formule die een oplossing biedt voor elk probleem. Hier moet voor elk probleem gezocht worden naar de passende vergelijkingen voor het desbetreffende probleem. Binnen dynamische programmering wordt een onderscheid gemaakt naar deterministische problemen en probabilistische problemen. (Hillier en Lieberman, 2005)

Gehele getallen programmering (integer programming) is een speciale vorm van lineaire programmering met de beperking dat de waarde van de variabelen gehele getallen moeten zijn. Als de waarde van slechts enkele variabelen gehele getallen moeten zijn, wordt dit gemengde gehele getallen programmering (mixed integer programming) genoemd en als de variabelen enkel de waarde nul en één kunnen aannemen, wordt gesproken van binaire gehele getallen programmering. Voor de oplossing van gehele getallen programmering problemen kan gebruik gemaakt worden van de 'branch-and-bound' techniek en de 'branch-and-cut' techniek. (Hillier en Lieberman, 2005)

Niet-lineaire programmering wordt gebruikt als de assumptie van lineariteit niet geldt binnen een probleem. De mogelijkheid om alle problemen van dit formaat op te lossen

bestaat echter niet. De oplossingsalgoritmes zijn ontwikkeld voor verschillende types van niet-lineaire programmeringproblemen. De belangrijkste types zijn optimalisatie zonder beperkingen (unconstrained optimization), optimalisatie met lineaire beperkingen (linearly constrained optimisation), kwadratische programmering (quadratic programming), convexe programmering (convex programming), scheidbare programmering (seperable programming), niet-convexe programmering (nonconvex programming), geometrische programmering (geometric programming) en gedeeltelijke programmering (fractional programming). (Hillier en Lieberman, 2005)

Vervolgens worden ook wachtrij- en voorraadmodellen aangehaald. Wachtrijen komen voor als de vraag naar een product en/of dienst de capaciteit om in deze service te voorzien overschrijdt. De toekomstige vraag kan nooit exact voorspeld worden. Wachtrijtheorieën lossen deze problemen niet op, maar geven wel belangrijke informatie door voorspellingen te maken van deze onzekere toekomst. Voorraadmodellen worden gebruikt omdat aan het aanhouden van voorraden vele voordelen verbonden zitten. Hoeveel voorraad moet aangehouden worden, is echter geen eenvoudige beslissing. Dit wordt besproken in het laatste hoofdstuk waar ook gezamenlijke bijvulling van de voorraad (joint replenishment) besproken wordt. (Hillier en Lieberman, 2005)

Naast de hierboven kort aangehaalde technieken bestaan vele andere gebruikte technieken. Enkele belangrijke van deze overige technieken zijn terug te vinden bij de toepassing van simulatie-optimalisatie. In het volgende hoofdstuk worden simulatie en optimalisatie apart besproken als technieken, evenals aangehaald waarom een integratie ervan nuttig kan zijn. In hoofdstuk vijf worden de technieken van simulatie-optimalisatie kort aangehaald, met een uitgebreide bespreking van de methodologie van responsoppervlakken. Deze techniek wordt ook verduidelijkt aan de hand van een voorbeeld.

4. Simulatie-optimalisatie

4.1. Inleiding

In de huidige maatschappij komen allerhande problemen, zowel bedrijfskundig als technisch, voor. Hoe deze problemen in elkaar zitten en welke beslissingen genomen moeten worden om deze problemen op te lossen, zijn vragen waar werknemers dagelijks mee geconfronteerd worden. Deze beslissingsproblemen zijn vaak zeer ingewikkeld. Computers en probleemoplossingmethoden worden vaak gebruikt om tot een oplossing te komen. Deze hulpmiddelen dienen ter ondersteuning van de besluitvorming en het beleid dat, voor problemen in verband met planning en beheersing (logistieke planning, opzet van productiesystemen, transport, routing, voorraadbeheer en dergelijke meer), moet gevolgd worden. Simulatie en optimalisatie zijn twee probleemoplossingmethoden die omgaan met zulke problemen. Veel onderzoek is en wordt nog steeds verricht naar de combinatie van deze twee methoden. De integratie van simulatie en optimalisatie eist echter een zeer grote specifieke kennis van de gebruiker, waar niet iedereen over beschikt. (Boersma e.a., 1995)

4.2. Simulatie

4.2.1. Inleiding

De definitie zoals omschreven bij Kelton e.a. (2007) luidt als volgt: 'Simulatie is het proces van het ontwerpen en het creëren van een (computer)model van een werkelijk of voorgesteld systeem, met doel hierop numerieke experimenten uit te voeren om het systeem en het gedrag van dat systeem beter te leren kennen onder bepaalde condities. Hoewel het gebruikt kan worden om eenvoudige systemen te bestuderen, wordt de volledige kracht van de techniek pas gerealiseerd als we deze gebruiken om complexe systemen te bestuderen.'

Uit deze definitie blijkt dat, als een wiskundig model van een systeem wordt bestudeerd via simulatie, het een simulatiemodel wordt genoemd. Het gedrag van het systeem bij bepaalde waarden van de inputvariabelen wordt geëvalueerd door de output van het simulatiemodel te bestuderen. (Carson en Maria, 1997) Systemen worden bestudeerd om hun prestaties te meten, ze te verbeteren of ze te ontwikkelen indien ze nog niet bestaan. Vooraleer simulatieanalisten overgaan tot het bouwen van een model, definiëren ze eerst hoe het systeem werkt. Hierdoor doen analisten al kennis op over en verschaffen ze al inzichten in de werkelijkheid. Bij simulatie komt dus veel meer kijken dan het bouwen van een model, om hier dan statistische experimenten op uit te voeren, alleen. In elke stap van het project leren analisten bij en de beslissingen die de analist onderweg maakt kunnen grote gevolgen hebben op de significantie van zijn uiteindelijke bevindingen. (Boersma e.a., 1995) Haley en Krishnan (1985) halen aan dat simulatiemodellen gebruik maken van wiskundig-logische relaties om het gedrag van het systeem te beschrijven. Simulatieanalisten laten het systeem van de ene naar de andere staat convergeren volgens enkele goed gedefinieerde regels. Het succes van het model hangt in sterke mate af van de juistheid van de definiëring van het systeem.

4.2.2. Voor- en nadelen

Een eerste en de belangrijkste reden voor de populariteit van simulatie is de mogelijkheid om met zeer complexe modellen van bestaande systemen te kunnen werken. (Ballou, 1992) De verbetering in de kwaliteit/prijs-ratio van computers en de evolutie in de simulatie softwarepakketten hebben simulatie toegankelijk gemaakt voor een groter publiek.

Ook is het in veel gevallen te moeilijk, te kostelijk of gewoonweg onmogelijk om studies uit te voeren op de werkelijke systemen zelf. In deze situaties kunnen bedrijven overgaan tot het bouwen van een model van het werkelijke systeem. Analisten onderzoeken vervolgens deze modellen door er allerlei testen op uit te voeren. Ze stellen allerlei vragen aan het model en gaan vervolgens na hoe het model hierop reageert. Hierdoor beschikken analisten over een grotere vrijheid, waardoor zelfs extreme ideeën kunnen uitprobeerde worden op het model. Dit kan aantrekkelijke

alternatieven blootleggen die waarschijnlijk nooit zouden worden bekomen als enkel het werkelijke systeem werd geanalyseerd. (Kelton e.a., 2007)

Boersma e.a. (1995) vermeldt verder de snelheid waarmee een simulatie uitgevoerd kan worden in vergelijking met de uitvoering hiervan op het werkelijke model en zoals al aangehaald in de inleiding, het leerproces dat in elke stap van het project voorkomt.

Natuurlijk is er ook een keerzijde aan de medaille. Omdat de werkelijkheid vol onzekerheden zit, bevatten systemen veel oncontroleerbare, willekeurige input. Als gebruik gemaakt wordt van simulatieprocessen, moet rekening gehouden worden met deze onzekerheden, zeker als de simulatie over een korte periode verloopt. De simulatiemodellen moeten dus ook deze willekeurige of stochastische inputcomponenten bevatten, wat ertoe leidt dat de output ook willekeurig is. De uitkomsten tussen twee verschillende simulatieruns zullen waarschijnlijk verschillen, ook al wordt er niets aan het model veranderd. Dit maakt de vergelijking tussen verschillende simulatieruns moeilijk. Hoe langer de simulatieruns echter duren, hoe minder variabiliteit tussen de gemiddelde gegevens van de twee simulatieruns zal zitten (convergeert naar een constante). Hoe lang een simulatierun moet duren om voldoende overeenkomst te hebben, is niet eenvoudig te bepalen. (Kelton e.a., 2007)

Bij simulatie gaat het ook veelal over aanvaardbare resultaten. Gebruikers weten niet of betere resultaten behaald kunnen worden als enkel simulatie wordt toegepast. Soms gebruiken bedrijven simulatie terwijl er te weinig kennis beschikbaar is. Dit kan leiden tot grote fouten in de modellen. Als de kennis beperkt is, laat een bedrijf de toepassing ervan beter over aan gespecialiseerde simulatie-experts. (Boersma e.a., 1995)

Lai (2006) vermeldt dat het gebruik van simulatiemodellen voor het meten van de prestaties van het systeem, niet de mogelijkheid biedt deze systemen te verbeteren. Simulatie evalueert gewoon een gegeven scenario.

4.3. Optimalisatie

4.3.1. Inleiding

Bij optimalisatie wordt gebruik gemaakt van exacte wiskundige procedures om verschillende alternatieven te beoordelen. Hierbij wordt dan ook de wiskundig optimale oplossing gegarandeerd. Enkele voorbeelden zijn lineaire-, niet-lineaire, dynamische- en gehele getallen programmering, enumeratie, sequentiemodellen en modellen op basis van differentiaalrekeningen. Deze modellen zijn veelal algemeen toepasbaar en ze zijn geïntegreerd in vele softwarepakketten. (Ballou, 1992)

Optimalisatietechnieken kennen toepassingen in veel domeinen, zoals locatieproblemen, routing, leveranciersselectie en voorraadbeheer om er maar enkele te noemen. Hieronder staan enkele oplossingen die kunnen bekomen worden met behulp van optimalisatiemodellen: minimalisatie van de arbeidskosten, minimalisatie van de idle time van vervoersmodi, het minimaliseren van de transportafstand van goederen binnen voorzieningen (distributiecentra, productieplaatsen, opslagplaatsen), het maximaliseren van de winst en het maximaliseren van het gebruik van de beschikbare ruimte. Deze technieken zijn zeer goed geschikt voor het zoeken naar een unieke optimale oplossing. De benodigde inspanningen en de benodigde computertijd maken ze echter ongepast voor het oplossen van grote ingewikkelde problemen. Verder zijn de oplossingen van deze mathematische modellen niet volledig consistent met de probleemomgeving. (Haley en Krishnan, 1985)

4.3.2. Voor- en nadelen

Bij Powers (1989) vinden we een aantal voordelen verbonden aan deze optimaliseringmodellen. Het garandeert de beste oplossing bij een bepaalde reeks veronderstellingen en gegevens, in tegenstelling tot simulatie. De uitkomsten bij twee verschillende programmeruns zijn dezelfde, waardoor betrouwbare vergelijkingen tussen twee programmeruns gemaakt kunnen worden. Ten slotte zijn de oplossingen, via deze

weg bekomen, meestal goedkoper dan wanneer ze via heuristische weg bekomen worden.

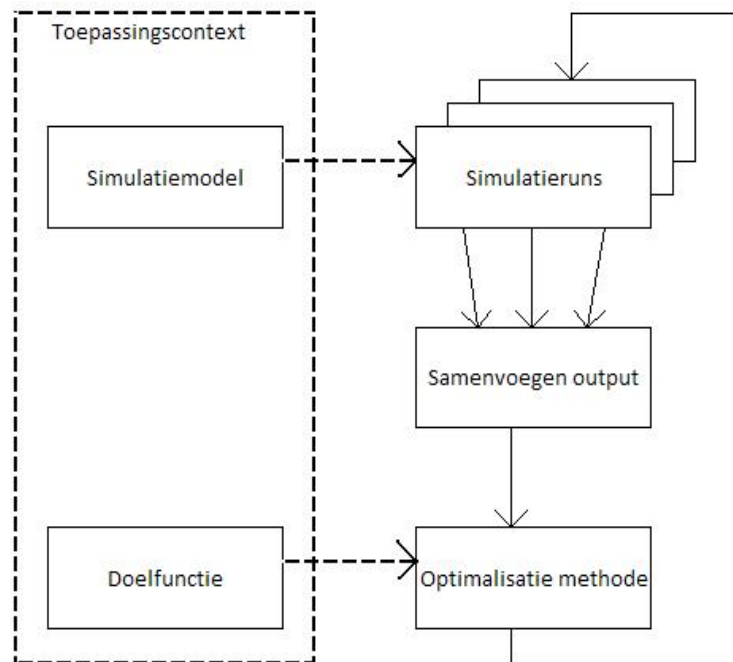
Optimalisatie kent, net als simulatie, nadelen. Het grootste nadeel is het gebrek om de zeer complexe problemen op te lossen binnen een redelijke tijdsperiode. Verder beschikken de computers van tegenwoordig niet over voldoende geheugenruimte om alle gegevens op te slaan. Hoe dichter bij de werkelijkheid wil aangeleund worden met een model, hoe ingewikkelder het model wordt en hoe langer het duurt om tot een oplossing te komen. Een afweging tussen de gewenste kwaliteit die bereikt moet worden (dicht bij de werkelijkheid) en de tijd beschikbaar om tot deze oplossing te komen is noodzakelijk. (Ballou, 1992)

4.4. Integratie van simulatie en optimalisatie

Wanneer veranderingen in bedrijfsprocessen worden voorgesteld met als doel de prestaties van deze processen te verbeteren, kunnen de voorgestelde veranderingen kunstmatig gesimuleerd en geoptimaliseerd worden. De gevoeligheid van het uiteindelijke doel aan deze veranderingen kan onderzocht en gekwantificeerd worden, waardoor het risico van daadwerkelijke implementatie wordt verminderd. Simulatie kan gezien worden als een manier om met onzekerheid om te gaan die gepaard gaat met deze veranderingen, terwijl optimalisatie de manier is om deze onzekerheid te beheren. (Glover e.a., 2006)

Een eenvoudige evaluatie van de prestaties van een systeem is vaak onvoldoende en er is dus geregeld nood aan een grondiger onderzoek in de vorm van simulatie-optimalisatie. Simulatie-optimalisatie kan gedefinieerd worden als: "Het proces van het vinden van de beste waarden voor de inputvariabelen, en dit uit alle mogelijke waarden, zonder expliciet alle mogelijke waarden te onderzoeken. De werking van het systeem wordt vervolgens geëvalueerd op basis van de output van de simulatie. Simulatie-optimalisatie probeert met zo weinig mogelijk middelen (tijd, aantal uitvoeringen, ...) een optimale of bijna optimale oplossing te behalen." (Carson en Maria, 1997) Via simulatie alleen kunnen processen niet verbeterd worden en weten gebruikers niet of er betere oplossingen bestaan. Hiervoor wordt optimalisatie gecombineerd met

simulatie, waarbij een analist via optimalisatie zoekt naar een set van specificaties voor het model die tot de optimale werking van dit model leiden. (Laguna e.a., 2004) Glover e.a. (2006) vermelden dat het voor een analist niet mogelijk is alle mogelijke scenario's te simuleren. Dit komt omdat een groot aantal combinaties gevormd kunnen worden met de parameters, en deze parameters kunnen ook veel verschillende waarden aannemen. Een leidraad om goede oplossingen te vinden is dus noodzakelijk. Anderzijds komen in de werkelijkheid vele complexe problemen voor die niet opgelost kunnen worden via wiskundige modellen, die aan de basis liggen van pure optimalisatiemethoden. Zuivere optimalisatiemodellen op zich zijn niet geschikt om alle ingewikkeldheden en de dynamica van een systeem te vatten, waardoor toevlucht gezocht moet worden in simulatie, dat moeite heeft de beste oplossingen te vinden. Door de combinatie van de twee methoden kan dit probleem opgelost worden.



Figuur 4: Simulatie-optimalisatie cyclus (Gehlsen en Page, 2001)

Figuur 4 laat een simulatie-optimalisatie cyclus zien. Startend van een gegeven of willekeurig gegenereerde set van waarden voor de inputvariabelen, wisselen simulatie en optimalisatie elkaar af tot er voldaan is aan een voorwaarde die het proces doet stoppen (bijvoorbeeld een verbetering in de oplossing die kleiner is dan een vooropgestelde limiet of na x aantal simulatieruns). Elke applicatie bezit een eigen specifieke doelfunctie. Aan

de hand van deze doelfunctie wordt de output van het simulatiemodel, voor de gebruikte waarden van de inputparameters, geschat. Vanuit het standpunt van een simulatieanalist zit optimalisatie rond het simulatiemodel; het ontvangt de bekomen resultaten van het simulatiemodel, evalueert deze output en genereert nieuwe waarden voor de inputvariabelen van het model. Vanuit het standpunt van optimalisatie wordt het model gezien als een zwarte doos die een complexe functie evalueert die niet in een gesloten vorm gegeven kan worden. Het transformeert de input, die elk een ander scenario voorstellen, naar output die dan vergeleken wordt met de waarden van de doelfunctie. (Gehlsen en Page, 2001)

4.5. Barrières en toekomst

4.5.1. Barrières

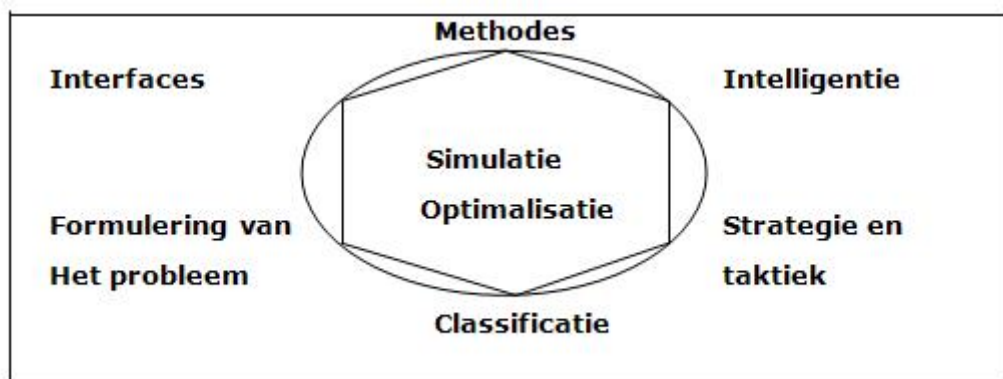
Ondanks het succes van verscheidene simulatie-optimalisatie pakketten, bestaan vele technische hindernissen en barrières voor breder gebruik hiervan. Snelheid is hieruit de belangrijkste. Zelfs met de verbeteringen in computersnelheid blijft het gebruik van simulatie om de prestatie van een enkel systeem te evalueren zeer tijdrovend. De evaluatie van talrijke systemen op zoek naar het beste systeem vermenigvuldigt deze last. Een andere barrière voor een breder gebruik van simulatie-optimalisatie bestaat uit het gebrek aan kennis over de middelen of over de mogelijke voordelen aan de kant van de gebruiker. Dit verruimt ons perspectief, waar de nadruk op het probleem van zoekmethoden en snelheid ligt, naar een even moeilijk probleem van het opleiden van de gebruikers en het overtuigen van het publiek van het nut van simulatie-optimalisatie. Een andere belangrijke uitdaging is deze van stochastische ruis. Simulatie handelt namelijk veel met situaties waar variabiliteit deel uitmaakt van het probleem. Hoe kan iemand weten of een bepaalde zoektechniek niet misleid wordt door deze ruis? Hoe kan iemand weten of een systeem dat het beste lijkt ook echt het beste is, wanneer er veel variatie in het probleem zit? (Boesel e.a., 2001)

4.5.2. Toekomst

Simulatie-optimalisatie, het gebruik van zoekmethoden om waarden te vinden voor inputparameters die de output van een gesimuleerd systeem verbeteren, is de laatste jaren gegroeid.

Voor de toekomst van simulatie-optimalisatie is er echter zeker nog plaats voor verbeteringen. De meerderheid van de gepubliceerde werken over simulatie-optimalisatie richt zich op één domein van simulatie-optimalisatie zonder het begrip in zijn geheel te overwegen. Er moet een raamwerk gemaakt worden dat onderzoek en ontwikkeling over alle domeinen (middelen, technieken, strategie) verenigt. De synergie die hierdoor gecreëerd wordt, kan leiden tot betere simulatie-optimalisatie middelen voor gebruikers. (Bowden en Hall, 1998)

Hierbij worden zes verschillende domeinen bekomen waarop de aandacht moet gevestigd worden in de toekomst om simulatie-optimalisatie middelen te ontwikkelen. Deze zes domeinen zijn terug te vinden in figuur 5.



Figuur 5: De zes domeinen voor de toekomst (Bowden en Hall, 1998)

Het domein 'formulering van het probleem' richt zich op het opstellen van de doelfunctie en beperkingen. Deze twee worden gebruikt om de optimalisatietechniek te gidsen. Een slecht geformuleerd probleem kan namelijk de effectiviteit en de efficiëntie van de beste techniek ontkennen. Hulpmiddelen om de gebruiker te helpen bij het opstellen van de doelfunctie en de beperkingen zijn noodzakelijk. (Bowden en Hall, 1998)

Het domein 'methodes' richt zich op de gebruikte methoden om gesimuleerde systemen te optimaliseren. Het meeste onderzoek gaat uit naar dit domein. Er worden veel verbeteringen voor optimalisatie algoritmen voorgesteld die de prestaties van deze methode verbeteren voor een bepaalde situatie. (Bowden en Hall, 1998)

Het domein 'classificatie' richt zich op de classificatie van een gegeven optimalisatieprobleem. Dit is belangrijk om de juiste optimalisatietechniek en -strategie te selecteren. Classificatie hangt af van het type beslissingsvariabelen, het aantal beslissingsvariabelen, de variatie in de output van het gesimuleerde model en het aantal beschikbare uitvoeringen van het simulatiemodel. (Bowden en Hall, 1998)

Het domein 'strategie en tactiek' richt zich op het gebruik van simulatie-optimalisatie om zo efficiënt mogelijk gebruik te maken van de computermiddelen en om de nauwkeurigheid van de optimale oplossing te verhogen. Strategie houdt zich dan bezig met het selecteren van de optimalisatiemethode voor een bepaalde klasse van problemen. Tactiek beschouwt het gebruik van metamodellering, variatiereductie technieken en dergelijke meer om de efficiëntie en de nauwkeurigheid van het onderzoek te verbeteren. (Boesel e.a., 2001)

Het domein 'intelligentie' beschouwt de intelligentie die in de oplossingstechniek zit om de strategische benadering te selecteren die gebruikt zal worden voor de optimalisatiestudie. Het beschouwt ook de intelligentie die het tactisch gebruik van enkele hulpmiddelen, gebaseerd op de probleem classificatie, gidst. (Boesel e.a., 2001)

Het domein 'interfaces' richt zich zowel op de interface tussen de optimalisatietechniek en de gebruiker als op de interface tussen de optimalisatietechniek en het simulatiemodel. Aangezien simulatie-optimalisatie hulpmiddelen moeten ontworpen worden voor de algemene gebruiker, zijn effectieve interfaces nodig voor zowel de gebruiker als voor het model van de gebruiker. (Bowden en Hall, 1998)

5. Simulatie-optimalisatie technieken

5.1. Inleiding

“Simulaties met behulp van een computer zijn duur en tijdrovend. Als het via de combinatie van optimalisatie met simulatie mogelijk is oplossingen van lage kwaliteit snel buiten beschouwing te laten, kan de oplossingsruimte intensiever onderzocht worden. Kwaliteit is hier gebaseerd op de maatstaf die geoptimaliseerd wordt. Hierdoor kunnen mogelijks de tijd en de kosten van het proces verlaagd worden.” (Azadivar, 1999)

Een simulatie-optimalisatie probleem is een optimalisatieprobleem waarbij simulatiemodellen gebruikt worden als de doelfunctie en/of beperkingen voor het optimaliseren van complexe stochastische systemen. Binnen simulatie-optimalisatie bestaan een aantal technieken die hieronder kort aangehaald worden. (Azadivar, 1999)

De mogelijkheid beperkingen te specificeren is een belangrijke eigenschap binnen simulatie-optimalisatie. Aan de hand van deze beperkingen kan namelijk nagegaan worden of een bepaalde oplossing binnen het aanvaardingsgebied ligt of niet. Hierdoor wordt geen tijd verspild aan het werken met proefoplossingen die buiten dit aanvaardingsgebied liggen. De beperkingen kunnen uitgedrukt worden als wiskundige functies of kunnen gebaseerd zijn op een aantal logische uitspraken. In de context van optimalisatie worden ze meestal uitgedrukt op basis van inputparameters. (April e.a., 2003)

Een groot aantal belangrijke benaderingen hebben veel aandacht gekregen in de literatuur rond simulatie-optimalisatie. Vier belangrijke categorieën van simulatie-optimalisatie methoden kunnen onderscheiden worden: stochastische benadering ‘stochastic approximation’ (gradient-based en random search algoritmen), metaheuristieken en algoritmen gebaseerd op de evolutietheorie, de sample path methode en de methodologie van responsoppervlakken. (Andrad’ottir e.a., 2000)

De set-up tijd van deze benaderingen varieert en is afhankelijk van de benodigde hoeveelheid kennis over de uit te voeren simulatie. Elke benadering bezit zijn eigen

(interne) parameters die zodanig moeten afgesteld worden dat een goede prestatie behaald wordt. (Waziruddin e.a., 2004)

5.2. Stochastische benadering

Stochastische benadering refereert naar een klasse methoden die gebruikt kan worden om simulatie-optimalisatie problemen op te lossen. Wij behandelen hier de gradient-based en de random search methoden. (Hillier en Lieberman, 2005)

5.2.1. Gradient-based search

Van de doelfunctie, die de vorm heeft zoals in (1), wordt verwacht dat ze afleidbaar is. Hierdoor bezit de doelfunctie een gradiënt, genoteerd als $\nabla f(\mathbf{x})$, in elk punt $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. De gradiënt voor een specifiek punt $\mathbf{x} = \mathbf{x}'$ is de vector wiens elementen de respectievelijke partiële afgeleiden zijn die geëvalueerd worden in $\mathbf{x} = \mathbf{x}'$. De formule voor de berekening van de gradiënt is weergegeven in (2). (Hillier en Lieberman, 2005)

$$(1) \quad \min f(\mathbf{x}) \text{ of } \max f(\mathbf{x})$$

$$(2) \quad \nabla f(\mathbf{x}') = (\partial f / \partial x_1, \partial f / \partial x_2, \dots, \partial f / \partial x_n)^1 \quad \text{waar } \mathbf{x} = \mathbf{x}'$$

Gradient-based search methoden gebruiken deze gradiënt van de doelfunctie om een optimale oplossing te vinden. De oplossing kan evolueren naar oneindig veel mogelijke richtingen. Deze richtingen komen overeen met de mogelijke proportionele ratio's waaraan de respectievelijke variabelen kunnen veranderd worden. Het doel van deze veranderingen is uiteindelijk een punt te bereiken waar alle partiële afgeleiden nul bedragen. Het is dus logisch de waarden van de partiële afgeleiden te gebruiken om de zoekrichting te bepalen. (Hillier en Lieberman, 2005) Specifiek is het zo dat, met de huidige beste waarden voor de inputvariabelen, de waarden van de inputvariabelen veranderen in de gradient richting. Praktisch gezien ligt het succes van deze methode in

¹ ∂ staat voor het teken van de eerste afgeleide

de kwaliteit van de gradient estimator. Deze gradient estimators kunnen via een aantal benaderingen, implementeerbaar in simulatie, bepaald worden. Dit zijn brute-kracht finite differences, simultaneous perturbations, perturbation analysis, the likelihood ratio/score function method en weak derivatives. (April e.a., 2005)

Gradient-based searches vallen echter meestal op lokale optima, omdat deze techniek in zijn zoektocht enkel afhangt van lokale waarden van de doelfunctie. De techniek werkt goed in hoogdimensionale ruimtes, als deze ruimtes geen lokale optima bezitten en er dus slechts één duidelijk optimum is. Extra dimensies betekent natuurlijk ook dat het moeilijker wordt ervoor te zorgen dat geen lokale optima bestaan, wat de zoektocht naar een oplossing wel eens vast zou kunnen zetten. Het aantal dimensies bepaalt dus mede de complexiteit van de techniek. (Waziruddin e.a., 2004) Een ander nadeel van gradient-based search is dat deze momenteel toepasbaar is op problemen met continue variabelen, niettegenstaande recente pogingen het ook toe te passen op problemen met discrete variabelen. Verder kan er voor het schatten van de gradients al kennis nodig zijn van het onderliggende model en is de toepasbaarheid van zulke gradient-based estimators vaak probleemafhankelijk. (April e.a., 2005)

5.2.2. Random Search

In tegenstelling tot gradient-based procedures richten random search algoritmen zich voornamelijk op problemen met discrete variabelen. Net zoals bij gradient-based procedures gaat random search iteratief van de huidige beste waarden voor de inputvariabelen (kandidaat-oplossing) naar de volgende. Maar in plaats van gebruik te maken van de gradient, wordt hier overgegaan van de ene naar de andere oplossing door een willekeurig punt te selecteren uit de omgeving van de huidige kandidaat oplossing. Elke iteratie van dit algoritme berekent dus de waarde van de doelfunctie voor twee naburige punten, die toegelaten zijn, via simulatie en het alternatief dat het beste resultaat levert gaat verder naar de volgende iteratie. (Andrad'ottir, 1998)

Twee factoren die het random search algoritme in de context van simulatie-optimalisatie definiëren zijn: hoe de volgende kandidaat-oplossing gekozen wordt en hoe bepaald

wordt wat de huidige beste oplossing is (deze huidige beste oplossing zit niet noodzakelijk in de huidige iteratie). (April e.a., 2005)

Het random search algoritme is theoretisch bewezen. Dit bewijs is echter minder belangrijk in de praktijk, waar het noodzakelijker is oplossingen te vinden van hoge kwaliteit binnen een redelijke tijdsduur om zo te convergeren naar het optimum in een aantal stappen. (April e.a., 2003)

5.3. Metaheuristieken en evolutietheorie

5.3.1. Evolutietheorie

De meeste optimalisatietechnieken die geïntegreerd zijn in commerciële simulatiepakketten, zijn gebaseerd op evolutietheorieën. Evolutietheorieën onderzoeken de oplossingsruimte door een gevonden verzameling proefoplossingen te laten evolueren naar een nieuwe proefoplossing. Deze nieuwe proefoplossing komt voort uit de combinatie van twee of meer oplossingen die in de huidige verzameling van oplossingen zitten. De transformatie van één oplossing naar een nieuwe proefoplossing wordt ook beschouwd in deze benaderingen. Het grote voordeel van deze evolutionaire benadering is dat ze de mogelijkheid bezit een groter gebied van de oplossingsruimte te doorzoeken, en dit aan de hand van een kleiner aantal evaluaties van de doelfunctie (of -functies). In de context van simulatie-optimalisatie staat deze evaluatie gelijk aan het uitvoeren van een simulatiemodel. Het is dus belangrijk dat in de vroege stadia van het onderzoek oplossingen worden gevonden van een goede kwaliteit. De procedure, om vanuit een oplossing te evolueren naar een nieuwe proefoplossing, is namelijk enkel effectief als het startpunt al dicht bij de oplossing van een goede kwaliteit ligt. (April e.a., 2003)

5.3.2. Metaheuristieken

Een metamodel is een algebraïsch model van de simulatie. Bij metamodellering wordt dus gebruik gemaakt van wiskundige functies om de relatie tussen afhankelijke en

onafhankelijke variabelen weer te geven. Hierdoor kunnen bijna optimale oplossingen geïdentificeerd worden in een korte tijd, zonder beperkt te zijn door onrealistische veronderstellingen. Waar deze relatie niet bepaald kan worden, worden methodologen gebruikt om bijna optimale oplossingen te identificeren. In het algemeen zijn meer uitvoeringen en dus meer tijd nodig om deze bijna optimale oplossingen te vinden. (Lai, 2006)

Een metaheuristiek is een algemene oplossingsmethode, die een algemene structuur en richtlijnen voor de te volgen strategie verstrekt om een heuristische methode voor een bepaald systeem te ontwikkelen. De procedure van de heuristische methode is een iteratief algoritme, waarbij in elke iteratie wordt gezocht naar een nieuwe oplossing die misschien beter is dan de beste oplossing die tot dan toe gevonden is. Een belangrijke eigenschap van metaheuristicen is hun mogelijkheid te ontsnappen aan een lokaal optimum. (Hillier en Lieberman, 2005)

Vier metaheuristicen zijn met veel succes toegepast bij simulatie-optimalisatie: tabu search, simulated annealing, genetic algorithms en scatter search. Van deze vier zijn het vooral tabu en scatter search die hebben bewezen zeer effectief te zijn. (April e.a., 2005)

5.3.2.1. Tabu search

Bij de toepassing van tabu search wordt gebruik gemaakt van een lokale zoekprocedure. Zo wordt eerst gezocht naar een lokaal optimum. Een belangrijke eigenschap van tabu search is dat het de mogelijkheid heeft te ontsnappen uit dit lokaal optimum en het onderzoek verder te zetten. Het zet het onderzoek verder door slechtere oplossingen toe te laten in de buurt van het gevonden lokaal optimum. Eens een punt bereikt wordt waar opnieuw betere oplossingen gevonden worden dan de huidige proefoplossing, start de lokale zoekprocedure opnieuw, op zoek naar een nieuw lokaal optimum. Het gevaar van deze techniek ligt erin dat, als een slechtere oplossing gevonden is dan het lokale optimum, het proces onmiddellijk in de stap erna wil terugkeren naar dit lokale optimum. Om te voorkomen dat er zou teruggekeerd worden naar een eerder onderzochte oplossing, maakt tabu search gebruik van een tabu list waar bewegingen ontstaan die niet mogen uitgevoerd worden (tabu moves). Deze tabu moves worden enkel dan toegelaten

wanneer de gevonden oplossing beter is dan de beste tot dan toe gevonden oplossing. (Hillier en Lieberman, 2005)

5.3.2.2. Simulated annealing

Deze benadering baseert zich voornamelijk op het vinden van het gebied waar het globale optimum zich bevindt. Aangezien dit globaal optimum zich overal in het toegelaten gebied kan bevinden, ligt de nadruk in het begin op het nemen van zoveel mogelijk stappen in willekeurige richting om zoveel mogelijk van dit gebied te onderzoeken. Gezien de meeste aanvaarde stappen beter zijn dan de voorgaande oplossing, gaat de zoektocht zich uiteindelijk richten op die gebieden van de toegelaten regio waar de beste waarden zich bevinden. De nadruk komt dus meer en meer te liggen op het verbeteren van de oplossing door een steeds grotere hoeveelheid slechtere oplossingen te verwerpen. Het gaat in elke iteratie, net als bij tabu search, over van de huidige oplossing naar een nieuwe oplossing in de directe omgeving van de huidige oplossing. Het verschil met tabu search ligt erin hoe deze nieuwe oplossing geselecteerd wordt. (Hillier en Lieberman, 2005)

Een belangrijke eigenschap bij het opzetten van een simulated annealing algoritme voor een optimalisatieprobleem, is het bepalen van een gepast 'temperature schedule' om te gebruiken. Deze schedule moet zowel een initiële waarde voor T^2 vastleggen, die relatief groot is, als de steeds kleinere waarden voor deze T als het algoritme verder gaat. Ook het aantal iteraties per T wordt hier bepaald. De keuze van deze waarden van T waken over de hoeveelheid willekeur die er in het proces zit voor het aanvaarden van slechtere oplossingen. Hoe lager de waarde van T , hoe moeilijker het voor slechtere oplossingen dan de huidige oplossing wordt om aanvaard te worden. (Waziruddin e.a., 2004)

² T is een parameter die de geneigdheid meet om de huidige kandidaat te gebruiken als de volgende proefoplossing, als deze kandidaat geen verbetering is van de huidige proefoplossing

5.3.2.3. Genetische algoritmes (genetic algorithms)

Genetische algoritmes simuleren de principes van biologische evolutie voor optimalisatie. Het geeft geen garantie dat het optimum gevonden wordt, maar het gaat op zoek naar elementen in een gegeven ruimte die goed zijn in termen van een bepaalde maatstaf. (Gehlsen en Page, 2001) In plaats van te werken met één enkele proefoplossing per keer, werken we nu met een hele verzameling van proefoplossingen. Binnen elke iteratie van een genetisch algoritme bestaat de populatie uit een set van proefoplossingen die dan onderzocht worden. Sommige van de jongste leden van de populatie worden zelf 'ouders'. Deze 'ouders' worden per twee aan elkaar gekoppeld. Hier komen 'kinderen' uit voort die sommige eigenschappen van beide 'ouders' delen. Aangezien het voornamelijk de sterkste leden van de populatie zijn die 'ouders' worden, heeft een genetisch algoritme de neiging steeds betere populaties van proefoplossingen te genereren als het proces verder loopt. Mutaties komen soms ook voor zodat sommige 'kinderen' eigenschappen verkrijgen die geen van beide 'ouders' bezitten. Hierdoor kan een genetisch algoritme nieuwe, en misschien wel betere delen van het toegelaten gebied onderzoeken. Uiteindelijk zou deze 'survival of the fittest' een genetisch algoritme moeten leiden naar een oplossing die tenminste bijna optimaal is. (Hillier en Lieberman, 2005) Het idee achter genetische algoritmes is dus dat nieuwe elementen gegenereerd moeten worden uit de combinatie van enkele bestaande elementen, op mutaties na. (Glover e.a.,1998)

5.3.2.4. Scatter Search

Scatter search is ontstaan in de jaren '70 en heeft ook geleid tot het ontstaan van tabu search. Deze twee methoden zijn sterk complementair en worden vaak samen gebruikt. Scatter search is een evolutionair algoritme dat oplossingen genereert door andere oplossingen te combineren. Het is ontworpen om te werken op een set van punten, referentiepunten genoemd, die goede oplossingen vormen uit vroegere oplossingen. De benadering produceert systematisch combinaties van referentiepunten om tot nieuwe punten te leiden. Het proces is georganiseerd om (1) informatie te halen uit deze combinatie van punten die niet kan gehaald worden uit de originele punten afzonderlijk, (2) voordeel te halen uit heuristische oplossingsmethoden (om de geproduceerde

combinaties te evalueren en actief naar nieuwe punten te zoeken) en (3) gebruik te maken van specifieke strategieën om deze nieuwe combinaties te vormen in plaats van op een willekeurige manier. (April e.a., 2005)

5.4. Sample path optimalisatie

Bij simulatie wordt in het algemeen beschikt over een a priori kennis dat er een deterministische functie $X_\infty(\theta)$ bestaat zodat de functies X_n bijna zeker stapsgewijs convergeren naar deze X_∞ als $n \rightarrow \infty$. Wanneer een bepaald sample punt ω vastgelegd wordt, wordt dit genoteerd als $X_n(\omega, \theta)$ om de afhankelijkheid van het sample point aan te tonen. Het is vervolgens de bedoeling deze deterministische functie te optimaliseren die gebaseerd is op n willekeurige variabelen, waar n de grootte van de sample path is. Natuurlijk kan in het algemeen X_∞ niet geobserveerd worden, maar enkel $X_n(\theta)$ voor een bepaalde (eindige) n en een bepaalde θ . Sample-path optimalisatie legt een n en een sample ω vast om vervolgens deterministische optimalisatiemethoden te gebruiken om θ_n^* te bepalen en de waarde van $X_n(\omega, \cdot)$ te vinden. Deze θ_n^* wordt dan gebruikt om X_∞ te minimaliseren. (Gurkan e.a., 1994)

Sample path optimalisatie dankt zijn naam aan het feit dat de geschatte optimale oplossing die het vindt, gebaseerd is op een deterministische functie die gebouwd is uit één verkregen sample path, gegenereerd uit een simulatiemodel. In het algemeen moet n groot zijn opdat het benaderende model dicht bij het originele optimalisatieprobleem aanleunt. (Andrad`ottir, 1998).

5.5. Methodologie van responsoppervlakken

Een responsoppervlak is een numerieke voorstelling van de functie die het simulatieproces vertegenwoordigt. Dit responsoppervlak wordt bekomen door de antwoorden, die het resultaat zijn van de uitvoering van het simulatiemodel voor een set gespecificeerde waarden van de inputparameters, bij te houden. (Kim en Ólafsson, 2002)

De methodologie van responsoppervlakken zoekt naar de combinatie van de inputwaarden die de simulatieoutput optimaliseren. (Angün e.a., 2002) De methodologie van responsoppervlakken is een optimalisatiemiddel, bestaande uit een verzameling van wiskundige en statistische technieken die nuttig zijn voor de benadering en optimalisatie van stochastische functies. Deze technieken worden gebruikt om de optimalisatiefunctie te schatten en om zoekrichtingen te vinden naar subregio's van het toegelaten gebied waar verbeterde en mogelijk optimale oplossingen kunnen gevonden worden. De methodologie van responsoppervlakken is gebaseerd op de benaderingen, door functies van een lage orde (1^{ste} of 2^{de}), van de doelfunctie binnen een kleine subregio van het toegelaten gebied. Door gebruik te maken van regressie-analyse op een aantal observaties van de stochastische doelfunctie, worden de beste lokale oplossing en een zoekrichting waar verbeteringen mogelijk zijn, bepaald. De stochastische functie wordt daarom geëvalueerd op een aaneenschakeling van punten. (Dekker e.a., 2004)

Simulatie-modellen zijn onderworpen aan een onbekende stochastische fout. Een minimalisatieprobleem zoekt naar de inputparameters die in de minimale outputwaarde resulteren. In het algemeen bestaat de procedure voor responsoppervlakken uit twee fasen. In de eerste fase wordt de doelfunctie lokaal benaderd door functies van de eerste orde, in de tweede fase wordt de doelfunctie benaderd door functies van de tweede orde. In beide fasen wordt een subregio van het toegelaten gebied gedefinieerd die van belang is. Voor deze benaderingen van de doelfunctie wordt de stochastische doelfunctie voor een aantal punten geëvalueerd. Wanneer het model van de eerste orde als geschikt wordt beschouwd, wordt de 'steepest ascent/descent'-procedure toegepast om een nieuwe interessante regio te vinden. Als het model van de eerste orde niet geschikt is, gaat de methodologie van responsoppervlakken over naar de tweede fase. Wanneer dit model van de tweede orde geschikt is, moet een stationair punt gevonden en geclassificeerd worden en moet een gepaste actie ondernomen worden. Gewoonlijk wordt het algoritme beëindigd en wordt het stationaire punt doorgegeven aan de gebruiker. (Dekker e.a., 2004)

Het identificeren van een onvolledige set beslissingsvariabelen en het er niet in slagen de juiste beperkingen te formuleren op een bepaalde set van beslissingsvariabelen zijn twee factoren die kunnen leiden tot misleidende relaties. (Waziruddin e.a., 2004)

Technisch gezien is de methodologie van responsoppervlakken een stapsgewijze heuristiek die verschillende lokale (sub)regio's van het volledige toegelaten gebied van het simulatie-model onderzoekt. De focus gaat hier uit naar de eerste stap, die de functie van de eerste orde zoekt. Deze stap gebruikt de gewone kleinste kwadraten (ordinary least squares, OLS) en schat het 'steepest ascent/descent'-pad. (Angün e.a., 2002) Bij Fleming e.a. (2002) staat de procedure uitgewerkt. Het verband tussen de van belang zijnde 'respons'-variabele (y) en de voorspellingsvariabelen ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$) kan exact gekend zijn. Hierdoor is het mogelijk het systeem als volgt te beschrijven:

$$y = g(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \epsilon \quad (1)$$

waar ϵ de fout van het model voorstelt, die metingfouten en andere variabiliteit (noise, ...) inhoudt. Deze ϵ is normaal verdeeld met een gemiddelde gelijk aan nul en een variantie van σ^2 . In het algemeen wordt deze functie g benaderd met een empirisch model van de vorm

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \epsilon \quad (2)$$

waar f een functie van de eerste of de tweede orde is. Dit is het model van het responsoppervlak. In de methodologie van responsoppervlakken worden de variabelen ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$) omgevormd tot gecodeerde variabelen (x_1, x_2, \dots, x_k) die dimensieloos zijn met een gemiddelde nul en dezelfde standaardafwijking. De 'respons'-functie wordt nu:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (3)$$

De succesvolle toepassing van de methodologie van responsoppervlakken hangt af van de identificatie van een geschikte benadering voor f . Dit zal over het algemeen een model zijn van eerste orde (4) of een model van de tweede orde (5) met de vormen:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k, \quad (4)$$

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j. \quad (5)$$

Het kan echter soms nodig zijn een benaderende functie te gebruiken met een orde groter dan twee. De methodologie van responsoppervlakken is ook nauw verbonden met regressie-analyse. Als bijvoorbeeld het model van de eerste orde wordt beschouwd, bestaan de β -termen uit een ongekende reeks van parameters die geschat kunnen worden door experimentele systeemdata te verzamelen. Deze gegevens kunnen afkomstig zijn van fysieke experimenten of eerder ontwikkelde dynamische computermodellen. De reeks van parameters kan geschat worden door regressie-analyse gebaseerd op deze experimentele data. De methode van de kleinste kwadraten wordt veelal gebruikt om deze regressie-coëfficiënten te schatten. Met $n > k$ bij de beschikbare 'respons'-variabele, wat y_1, y_2, \dots, y_n geeft, zal elke waargenomen respons een observatie hebben op elke regressie-variabele, waar x_{ij} de i^{de} observatie van de variabele x_j aanduidt. Veronderstel dat ϵ ('fout') een verwachte waarde van nul heeft ($E(\epsilon) = 0$), een variantie ($\text{Var}(\epsilon)$) van σ^2 en dat de (ϵ_i) ongecorreleerde willekeurige variabelen zijn, dan kan het model voorgesteld worden in termen van de observaties:

$$\begin{aligned} y_i &= \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \epsilon_i \\ &= \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \epsilon_i, \\ i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \tag{6}$$

De β -coëfficiënten in vergelijking (6) worden zo gekozen dat de som van de kwadraten van de (ϵ_i) geminimaliseerd worden via de functie van de 'kleinste kwadraten':

$$\begin{aligned} L &= \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij})^2. \end{aligned} \tag{7}$$

Dit model kan uitgedrukt worden in matrixvorm:

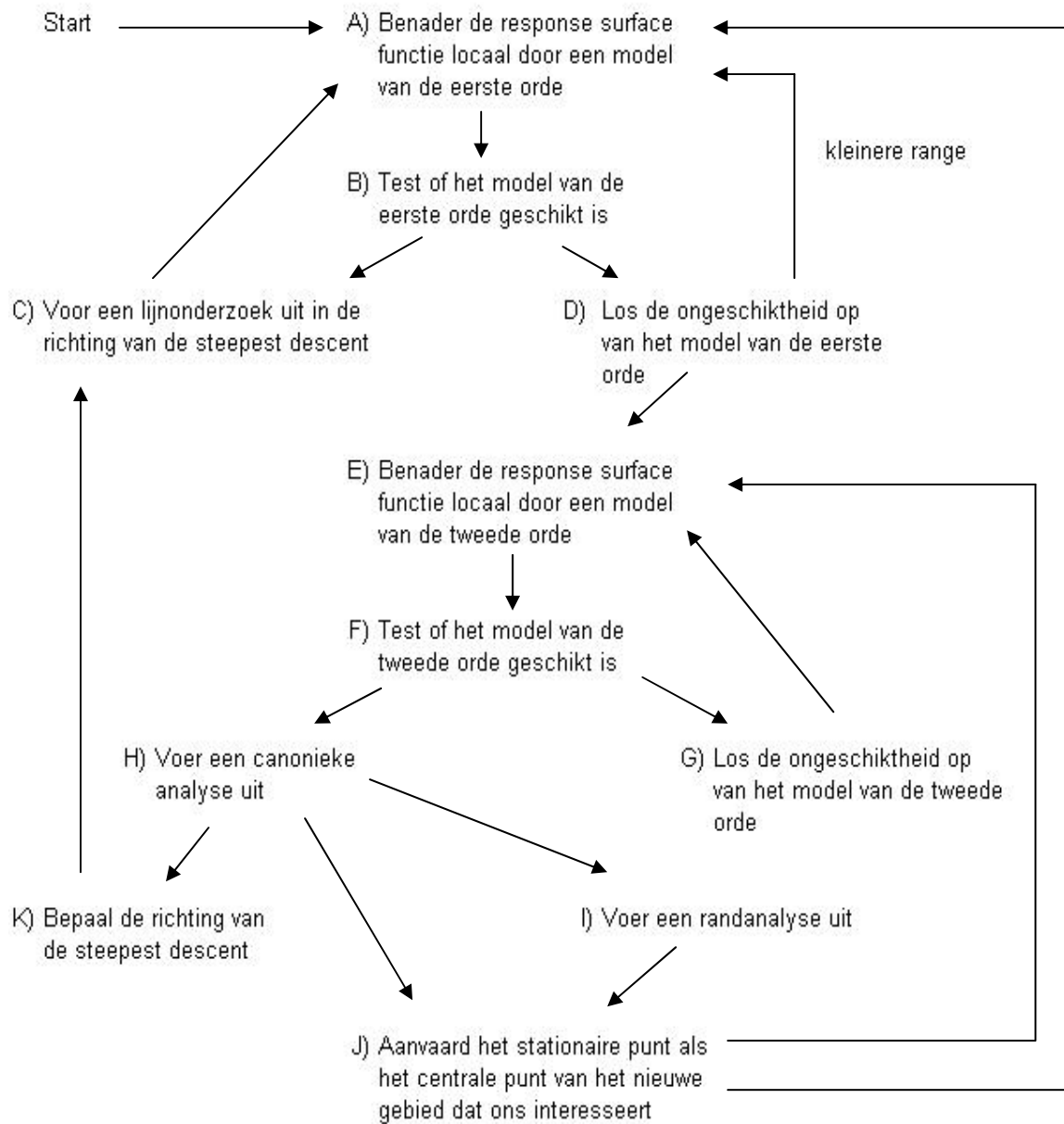
$$y = X\beta + \epsilon \tag{8}$$

waar

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, & \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\beta} &= \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}, & \boldsymbol{\epsilon} &= \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

(Fleming e.a., 2002)

Onderstaande figuur laat schematisch het verloop van de methodologie van responsoppervlakken zien.



Figuur 6: Methodologie van responsoppervlakken (Neddermeijer e.a., 2000)

5.5.1. Uitgewerkt voorbeeld

Via een productie-voorraad model ontwikkeld door Posner en Berg (1989) wordt de methodologie van responsoppervlakken geïllustreerd. Productie-voorraadmodellen proberen tekorten zo laag mogelijk te houden en tegelijkertijd de voorraden te beperken door de productie en de vraag aan elkaar te linken. Productie-voorraad modellen verschillen van elkaar in termen van de karakteristieken van het productieproces, het vraagpatroon, hoe klanten reageren op deze tekorten en het overzicht van de voorraadprocedures. Een punt dat veel verwaarloosd wordt bij deze modellen is het feit dat productiesystemen imperfect kunnen zijn. Hierbij wordt bedoeld dat machines en/of robots defect kunnen zijn. Deze imperfecties leiden tot onderbrekingen in de productieplannen, verminderingen van de voorraad en tekorten. Posner en Berg (1989) gingen uit van een basismodel waarin gebruik wordt gemaakt van één machine met een constante productiesnelheid. Deze machine blijft produceren tot een vooraf bepaald voorraadniveau bereikt wordt. Als dit punt bereikt is, valt de productie volledig stil. De vraag is Poisson verdeeld en zowel de tijd dat de machine werkt als de tijd die nodig is om een defect te herstellen worden verondersteld exponentieel verdeeld te zijn. Als niet volledig aan de vraag voldaan kan worden via de voorhanden zijnde voorraad, gaat de vraag waaraan niet voldaan kan worden met de beschikbare voorraad verloren (geen back-logging). Het model is terug te vinden in bijlage 1.

5.5.1.1. Het model in meer detail

De volgende veronderstellingen worden gemaakt:

- Eén machine wordt gebruikt.
- De productie is continu en produceert één product per tijdseenheid.
- De productie stopt zodra de voorraad niveau M bereikt en gaat verder als dit niveau terug onder M daalt.
- De vraag is Poisson verdeeld. De vraag komt aan met een snelheid van 0,3 klanten per minuut
- Vraaghoeveelheden zijn exponentieel verdeeld met een gemiddelde van 3 eenheden. De vraag waaraan niet kan voldaan worden (te weinig voorraad) is verloren.

- De tijd dat de machine operationeel is tot aan het volgende defect is exponentieel verdeeld met een gemiddelde van 9 minuten.
- De tijd om een machine te repareren is exponentieel verdeeld met een gemiddelde van 3 minuten. (Posner en Berg, 1989)

Binnen een logistieke keten zitten veel onzekerheden. Bij het nemen van beslissingen moet het management rekening houden met deze onzekerheden. Aan de hand van simulatie kunnen deze beslissingen geëvalueerd worden. Niet alle stochastische fenomenen zijn echter even belangrijk. Door het ontwerp van simulatie-experimenten en het gebruik van de methodologie van responsoppervlakken worden de belangrijkste fenomenen ontdekt en wordt hun invloed op het resultaat geschat. Nadat de invloeden van de verschillende fenomenen gekend zijn, kan deze kennis gebruikt worden om de optimale waarden van enkele beslissingsparameters te bepalen. (Ramaekers e.a., 2006)

Om de methodologie van responsoppervlakken te illustreren, maken we gebruik van een softwareprogramma Arena genoemd. Arena is een simulatieprogramma waarin het model van Posner en Berg (1989) beschikbaar is. De doelstelling is de winst te maximaliseren die aan dit model verbonden is. Hiertoe moeten drie beslissingsparameters geoptimaliseerd worden voor een bepaalde doelfunctie van het model. De opbrengsten en de kosten verbonden aan het model bestaan uit de verkoopopbrengsten, de voorraadkosten, de kosten van verloren verkopen, de productiekosten en de kosten verbonden aan het herstellen van de machine. De verkoopprijs bedraagt 300 euro, de voorraadkost is 7,5 euro per product per periode, de kosten van de verloren verkopen is het aantal eenheden die tekort zijn maal de verkoopprijs per eenheid, de productiekosten zijn respectievelijk 95 euro, 100 euro en 105 euro (afhankelijk van de tijd tot een falings van de machine optreedt) voor een falings om de 6 minuten, 9 minuten en 12 minuten en de herstelkosten tenslotte bedragen respectievelijk 60 euro, 50 euro en 40 euro voor een herstelling op 1,5 minuut, 3 minuten en 4,5 minuten. Het optimale niveau van de volgende drie factoren moet bepaald worden om de doelfunctie te maximaliseren: de buffergrootte voor de voorraad, de hersteltijd nodig om een machine te repareren en de tijd tussen twee opeenvolgende defecten van de machine (drie controleerbare factoren). Om zoveel mogelijk opties open te laten, leggen we geen beperking op de buffergrootte. De duur van herstellingen is beperkt tot minimaal 0,5 minuten en de duur tot een falings optreedt, is minimaal 3 minuten (geen onderhoud) en maximaal 18 minuten.

FASE 1: eerste-orde analyse

De analyse van de eerste orde wordt gebruikt om een functionele relatie te schatten tussen de afhankelijke variabele en een set van onafhankelijke variabelen. (Chiadamrong, 2003) Deze fase is opgebouwd uit een aantal stappen die hieronder toegelicht worden aan de hand van het voorbeeld.

Stap 1: Bepaling van de range van elke factor

Het afbakenen van een gebied waarbinnen de experimenten zullen starten is de eerste stap die ondernomen moet worden. Hiervoor worden drie centrale punten (één voor elke parameter) in het driedimensionale gebied gedefinieerd. Deze centrale waarde bedraagt 110 eenheden voor de buffergrootte, 3 minuten voor de hersteltijd van een machine en 9 minuten voor de tijd tussen twee defecten. De boven- en de ondergrens van deze waarden kunnen teruggevonden worden in tabel 1.

Tabel 1: Niveaus voor de drie experimentele parameters

Parameter	Beneden	Boven
Buffergrootte	70	150
Hersteltijd	1,5	4,5
Tijd tussen defecten	6	12

Stap 2: Coderen van de onafhankelijke variabelen in het interval [-1,1]

De hierboven gekozen punten worden gestandaardiseerd door gebruik te maken van het centrale punt en de grenzen. Hierbij wordt een nieuwe set van variabelen x_i ($i=1,2,3$) gedefinieerd met waarden binnen het [-1,1]-interval, bekomen door onderstaande formule (Chiadamrong, 2003):

$$x_i = \frac{(\text{de waarde van de } i^{\text{de}} \text{ factor} - \text{de gemiddelde waarde van de } i^{\text{de}} \text{ factor})}{\text{de helft van de range van deze variabele}}$$

Voor het voorbeeld geeft dit dan:

$$x_1 = \frac{X_1 - 110}{40}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 3}{1,5}, \quad x_3 = \frac{X_3 - 9}{3}$$

Deze codering wordt toegepast om de berekeningen in het verdere verloop van het proces te vereenvoudigen.

Stap 3: gegevensverzameling door uitvoering van experimenten

Rond de centrale waarden wordt een experimenteel ontwerp gemaakt om de combinaties van de niveaus van de drie parameters die geëvalueerd moeten worden te specificeren. Eerst wordt gebruik gemaakt van een model van de eerste orde. Een veelgebruikt ontwerp van de eerste orde is factorieel ontwerp (factorial design). In een factorieel ontwerp worden alle parameters geëvalueerd op twee niveaus. In het volledige factoriële ontwerp moeten 2^k ($k=3$) experimentele punten onderzocht worden. De centrale punten worden toegevoegd aan deze experimentele punten. (Ramaekers e.a., 2006)

Voor dit voorbeeld staan de twee niveaus van deze parameters in tabel 1. Van elk experimenteel punt worden zeven replicaties gedaan van de simulatie.

Stap 4: Passen van het model van de eerste orde en kijken of deze geschikt is

Door gebruik te maken van regressie-analyse wordt een model van de eerste orde aan deze gespecificeerde punten en hun simulatieresultaten gehangen, voorgesteld in de variabele Y. (Chiadamrong, 2003)

De volgende formule voor de vergelijking van de eerste orde werd bekomen:

$$Y = 110108,43 + 13653,775x_1 - 13108,92x_2 + 9405,333x_3$$

De coëfficiënt R^2 , die de proportie van de variabiliteit die verklaard wordt door een statistisch model voorstelt, van de regressie is gelijk aan 0,499. Een waarde voor de F-

test van 61,401 met 3 en 185 vrijheidsgraden geeft aan dat dit significant is op het 0,05 betrouwbaarheidsniveau van de gehele regressie. Om te controleren of de individuele parameters x_i ($i = 1...3$) significant zijn, worden hun t-test waarden in de volgende vector gegeven: (8,768; -8,418; 6,039). De output is terug te vinden in bijlage 2.

Op basis van deze waarden kan geen parameter achterwege gelaten worden (op een 95% betrouwbaarheidsinterval), onder de veronderstelling dat het model een gepast model is van de realiteit.

Stap 5: Validatie van het model van de eerste orde

Validatie is het 'bewijs dat een model voldoende nauwkeurig is binnen zijn toepassingsdomein, consistent met de bedoelde toepassing van het model'. (Kleijnen en Sargent, 2000). De validatie van dit model is eerder al bewezen door Posner en Berg (1989) waardoor deze stap overgeslagen kan worden.

Stap 6: reductie van het experimentele ontwerp naar de tweede fase toe

Een volledig factorieel ontwerp gecombineerd met vele replicaties kan leiden tot aanzienlijke berekeningsinspanningen. Het kan dus soms gewenst zijn enkele experimentele punten te verwerpen zonder hierbij cruciale informatie te verliezen. (Ramaekers e.a., 2006) Aangezien in dit voorbeeld slechts drie parameters zijn, is deze stap hier niet nodig.

Stap 7: 'Steepest ascent'-methode

Eerst wordt een model van de eerste orde gepast aan de resultaten uit de simulaties van het experiment en wordt gekeken of dit model gepast is. Als het model gepast is, wordt de informatie uit dit model gebruikt om te zoeken naar gebieden binnen deze experimentele regio, of buiten de experimentele regio maar binnen het toegelaten gebied, waar betere waarden van de respons verwacht worden te zijn. Dit gebeurt aan de hand van het pad van de steepest ascent. Dit is de richting waarin de winst

(responsvariabele Y) van het model het snelste stijgt. Eens deze richting bepaald is, worden verdere punten in deze richting gesimuleerd en geëvalueerd tot er geen verdere stijging in de winst van het model gevonden kan worden. Dit wordt de methode van de steepest ascent genoemd. (Khuri en Cornell, 1988)

In tabel 2 staan de benodigde gegevens voor de toepassing van deze methode op het voorbeeld.

Tabel 2: Berekening van het pad van steepest ascent

	X ₁	X ₂	X ₃
Basisniveau	110	3	9
Eenheid	40	1,5	3
Geschatte helling	13653,775	-13108,92	9405,333
Vector met eenheidslengte	25,84	-0,93	1,335

De rij 'basisniveau' laat de centrale punten zien van de drie parameters. Deze drie variabelen worden gecodeerd tot het interval [-1,1] tot een gestandaardiseerde variabele, gebruik makend van een eenheid om dit te standaardiseren, wat terug te vinden is in de rij 'eenheid'. De rij 'geschatte helling' laat de verbetering zien per eenheid van de drie onafhankelijke parameters. Het pad van de steepest ascent is de richting waarin de responsvariabele het sterkst stijgt.

De geschatte richting van de steepest ascent volgt de vector van de coëfficiëntwaarden van de drie parameters (zie rij van de geschatte helling). De lengte van deze vector is $[(13653,775)^2 + (-13108,92)^2 + (9405,333)^2]^{1/2} = 21135,98$. Een vector van eenheidslengte in de richting van de steepest ascent heeft coördinaten: $\Delta x_1 = 13653,775/21135,98$, $\Delta x_2 = -13108,92/21135,98$ en $\Delta x_3 = 9405,333/21135,98$. Deze gecodeerde Δx_i 's worden geconverteerd naar natuurlijke variabelen en hun waarden worden getoond in de rij vector met eenheidslengte.

Tabel 3 laat de resultaten zien voor de drie variabelen en de evolutie in de winst van Y. Vermits van poging 3 naar poging 4 toe het minimum van de hersteltijd overschreden zou worden, neemt de hersteltijd in poging 4 en de hierop volgende pogingen de waarde van het minimum aan. Het maximum wordt bereikt op poging 3. Dit is het voorlopige optimale punt.

Tabel 3: Achtereenvolgende pogingen via het pad van steepest ascent

Poging	X ₁	X ₂	X ₃	Y
1	110	3	9	115897
2	135,84	2,07	10,335	139242,6
3	161,68	1,14	11,67	139690
4	187,52	0,5	13,005	138462,5
5	213,36	0,5	14,34	133575,3

FASE 2: Analyse van een model van de tweede orde

Hierna wordt een nieuw ontwerp van de eerste orde gekozen met het optimale punt van de eerste analyse (poging 3 van tabel 3) als centraal punt. Vermits geen van de drie parameters zijn maximum of minimum bereikt heeft, worden ze opnieuw alle drie opgenomen in de volgende stap. Verder wordt gebruik gemaakt van dezelfde range als in het initiële ontwerp, behalve voor de hersteltijd, daar deze anders het minimum overschrijdt, en worden zeven replicaties uitgevoerd voor elk experimenteel punt. Deze range wordt weergegeven in tabel 4.

Tabel 4: Niveaus voor de 3 experimentele parameters

Parameter	Beneden	Boven
Buffergrootte	122	202
Hersteltijd	0,5	1,78
Tijd tussen defecten	8,67	14,67

Deze punten worden opnieuw gestandaardiseerd, zoals hierboven, en door gebruik te maken van regressieanalyse wordt een functie van eerste orde gehangen aan de gespecificeerde punten en hun gesimuleerde resultaten. Volgende functie van de eerste orde werd bekomen:

$$Y = 132344,05 + 529,43x_1 - 690,805x_2 - 4450,549x_3$$

met t-test waarden voor de drie parameters van (0,282; -0,368; -2,369). De waarden voor R² en de F-test met 3 en 185 vrijheidsgraden bedragen respectievelijk 0,031 en 1,942. Deze waarde voor F is niet significant op het 95% betrouwbaarheidsinterval,

evenals de parameters buffergrootte en hersteltijd die ook niet significant zijn. Alleen de parameter 'tijd tussen defecten' is significant waardoor we besluiten over te gaan op een model van tweede orde. In dit model worden kruistermen en/of termen in het kwadraat toegevoegd aan de functie van eerste orde. Hierna wordt opnieuw overgegaan op de controle of het model geschikt is of niet. (Neddermeijer e.a., 2000) Deze output staat in bijlage 3.

Om een functie van tweede orde te passen aan deze punten, moet het ontwerp aangepast worden. Het is namelijk mogelijk om het ontwerp van eerste orde uit te breiden waardoor eerder behaalde gesimuleerde resultaten opnieuw gebruikt kunnen worden. Een van de meest gebruikte ontwerpen voor tweede orde is deze van de 'central composite design' (Wardrop en Myers, 1990). De punten op de as die gesimuleerd moeten worden zijn $(\pm\alpha, 0, 0)$, $(0, \pm\alpha, 0)$ en $(0, 0, \pm\alpha)$. α wordt vaak gelijk verondersteld aan $F^{1/4}$, waar F het aantal factoriële punten is, omdat deze waarde een roteerbaar ontwerp garandeert. Dit geeft ons $\alpha = (2^3)^{(1/4)} \cong 1,68$. De niveaus voor α worden gegeven in tabel 5.

Tabel 5: Niveaus voor de punten op de as voor de 'central composite design'

Parameter	Beneden	Boven
Buffer	95	229
Repair	0,5	1,78
Failure	6,63	16,71

Zeven replicaties worden uitgevoerd op elk van deze bijkomende experimentele punten.

De bekomen functie van de tweede orde is:

$$Y = 139148,12 + 856,724x_1 - 690,805x_2 - 3613,688x_3 - 640,164x_1^2 + 906,951x_1x_2 - 6437,496x_2^2 - 472,663x_1x_3 + 4250,318x_2x_3 - 3227,564x_3^2$$

De t-test waarden bedragen (0,521; -0,367; -2,199; -0,287; 0,393; -2,123; -0,205; 1,843; -1,447). R^2 bedraagt 0,066 en de waarde voor de F-test is 1,632 (bijlage 4). Deze lage waarde voor F, die niet significant is, als de lage waarde van de R^2 geven aan dat deze vergelijking weinig van de variatie verklaart. Verder zijn ook alleen de

parameters 'tijd tussen defecten' en 'hersteltijd²' significant. Dit model is dus geen goede fit voor de werkelijkheid.

Het bekomen punt na de eerste fase is dan ook het punt dat overgenomen wordt als het optimale punt. We krijgen dus (162; 1,14; 11,67) als optimale punt met een winst van 139690.

Het volgende hoofdstuk handelt over de gezamenlijke bijvulling van voorraden (joint replenishment). Hiervoor werd een model gemaakt in Arena, waar gekeken wordt naar de gezamenlijke bijvulling van de voorraad van twee producten.

6. Gezamenlijke bijvulling van voorraden

6.1. Inleiding

Dit laatste hoofdstuk uit de eindverhandeling handelt over voorraadbeheer en meer in het bijzonder over de 'gezamenlijke bijvulling van de voorraad' (joint replenishment). Voorraadssystemen met gezamenlijke bijvulling van de voorraad worden gebruikt wanneer een aantal producten betrokken zijn bij een bijvulling van de voorraad en de mogelijkheid bestaat de vaste kosten van deze bijvulling van de voorraad te delen. In voorraadssystemen waar meerdere producten worden gekocht bij één enkele leverancier, bestaat de kost voor het plaatsen van een order voor een aantal producten uit twee componenten. Enerzijds een vaste kost die onafhankelijk is van het aantal bestelde producten en anderzijds een variabele kost die varieert met het aantal producten in de bestelling. In de praktijk is het de gewoonte grondstoffen en/of producten gezamenlijk bij te vullen, in tegenstelling tot de onafhankelijke bijvulling van individuele producten. Nochtans gaat de meeste aandacht in de theorie van voorraadssystemen uit naar deze individuele bijvulling van de voorraad. (Goyal en Satir, 1989) Ook in onze opleiding was dit het geval, waar de theorie rond de gezamenlijke bijvulling van de voorraad nauwelijks ter sprake kwam. Daarom wordt hieronder ingegaan op methodes voor de gezamenlijke bijvulling van voorraden.

6.2. Gezamenlijke bijvulling van de voorraad

De controle op de gezamenlijke bijvulling van de voorraad met stochastische gegevens, waarbij de vraag naar producten de voornaamste bron van onzekerheid is, kan als volgt worden geformuleerd: wanneer de voorraadpositie (= huidige voorraad + in bestelling - backorder) van product i uit een groep van producten zijn bestelpunt (s_i) bereikt, wordt de voorraad van dit product i bijgevuld tot op een bepaald niveau S_i . Ondertussen wordt voor alle producten j , te verkrijgen bij dezelfde leverancier, gecontroleerd of de voorraadposities van deze producten zich onder hun can-order punt (c_j) bevinden. Elk product waarvoor deze voorwaarde geldt, wordt mee opgenomen in de bijvulling van de

voorraad. Het niveau van deze producten wordt dus omhoog gehaald naar niveau S_j . Dit systeem wordt voorgesteld als het (S, c, s) model. (Goyal en Satir, 1989)

Door de producten die zich dicht bij dit bestelpunt bevinden toch op te nemen in de bestelling, worden de vaste bestelkosten uitgespaard aangezien de vaste bestelkosten onafhankelijk zijn van het aantal producten in de bestelling. Dit verhoogt echter de voorraad van het product dat mee opgenomen wordt in de bestelling. De besparing in deze vaste bestelkost moet dus opwegen tegen het in voorraad houden van deze extra eenheden product. (Silver e.a., 1998)

6.3. Voor- en nadelen van gezamenlijke aanvulling van de voorraad

Aan de gezamenlijke aanvulling van voorraden zijn uiteraard voor- en nadelen verbonden. Hoe deze voor- en nadelen tot uiting komen, kan teruggevonden worden bij Silver e.a. (1998). Hieronder worden de voordelen en vervolgens de nadelen opgesomd.

Voordelen:

- *Besparingen op de aankoopkost per product.* Wanneer een aantal producten bij dezelfde leverancier besteld worden, kan een hoeveelheidskorting bekomen worden als de bestelling groter is dan een bepaald aantal eenheden. Het kan echter economisch ongunstig zijn om zoveel eenheden van één product te bestellen. Het kan wel gunstig zijn een gecoördineerde bestelling van meerdere producten bij deze leverancier te plaatsen, waarbij deze bestelling groter is dan het aantal eenheden waarvoor deze hoeveelheidskorting wordt toegekend.
- *Besparingen op de transportkosten per eenheid.* Deze discussie is ongeveer dezelfde als hierboven, behalve dat het nu gaat over het transport van de goederen. Het kan voordelig zijn goederen te groeperen om het transportvolume beter te benutten. Vervoerskosten hebben een vaste en een variabele component. Door dit grotere volume wijzigen deze vaste kosten niet maar worden de vaste kosten wel gespreid over een groter aantal eenheden. Dit zorgt voor besparingen per eenheid product.
- *Besparingen op bestelkosten.* In het geval dat de vaste bestelkost per bestelling groot is, kan worden bespaard door producten samen te bestellen. Dit zorgt voor

een besparing in de jaarlijkse vaste kosten, vermits nu minder vaak besteld moet worden.

- *Gemakkelijkere goederenbehandeling*: het coördineren van bestellingen leidt ertoe dat minder tijd besteed moet worden aan het ontvangen en inspecteren van de goederen.

Nadelen:

- *Een stijging van de gemiddelde voorraad*. Wanneer goederen gezamenlijk besteld worden, worden sommige producten eerder besteld dan wanneer ze apart besteld zouden worden. Dit leidt tot stijgingen van de gemiddelde voorraad.
- *Een stijging in de kosten van het systeem*. De gecoördineerde bestelling van goederen is uiteraard ingewikkelder dan wanneer voor ieder product apart beslist wordt. Hiervoor is misschien een (duur) softwareprogramma nodig en beter opgeleide werknemers om de nodige beslissingen te nemen, wat kan leiden tot een stijging van de kosten.

6.4. Uitgewerkt voorbeeld van de gezamenlijke bijvulling van de voorraad voor 2 producten

Voor dit onderzoek werd een fictief model ontwikkeld binnen Arena, een software programma om simulaties uit te voeren. Dit model is terug te vinden in bijlage 5. Van dit ontwikkelde model worden een aantal externe factoren veranderd. Verder wordt nagegaan welke invloed deze aanpassingen hebben op de resultaten van het model. De zes interne factoren die geoptimaliseerd worden zijn de volgende: het bestelpunt van product 1, de bestelgrootte van product 1, het can-order punt van product 1, het bestelpunt van product 2, de bestelgrootte van product 2 en het can-order punt van product 2. De gebruikte methode om de situaties te optimaliseren is opnieuw de methodologie van responsoppervlakken. De bekomen optimale waarden voor de zes factoren worden ook gebruikt om de winst te bereken wanneer geen gebruik gemaakt wordt van de gezamenlijk bijvulling van de voorraad. Zo kan ook nagegaan worden of de gezamenlijke bijvulling van de voorraad besparingen met zich meebrengt en hoe veranderingen in de kosten dit verschil beïnvloeden. Deze verschillende situaties worden

gesimuleerd binnen Arena en de kosten van deze resultaten worden berekend via MS Excel. De regressie-analyse werd uitgevoerd met het programma SPSS.

6.4.1. Experimenteel ontwerp: de externe factoren

Een eerste factor die veranderd wordt binnen het model is de gemiddelde vraag per periode van de producten a en b. Deze gemiddelde vraag per periode bestaat uit twee componenten, namelijk de gemiddelde tijd tussen de aankomst van twee opeenvolgende klanten (frequentie) en de gemiddelde hoeveelheid die deze klanten wensen af te nemen. De gemiddelde tijd tussen de aankomst van twee klanten is poisson verdeeld voor de twee gevallen. Voor het eerste geval bedragen deze rates (λ_1 en λ_2) respectievelijk 0,25 klanten per uur en 1 klant per uur voor product 1 en product 2. In geval twee zijn λ_1 en λ_2 respectievelijk gelijk aan 0,5 klanten per uur en 0,5 klanten per uur voor product 1 en product 2. De gemiddelde hoeveelheid is exponentieel verdeeld voor de twee gevallen. Voor geval 1 bedragen de gemiddelde bestelhoeveelheden voor product 1 en product 2 respectievelijk 40 eenheden en 15 eenheden en voor geval 2 bedragen ze respectievelijk 20 eenheden en 30 eenheden. In tabel 6 hieronder wordt dit schematisch weergegeven. De gemiddelde vraag per periode van product 1 en product 2 zijn gelijk voor geval 1 en geval 2. Als de gemiddelde vraag per situatie zou veranderen, is het niet mogelijk de invloed van de wijziging in de externe factoren te bepalen. De wijzigingen hierin zijn dan ook te wijten aan de verandering in de gemiddelde vraag per periode.

Tabel 6: Verschillende gevallen van de vraag

Geval 1

	Frequentie	Hoeveelheid	Gemiddelde vraag per periode
Product 1	0,25 klanten/uur	Expo (40)	10000
Product 2	1,00 klanten/uur	Expo (15)	15000

Geval 2

	Frequentie	Hoeveelheid	Gemiddelde vraag per periode
Product 1	0,50 klanten/uur	Expo (20)	10000
Product 2	0,50 klanten/uur	Expo (30)	15000

De invloed van een wijziging van de vaste bestelkost op het model is de tweede factor die onderzocht wordt. Deze factor wordt mede gebruikt bij de berekening van het can-order punt. Vermits de resultaten bekomen uit de optimalisatie van het model via de methodologie van responsoppervlakken ook vergeleken worden met de resultaten uit het model waarbij de producten apart behandeld worden, is het interessant te kijken wat de invloed is op het verschil tussen deze resultaten bij een verandering in de vaste bestelkost. Hier worden drie gevallen bekeken, terug te vinden in tabel 7. Deze vaste bestelkosten zijn hetzelfde voor de 2 producten.

Tabel 7: Verschillende gevallen van de vaste bestelkost

	Vaste bestelkost
Geval 1	500
Geval 2	1000
Geval 3	2000

Ten slotte wordt nagegaan wat de invloed is van de variabele bestelkosten (zijn hier proportioneel verondersteld aan het aantal aankopen van product 1 of product 2 vermenigvuldigd met hun respectievelijke aankooprijzen). Deze variabele kosten hebben een invloed op de voorraadkosten van de producten. De voorraadkosten bedragen in dit fictieve voorbeeld 20% van de variabele kosten. Deze voorraadkost is van belang bij de berekening van de bestelhoeveelheid via de EOQ- formule. Ook hier worden drie gevallen bekeken, terug te vinden in tabel 8.

Tabel 8: Verschillende gevallen van de variabele bestelkost

Geval 1

	Variabele bestelkost/eenheid	Voorraadkost/eenheid
Product 1	50	10
Product 2	100	20

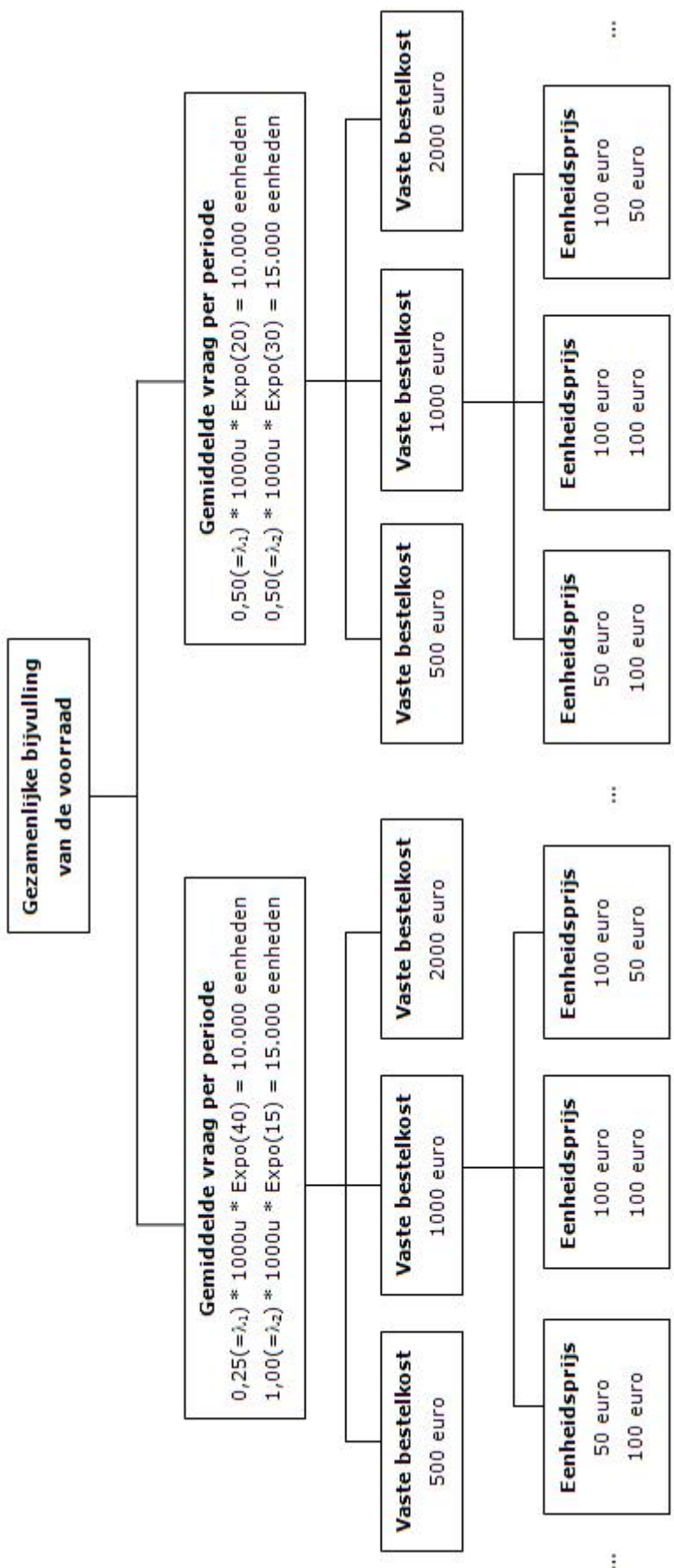
Geval 2

	Variabele bestelkost/eenheid	Voorraadkost/eenheid
Product 1	100	20
Product 2	100	20

Geval 3

	Variabele bestelkost/eenheid	Voorraadkost/eenheid
Product 1	100	20
Product 2	50	10

Figuur 7 toont de 18 situaties die onderzocht worden. De bovenste rij in elke kader is voor product 1 en de onderste rij voor product 2. In het kader van de vaste bestelkost staat slechts 1 getal, vermits deze vaste bestelkost dezelfde is voor product 1 en product 2. Wat elke situatie inhoudt is terug te vinden in bijlage 6.



Figuur 7: De achttien verschillende situaties

6.4.2. Berekening van bestelpunten, bestelhoeveelheden en can-order punten

6.4.2.1. Bestelpunten

Binnen dit model wordt de voorraad aangevuld als het niveau van de voorraad daalt onder de gemiddelde vraag gedurende de lead time. De berekeningen hiervan voor product 1 en product 2 staan in onderstaande tabel. Deze resultaten zijn voor alle situaties dezelfde aangezien de lead time en de gemiddelde vraag constant blijven.

Tabel 9: Berekening van de bestelpunten

Product 1	
Lead time (aantal uren)	15
Gemiddelde vraag per periode (1000u)	10000
Gemiddelde vraag per uur (10000/1000)	10
Bestelpunt (10 * 15)	150

Product 2	
Lead time (aantal uren)	15
Gemiddelde vraag per periode (1000u)	15000
Gemiddelde vraag per uur (15000/1000)	15
Bestelpunt (15 * 15)	225

6.4.2.2. Bestelhoeveelheden

Binnen het ontwikkelde model wordt gewerkt met vaste bestelhoeveelheden. Deze vaste bestelhoeveelheid voor de verschillende situaties wordt berekend via de EOQ formule die hieronder weergegeven worden:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}}$$

met: EOQ = optimale bestelhoeveelheid
 D = gemiddelde vraag per periode
 S = vaste bestelkost
 H = opslagkost per eenheid per periode

De berekening van de EOQ-waarde wordt hieronder gedemonstreerd voor situatie 1. Deze berekening is analoog voor de andere situaties. De resultaten hiervan zijn terug te vinden in bijlage 7.

Tabel 10: Berekening van de bestelhoeveelheden

Situatie 1

Product 1

Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	500	10	1000

$$\sqrt{(2 * 10000 * 500) / 10}$$

Product 2

Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	500	20	866

$$\sqrt{(2 * 15000 * 500) / 20}$$

6.4.2.3. Can-order punten

Naast de mogelijkheid om de voorraad aan te vullen als het bestelpunt bereikt is, bestaat bij de gezamenlijk aanvulling van de voorraad nog een andere mogelijkheid om een bestelling te plaatsen zoals eerder besproken bij de gezamenlijke bijvulling van voorraden. De berekening van de can-order punten wordt weergegeven in onderstaande tabel. Voor de

meeste voorbeelden in de literatuur wordt echter slechts één maal besteld per periode. In het fictieve model van deze eindverhandeling wordt meerdere keren besteld per periode. De totale vaste bestelkost per periode bedraagt dus het aantal keren dat besteld wordt maal de vaste bestelkost. Voor situatie 1 wordt deze berekening hieronder uitgebreid berekend. Deze berekening is analoog voor de andere situaties en de resultaten hiervan zijn terug te vinden in bijlage 8.

Tabel 11: Berekening van de can-order punten

Situatie 1	
<u>Product 1</u>	
Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1000
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	9
Vaste bestelkost per periode = (#bestellingen*bestelkost)	4500
Can-order punt = (Vaste bestelkost per periode/voorraadkost per eenheid per periode)	450
<u>Product 2</u>	
Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	866
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	16,2
Vaste bestelkost per periode = (#bestellingen*bestelkost)	8100
Can-order punt = (Vaste bestelkost per periode/voorraadkost per eenheid per periode)	405

6.4.3. Kosten van de uitvoering van de simulatie

De benodigde gegevens om de opbrengsten en de kosten te bepalen werden bekomen uit de output van de uitgevoerde simulaties binnen Arena. Al de kosten hangen af van de situatie. Tot de benodigde gegevens behoren het aantal verkochte eenheden van product 1 en van product 2. Deze waarden worden vermenigvuldigd met een verkoopprijs van 110€. De verloren verkopen, van product 1 en product 2, zijn een tweede belangrijke factor. De berekening van de tekortkosten ligt echter niet voor de hand. Tekorten kunnen namelijk het imago van de onderneming schaden en leiden tot het verlies van huidige en potentiële klanten. De impact van dit verslechterd imago en de negatieve mond-tot-mond-reclame door klanten die met tekorten te maken hebben op het resultaat zijn moeilijk te achterhalen. In dit model wordt uitgegaan van een sterk concurrerende markt en een lage klantentrouw. De kostprijs van verloren verkopen wordt vastgelegd op 110€ per eenheid.

De bestelkost bestaat uit twee componenten. De vaste bestelkost wordt bepaald aan de hand van het totale aantal bestellingen geplaatst bij de leverancier (= aantal bestellingen voor product 1 apart + aantal bestellingen voor product 2 apart + gezamenlijke bestellingen) maal de vaste bestelkost per bestelling die geldt in de betreffende situatie (500, 1000 of 2000). De variabele bestelkost bestaat uit het aantal aangekochte eenheden van product 1 en product 2 vermenigvuldigt met de aankooprijzen voor de desbetreffende producten.

De laatste kostencomponent bestaat uit de kosten gerelateerd aan voorraden. Het aantal eenheden van product 1 en product 2 dat gemiddeld genomen in voorraad ligt gedurende de gehele periode wordt vermenigvuldigt met de voorraadkost per eenheid per periode. Verder moet rekening gehouden worden met de waarde van de eindvoorraad van product 1 en product 2. De eindvoorraad wordt bijgehouden omdat anders grote schommelingen in de resultaten kunnen voorkomen. Bij sommige replicaties is de eindvoorraad laag, terwijl deze eindvoorraad bij andere replicaties hoog is. Dit zorgt voor grote verschillen in het resultaat als hier geen rekening mee wordt gehouden bij de berekening van de winst uit het model. De beginvoorraad voor alle uitvoeringen van de simulatie bedragen 1000 eenheden. De waarde voor deze beginvoorraad blijft overal dezelfde om vergelijkingen tussen de

verschillende gevallen mogelijk te maken. De berekening van de kosten voor één uitvoering van de simulatie is terug te vinden in bijlage 9.

6.4.4. Keuze van een ontwerp

Vooraleer gestart wordt met het simuleren van de verschillende situaties, moet eerst een ontwerp gekozen worden om mee te werken. In dit voorbeeld moeten zes parameters geoptimaliseerd worden. Een volledige factorieel ontwerp gecombineerd met vele replicaties kan leiden tot aanzienlijke berekeningsinspanningen. Het kan dus soms gewenst zijn enkele experimentele punten te verwerpen zonder hierbij cruciale informatie te verliezen. Door dit te doen blijven de hoofdeffecten en de interactie-effecten, die verwacht worden belangrijk te zijn, gelden, terwijl andere interacties van hogere orde als niet bestaande verondersteld worden. (Ramaekers e.a., 2006)

Tabel 12 geeft een overzicht van een aantal verschillende ontwerpen. Deze ontwerpen verschillen in het aantal replicaties, waarbij het centrale punt al dan niet wordt opgenomen en waar de toepassing van een fractioneel factorieel ontwerp gebruikt wordt. Voor de resolutie van dit fractioneel factorieel ontwerp werd resolutie IV gekozen. Dit wil zeggen dat de som van de combinatie van factoren die aan elkaar worden gehangen minstens vier bedraagt. Twee hoofdeffecten aan elkaar hangen geeft een som van twee ($1+1=2$) hetgeen kleiner is dan vier, waardoor dit uitgesloten wordt. Hetzelfde geldt voor een hoofdeffect en een interactie-effect van twee factoren ($1+2=3<4$). Twee interactie-effecten van twee factoren aan elkaar hangen mag wel, alsook een hoofdeffect met een interactie-effect van drie factoren ($2+2=4<4$ en $1+3=4<4$). (Box en Draper, 1987) De bekomen resultaten uit de output van deze simulaties staan in tabel 13. De getallen in het vet gedrukt in tabel 13 geven aan dat deze parameter niet significant is op het 95% betrouwbaarheidsinterval. De output van de verschillende situaties is terug te vinden in bijlage 10.

De kolommen met de β_i 's ($i=1, \dots, 6$) laten de regressie coëfficiënten zien van de gecodeerde variabelen x_i .

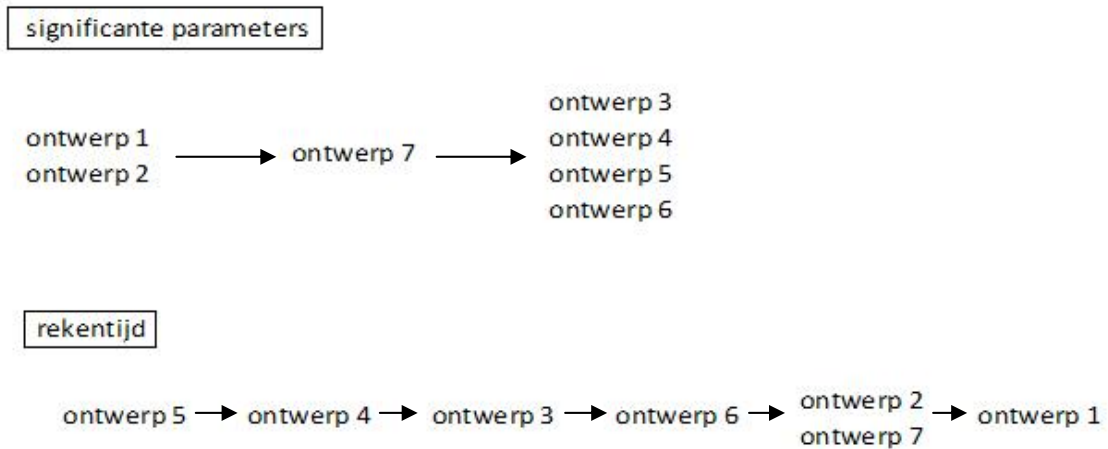
Tabel 12: Overzicht reductie van het factorieel ontwerp

Ontwerp	Soort ontwerp	Centraal punt?	Aantal punten	Uitvoeringen per punt	R ²	F-test waarde
1	Volledig Fact. Ont.	Ja	65	5	0,554	65,938
2	Volledig Fact. Ont.	Nee	64	5	0,562	66,842
3	Volledig Fact. Ont.	Ja	65	1	0,696	22,112
4	Volledig Fact. Ont.	Nee	64	1	0,704	22,638
5	Fract. Fact. Ont.	Nee	16	1	0,71	3,664
6	Fract. Fact. Ont.	Nee	16	5	0,574	16,4
7	Fract. Fact. Ont.	Nee	16	20	0,47	46,249

Tabel 13: Regressiecoëfficiënten voor de ontwerpen in tabel 12

Ontwerp	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
1	296744,287	25090,252	4474,534	4794,138	31489,786	-1589,929	3169,654
2	297179,608	25090,252	4474,534	4794,138	31489,786	-1589,929	3169,654
3	277067,109	33347,192	5418,005	3401,513	30253,176	-3329,692	5821,359
4	276312,774	33347,192	5418,005	3401,513	30253,176	-3329,692	5821,359
5	273469,602	34776,965	10526,57	-7475,015	30765,735	-4029,965	15542,31
6	296518,553	25090,42	4591,757	4965,441	33807,935	-1269,265	4316,442
7	288705,076	23357,563	3588,28	6900,851	26912,526	4259,418	3765

Uit deze ontwerpen wordt een ontwerp gekozen waarmee verder wordt gewerkt. Hiervoor worden de ontwerpen gerangschikt volgens 2 factoren: het aantal significante parameters en de benodigde rekentijd.



Figuur 8: Factoren voor het bepalen van het ontwerp

Ontwerpen 3, 4 en 6 kunnen achterwege gelaten worden vermits deze meer rekeningtijd vereisen dan ontwerp 5, terwijl het aantal significante parameters ongewijzigd blijft. Ontwerp 1 kan ook achterwege gelaten worden ten opzichte van ontwerp 2, vermits ontwerp 2 minder rekeningtijd vereist dan ontwerp 1 en leidt tot evenveel significante parameters. Ook ontwerp 7 kan achterwege gelaten worden ten opzichte van ontwerp 2 omdat ontwerp 2 meer significante parameters heeft en evenveel rekeningtijd vereist als ontwerp 7. Ontwerp 2 en ontwerp 5 blijven over. Bij de keuze tussen ontwerp 2 en ontwerp 5 wordt geopteerd voor ontwerp 5, ondanks het feit dat ontwerp 5 maar net significant is. Dit ontwerp maakt het haalbaar de verschillende situaties te simuleren en te optimaliseren. Bij ontwerp 2 wordt dit een praktisch onmogelijke opdracht door het vele simuleerwerk dat eraan verbonden is.

6.4.5. Bespreking van de resultaten

6.4.5.1. Vergelijking significante parameters bij veranderingen in de externe parameters

In onderstaande tabel staan de optimale waarden voor de zes interne parameters na optimalisatie van de verschillende situaties uit figuur 7 via de methodologie van

responsoppervlakken. Parameter 1 staat voor het bestelpunt van product 1, parameter 2 voor de bestelhoeveelheid van product 1, parameter 3 voor het can-order punt van product 1, parameter 4 voor het bestelpunt van product 2, parameter 5 voor de bestelhoeveelheid van product 2 en parameter 6 voor het can-order punt van product 2.

De situaties in de eerste kolom duiden veranderingen in de externe factoren aan. De inhoud van elke situatie kan teruggevonden worden in bijlage 6. In de tweede kolom staan de waarden voor de zes interne parameters die gebruikt zijn als startwaarden voor het model dat geoptimaliseerd is. De berekeningen van deze startwaarden kunnen teruggevonden worden in bijlagen 7 en 8. De derde kolom laat de optimale waarden zien voor de zes parameters nadat het model voor de desbetreffende situatie geoptimaliseerd is. De laatste kolom ten slotte toont de parameters die significant waren bij de eerste fase van de methodologie van responsoppervlakken. In deze beginfase wordt een functie van de eerste orde gepast aan de resultaten bekomen uit de uitvoering van enkele simulaties. De weergegeven parameters waren significant bij het bekomen model van de eerste orde.

Tabel 14: Optima van de zes interne parameters

Situatie	Vooraf berekende waarden	Optimum na RSM	Significante parameters
1	(150, 1000, 450, 225, 866, 405)	(289, 943, 450, 386, 911, 405)	1, 2, 4, 5
2	(150, 1000, 450, 225, 866, 405)	(291, 1000, 450, 497, 752, 405)	1, 4, 5
3	(150, 1414, 640, 225, 1225, 570)	(344, 1414, 640, 429, 1225, 570)	1, 4
4	(150, 1414, 640, 225, 1225, 570)	(248, 1414, 640, 508, 1225, 570)	1, 4
5	(150, 2000, 900, 225, 1732, 810)	(150, 2168, 900, 316, 1732, 810)	2, 4
6	(150, 2000, 900, 225, 1732, 810)	(216, 2000, 900, 360, 1732, 810)	1, 4
7	(150, 707, 318, 225, 866, 405)	(245, 949, 318, 353, 866, 405)	1, 2, 4
8	(150, 707, 318, 225, 866, 405)	(345, 964, 318, 437, 1129, 405)	1, 2, 4, 5
9	(150, 1000, 450, 225, 1225, 570)	(262, 1000, 450, 349, 1225, 570)	1, 4
10	(150, 1000, 450, 225, 1225, 570)	(293, 1000, 450, 572, 1225, 570)	1, 4
11	(150, 1414, 640, 225, 1732, 810)	(344, 1288, 640, 425, 1732, 810)	1, 2, 4
12	(150, 1414, 640, 225, 1732, 810)	(225, 1309, 640, 333, 1732, 810)	1, 2, 4
13	(150, 707, 318, 225, 1225, 570)	(196, 814, 318, 296, 1225, 570)	1, 2, 4
14	(150, 707, 318, 225, 1225, 570)	(337, 1041, 318, 391, 1225, 570)	1, 2, 4
15	(150, 1000, 450, 225, 1732, 810)	(249, 1000, 450, 337, 1732, 810)	1, 4
16	(150, 1000, 450, 225, 1732, 810)	(229, 1000, 402, 343, 1732, 810)	1, 3, 4
17	(150, 1414, 640, 225, 2449, 1140)	(298, 1414, 640, 462, 2449, 1140)	1, 4
18	(150, 1414, 640, 225, 2449, 1140)	(346, 1414, 640, 407, 2449, 1140)	1, 4

Tabel 15: De te vergelijken situaties bij de wijziging van 1 externe parameter

Enkel verdeling van de vraag verandert
1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, 15-16, 17-18
Enkel vaste bestelkost verandert
1-3, 2-4, 3-5, 4-6, 7-9, 8-10, 9-11, 10-12, 13-15, 14-16, 15-17, 16-18
Enkel variabele aankoopkost verandert
1-7, 2-8, 3-9, 4-10, 5-11, 6-12, 7-13, 8-14, 9-15, 10-16, 11-17, 12-18

In bovenstaande tabel staan de externe parameters die veranderen bij een overgang van één situatie naar een andere. Dit kan eveneens teruggevonden worden in bijlage 6. Bij verwijzingen naar een verandering in de verdeling van de vraag kan in deze tabel opgezocht worden welke situaties met elkaar vergeleken worden. Deze bemerking geldt eveneens voor een verandering in de vaste bestelkosten en een verandering in de aankoopkosten per eenheid.

Uit tabel 14 kan afgeleid worden dat voornamelijk parameter 1 (bestelpunt product 1) en parameter 4 (bestelpunt product 2) de significante parameters zijn. Enkel in situatie 5 is parameter 1 niet significant. De bestelhoeveelheden van product 1 en product 2 komen ook enkele keren voor als significante parameters. De coëfficiënten van deze parameters zijn echter kleiner dan die van parameters 1 en 4. Dit wijst op een lagere significantie van de bestelhoeveelheden. Het can-order punt van product 2 is nooit significant en van product 1 slechts éénmaal in situatie 16.

De significantie van de bestelpunten wordt beïnvloed door meerdere factoren. Allereerst werd bij de berekening van de startwaarden voor de zes interne parameters geen rekening gehouden met het feit dat het hier gaat om stochastische en geen deterministische gegevens. Bij de berekening van het bestelpunt werd ervan uitgegaan dat de vraag constant was over de periode, wat het geval is bij deterministische maar niet bij stochastische situaties. Hierdoor kunnen deze punten sterk afwijken van hun optimum. Voorts werd niet gewerkt met een veiligheidsvoorraad bij de bepaling van de startwaarden voor de

bestelpunten. Dit had al een deel van de onzekerheid in de vraag kunnen opvangen. Ten slotte valt de significantie van de bestelpunten te verklaren door de hoge kostprijs van verloren verkopen. Deze hoge kostprijs kan toegeschreven worden aan de grote concurrentie op de markt en de lage klantentrouw. Hierdoor gaan ontevreden klanten verloren aan de concurrentie. Verder zullen deze ontevreden klanten hun ongenoegen meedelen aan vrienden en kennissen, wat de onderneming een negatief imago bezorgt. De impact hiervan op andere klanten en toekomstige potentiële nieuwe klanten valt zeer moeilijk te achterhalen. Verder moet opgemerkt worden dat de volledige bestelling verloren gaat als niet voldaan kan worden aan de wensen van een klant. Een klant aan wiens bestelling niet volledig voldaan kan worden, neemt geen enkel product af. De beschikbare producten in voorraad worden hierdoor niet verkocht. De voorraadkosten in dit fictief voorbeeld zijn afhankelijk van de variabele bestelkosten vastgelegd op 10 en 20 euro per eenheid per periode. Deze kosten bedragen 20% van de aankoopkosten van het desbetreffende product.

In situatie 1 is de gemiddelde vraag per klant voor product 1 gelijk aan 40 eenheden. Als niet aan de vraag voldaan kan worden, gaat deze vraag van 40 eenheden volledig verloren. Dit levert een kost van $110\text{€}/e \cdot 40e + 40e \cdot 60\text{€}/e = 6800\text{€}$. De $60\text{€}/e$ staat hier voor het verschil tussen de verkoopprijs en de aankoopprijs van één eenheid van product 1. Dit wordt in deze situatie opgenomen aangezien ook de winst die uit dit product gehaald zou worden bij zijn verkoop verloren gaat. In situatie 1 is de voorraadkost per product per periode gelijk aan 10€ voor product 1. Met hoeveel eenheden mag de voorraad nu stijgen om deze 40 eenheden extra af te zetten? Veertig eenheden meer afzetten komt overeen met een kostendaling van 6800€ zoals hierboven berekend. Met een voorraadkost van 10€ per eenheid per periode mag de voorraad dus stijgen met $6800\text{€}/(10\text{€}/e) = 680$ eenheden. Dit is een forse stijging om slechts 40 eenheden extra af te zetten. Dit verklaart ook waarom de bestelpunten zo sterk stijgen bij de situaties. Deze berekening is analoog voor de andere situaties met hun desbetreffende kosten. Hieruit kan afgeleid worden dat de voorraad gaat stijgen ten voordele van minder verloren verkopen.

6.4.5.2. Vergelijking van de optimale waarden

Tabel 16 bevat in de tweede en de derde kolom de optimale waarden van de doelfuncties van de 18 verschillende situaties. Deze optima zijn berekend door de optimale waarden van de zes interne parameters in te geven in het model en dit model dan uit te voeren. Het verschil tussen de tweede en de derde kolom zit in het feit dat in kolom twee gewerkt wordt met gezamenlijke bijvulling van de voorraad, terwijl in kolom drie de producten apart behandeld worden (het can-order punt van product 1 en het can-order punt van product 2 zijn gelijk aan nul). Aangezien binnen het gekozen ontwerp (ontwerp 5) gewerkt wordt met één replicatie, is de bekomen waarde uit het model ook meteen de waarde die in de tabel is weergegeven. Als voor de berekening van de optima het gemiddelde genomen zou worden van meerdere replicaties, levert dit een vertekend beeld op. De variantie en de standaardafwijking zijn gelijk aan nul bij één replicatie. De laatste kolom ten slotte laat het verschil zien in resultaat tussen het geval waar gewerkt wordt met de gezamenlijke aanvulling van voorraden en het geval waar de twee producten apart behandeld worden.

Tabel 16: Optima voor de verschillende situaties

Situatie	Optimum na RSM	Optimum zonder gezamenlijke bijvulling van de voorraad	Verskil tussen de 2
1	855062,8	853785,2	1277,6
2	852686,8	851548,2	1138,6
3	843996,8	799944	44052,8
4	841367,256	831840,899	9526,357
5	826673,249	766105,449	60567,8
6	832948,5	827870,7	5077,8
7	395690,37	394038,77	1651,6
8	401668,6	401668,6	0
9	395405,324	358822,724	36582,6
10	392386,6	390071,6	2315
11	376806,4	371743	5063,4
12	389393,6	334032,6	55361
13	1068442,528	1059839,528	8603
14	1064503,2	1064076	427,2
15	1047773,8	1039954,892	7818,908
16	1072933,398	1070129,098	2804,3
17	1067180,4	1063224,6	3955,8
18	1067220,3	1060616,5	6603,8

Verdeling van de vraag

Als de situaties vergeleken worden waar enkel de verdeling van de vraag verandert, kan uit de tabel afgeleid worden dat de optima goed overeenkomen. Het verschil tussen situaties waar enkel de verdeling van de vraag verandert, komt voort uit het feit dat er verschillen zijn in het totaal aantal bestellingen dat gemaakt wordt (product 1 + product 2 + gezamenlijk), het verschil in het aantal verloren verkopen van product 1 en product 2 tussen de twee situaties en het verschil in het door klanten totaal aantal gevraagde eenheden van product 1 en product 2 bij verschillende verdelingen van de vraag. Deze verloren verkopen zijn terug te vinden in tabel 17 en het aantal bestellingen in bijlage 11. De berekeningen voor de verschillen als enkel de vraag verandert zijn terug te vinden in bijlage 12.

Vaste bestelkosten

De dalende trend in de winst van situatie 1 tot en met 6 en 7 tot en met 12 is te verwachten. Bij een verdubbeling van de vaste bestelkost wordt de bestelgrootte volgens de EOQ-formule 1,4142 maal groter. Hierdoor wordt 1,4142 maal minder besteld dan ervoor. Aangezien de vaste bestelkosten verdubbelen maar het aantal bestellingen niet halveert, gaan de totale kosten stijgen. Een grotere voorraad gedurende de periode doet deze kosten nog verder stijgen. Een factor die deze kosten kan reduceren zijn de verloren verkopen. Wanneer minder besteld wordt, komt de kans op tekorten minder voor. Hierdoor zullen de tekorten waarschijnlijk dalen. Bij de optima liggen de tekorten echter dicht bij elkaar. Hierdoor blijft de invloed van deze factor beperkt. Voor situatie 13 tot en met 18 is deze dalende trend niet aanwezig. Dit kan verklaard worden doordat de situaties 13 tot en met 16 onderhevig zijn aan verloren verkopen. Bij situaties 17 en 18 vinden geen verloren verkopen plaats. Dit beperkt de dalende trend.

Verskil resultaat tussen gecoördineerde bestellingen en aparte behandeling

In dit stuk wordt de winst van situatie x ($x \in \{1, \dots, 18\}$) als gewerkt wordt met gezamenlijke bijvulling van voorraden vergeleken met de winst van situatie x ($x \in \{1, \dots, 18\}$) als de twee producten apart behandeld worden (zelfde waarden voor de interne

parameters, alleen de waarden voor de can-order punten van product 1 en product 2 worden bij het tweede geval gelijk verondersteld aan nul). De optima van het gezamenlijk bijvullen van de voorraad zijn, op één keer na, beter dan de optima waar de twee producten apart behandeld worden. Enkel in situatie 8 zijn de optima even groot. Het coördineren van bestellingen levert dus besparingen op, zoals ook in de literatuur vermeld wordt.

In de literatuur wordt aangehaald dat de besparingen via de gezamenlijke bijvulling van de voorraad groter zijn als de vaste bestelkosten toenemen, waardoor de bevindingen uit tabel 16 indruisen tegen de theorie.

Bij een verdubbeling van de vaste bestelkost daalt het aantal bestellingen met een factor 1,4142 zoals hierboven aangehaald. Door het coördineren van de bestellingen kan dus meer uitgepaard worden als de vaste bestelkost hoger is. Dit wordt uitgelegd aan de hand van onderstaand voorbeeld.

Voorbeeld:

$$\text{Vaste bestelkost 1: } 500\text{€} \quad \rightarrow \quad \text{EOQ 1} = \sqrt{2 * 500 * 10000 / 10} = 1000$$

$$\text{Vaste bestelkost 2: } 1000\text{€} \quad \rightarrow \quad \text{EOQ 2} = \sqrt{2 * 1000 * 10000 / 10} \approx 1414$$

Product 1 wordt gemiddeld tien keer besteld ($10000e/1000e = 10$) voor situatie 1 en zeven keer ($10000e/1414e = 7,07 \approx 7$) voor situatie 2.

In situatie 1 kan dus via de gezamenlijke bijvulling van de voorraad 10 maal bespaard worden op de vaste bestelkost en in situatie 2 kan de vaste bestelkost 7 maal uitgespaard worden. Voor situatie 1 is dit een besparing van $10 * 500 = 5000\text{€}$ en voor situatie 2 is dit een besparing van $7 * 1000 = 7000\text{€}$. De mogelijke besparingen bij situatie 2 liggen dus hoger dan bij situatie 1. De stijging in de voorraad moet in rekening gebracht worden waardoor deze besparingen deels teniet gedaan worden voor beide situaties. Ook de verloren verkopen kunnen dalen bij het tweede geval omwille van het kleiner aantal bestellingen in deze situatie. Dit wordt hieronder verder toegelicht.

Het ontbreken van een stijgende trend in het verschil van de winst bij beide modellen kan verklaard worden door een beperkt gebruik van gezamenlijke bestellingen. Aangezien de bestelpunten van product 1 en 2 sterk stijgen, bevinden de optimale waarden van deze parameters zich steeds dichterbij de optimale waarden van de can-order punten. Een andere verklaring hiervoor kan gezocht worden in het aantal verloren verkopen. Indien minder besteld wordt, verkleint de kans op tekorten. Dit zou in het voordeel werken van de situaties met grotere vaste bestelkosten. Aangezien de bestelpunten voor product 1 en product 2 echter sterk stijgen om de verloren verkopen te minimaliseren, blijft de impact van deze factor beperkt. Uitzonderingen hierop zijn situaties 3, 5, 9 en 12. Dit kan teruggevonden worden in tabel 17. In deze situaties dalen de verloren verkopen sterk als overgegaan wordt van modellen met gecoördineerde bestellingen naar modellen waar de producten apart behandeld worden.

Vergelijking van de verloren verkopen

In tabel 17 werden de verloren verkopen van producten 1 en 2 opgenomen na optimalisatie van de situaties aan de hand van de methodologie van responsoppervlakken. In kolommen 2 en 4 staan respectievelijk de verloren verkopen van product 1 en product 2 als gewerkt wordt met de gezamenlijke bijvulling van de voorraad. In kolommen 3 en 5 staan respectievelijk de verloren verkopen van product 1 en product 2 als deze producten afzonderlijk behandeld worden. In de laatste kolom kan het verschil in tekorten voor product 1 en product 2 samen teruggevonden worden.

In 7 van de 18 gevallen liggen het aantal verloren verkopen lager indien gebruik gemaakt wordt van de gezamenlijke bijvulling van de voorraad. In de overige gevallen zijn de verloren verkopen gelijk voor de twee situaties. Een verklaring hiervoor ligt in het feit dat de kostprijs van verloren verkopen zeer sterk doorweegt. Vermits deze kostprijs hoog is in vergelijking met de voorraadkost voor product 1 en product 2, bedragen de verloren verkopen bijna voor elke situatie bij de optimale waarden nul of bijna nul.

Tabel 17: Verloren verkopen voor product 1 en product 2

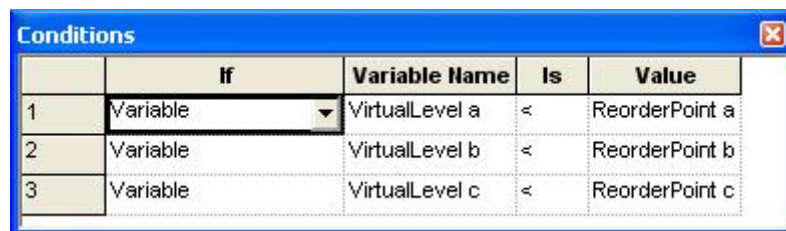
Situatie	Verloren verkopen product 1	Verloren verkopen product 1 zonder can-order	Verloren verkopen product 2	Verloren verkopen product 2 zonder can-order	Totaal verschil met en zonder can-order
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	250,52	0	0	-250,52
4	0	40,7787	25,8704	25,8704	-40,7787
5	0	348,72	62,7441	62,7441	-348,72
6	0	0	0	0	0
7	64,2402	64,2402	40,9228	40,9228	0
8	0	0	0	0	0
9	0	290,8	14,0716	14,0716	-290,8
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	384,15	0	0	-384,15
13	164,05	219,51	38,5352	38,5352	-55,46
14	0	0	125,65	125,65	0
15	290,8	290,8	0	40,9228	-40,9228
16	81,9682	81,9682	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0

6.4.6. Uitbreiding van het model naar n producten (n>2)

Het model in bijlage 5 kan ook uitgebreid worden naar meer dan twee producten. Hieronder worden de stappen die ondernomen moeten worden om het model uit te breiden naar drie producten besproken. Deze stappen zijn de volgende:

- Een nieuwe module Create met de naam `customer order generation c`. Deze module geeft aan frequentie aan dat vraag is naar het product per periode.

- Achter deze nieuwe module create volgt dan een nieuwe module Assign met de naam 'set customer order size c'. Hierin wordt een attribuut gehangen aan de nieuwe Create module waarin de grootte van een bestelling bepaald wordt.
- De hieropvolgende modules Assign (check inventory level for reorder) en Decide (reorder or not) worden aangepast door in beide modules de regel die erin staat voor één van de twee producten over te nemen en hierin de a of de b te veranderen in een c. Voor de module Decide is deze aanpassing te zien in onderstaande figuur. VirtualLevel houdt de grootte van de voorraad bij om te controleren of het bestelpunt bereikt is. VirtualLevel wordt ook gebruikt bij de module Decide waar nagegaan wordt of een can-order punt bereikt is wat in het volgende punt terugkomt.

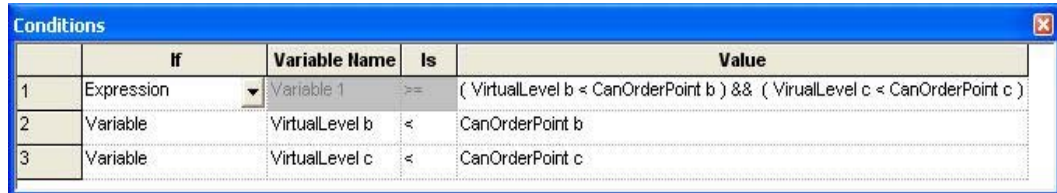


	If	Variable Name	Is	Value
1	Variable	VirtualLevel a	<	ReorderPoint a
2	Variable	VirtualLevel b	<	ReorderPoint b
3	Variable	VirtualLevel c	<	ReorderPoint c

Figuur 9: Aanpassing module Decide om het bestelpunt te controleren

- Vervolgens wordt een module Decide toegevoegd om te controleren of het can-order punt van de producten a en/of b bereikt zijn als product c zijn bestelpunt heeft bereikt. De voorwaarden in alle modules decide (can-order point reached) zien eruit als in figuur 3 hieronder, op de namen van de producten na. Dit wordt uitgelegd aan de hand van een voorbeeld. Stel dat product a zijn bestelpunt bereikt. In figuur 3 is te zien hoe de module decide voor het can-order punt wordt aangepast. Dit is analoog als product b of product c zijn bestelpunt bereikt. Bij drie producten staat de expression waar de twee can-order punten gecontroleerd worden van boven, gevolgd door de controle van de can-order punten apart. Dit is zo omdat de module Decide de voorwaarden van boven naar beneden controleert. Als deze voorwaarde voor de gezamenlijke controle van de can-order punten van producten b en c niet bovenaan zou staan en beide producten bereiken hun can-order punt, dan zou het programma de voorwaarde nemen die het hoogst staat in de rij, bijvoorbeeld waar enkel het can-order punt voor product b gecontroleerd wordt aangezien hieraan is voldaan. Bij een

aanpassing naar N producten, staat eerst de uitdrukking voor de controle voor N-1 can-order punten, gevolgd door de controles voor N-2 can-order punten (hiervan bestaan meerdere combinaties), enzovoort.



	If	Variable Name	Is	Value
1	Expression	Variable 1	>=	(VirtualLevel b < CanOrderPoint b) && (VirtualLevel c < CanOrderPoint c)
2	Variable	VirtualLevel b	<	CanOrderPoint b
3	Variable	VirtualLevel c	<	CanOrderPoint c

Figuur 10: Aanpassing module Decide om het can-order punt te controleren

- Achter elk van deze voorwaarden hangt een module Assign (Can order i), waar de variabele 'Bestel i ($i \in \{a, b, c\}$)' de waarde 1 wordt toegekend als deze besteld moet worden.
- Om te controleren of er voldoende voorraad is van product c wordt een nieuwe module Decide toegevoegd met dezelfde voorwaarde als deze van product a en b, waar de a of de b vervangen wordt door een c.
- Alles wat volgt op de module Decide (enough in inventory) wordt gekopieerd van product a of product b en aangepast naar product c. Dit is analoog voor het laatste onderdeel van het model, beginnende met de module Create (Prep and send order). Ook dit wordt gekopieerd en aangepast naar product c.
- In de bovenste regel van het model wordt de beginwaarde van de voorraad van product c ingegeven zoals dat gedaan is voor product a en product b. Vervolgens worden opnieuw de bestelpunten, de bestelhoeveelheden en de can-order punten berekend en ook ingegeven zoals voor product a en b gedaan is. In transit voor product c wordt ook als 0 verondersteld. In transit is een bestelling die onderweg is naar het bedrijf. Dit komt door de lead time van 15 uur.
- Tot slot moeten voor het bijhouden van de gemiddelde voorraad van het nieuwe product c gedurende de periode en de weergave van de eindvoorraad van product c de module Statistics, te vinden onder het menu Advanced Process, als volgt aangepast worden:

Statistic - Advanced Process					
	Name	Type	Expression	Report Label	Output File
1	Avg Inventory a	Time-Persistent	InventoryLevel a	Avg Inventory a	
2	Avg Inventory b	Time-Persistent	InventoryLevel b	Avg Inventory b	
3	Avg Inventory c	Time-Persistent	InventoryLevel c	Avg Inventory c	
4	Eindvoorraad a	Output	VirtualLevel a	Eindvoorraad a	
5	Eindvoorraad b	Output	VirtualLevel b	Eindvoorraad b	
6	Eindvoorraad c	Output	VirtualLevel c	Eindvoorraad c	

Figuur 11: Extra rijen in de module Statistics

De aanpassing naar vier en meer producten gebeurt analoog. Bij de controle voor het can-order punt als een product zijn bestelpunt bereikt heeft, wordt eerst gecontroleerd of alle andere producten hun can-order punt bereikt hebben, vervolgens de combinaties met 1 product minder enzovoort. Dit gebeurt omdat de module Decide van boven naar beneden de voorwaarden controleert. Als eerst de voorwaarde van het can-order punt van individuele producten staat, zal nooit de optie gekozen worden met meerdere producten aangezien de module stopt bij het eerste individuele product dat zijn can-order punt bereikt.

7. Conclusies

De laatste jaren kwam de logistieke functie sterk naar voor om concurrentievoordeel te behalen. Als deze functie goed beheerd wordt, kunnen producten sneller naar de markt gebracht worden (kortere doorlooptijd) tegen een concurrerende prijs en kwaliteit.

Bij de netwerkconfiguratie wordt getracht de logistieke kosten zo beperkt mogelijk te houden, zonder dat de klantenservice gevaar loopt. Ondernemingen proberen deze klantenservice zelfs op te drijven, mits de opbrengsten hiervan opwegen tegen de kosten voor deze hogere service. Het is dus noodzakelijk een logistiek systeem in zijn totaliteit te benaderen.

Om logistieke problemen te analyseren worden optimalisatie en simulatie al een tijd gebruikt. De beide technieken bezitten echter een aantal beperkingen als methoden apart. De meeste werkelijke systemen zijn te complex om geanalyseerd te worden door trial-and-error. In plaats van alle mogelijke oplossingen uit te voeren, wordt via optimalisatie geprobeerd het aantal simulatieruns te beperken en zo toch een optimale of bijna optimale prestatie te bekomen. Dit reduceert de benodigde computertijd om tot een goede oplossing te komen en het geeft inzicht in de kwaliteit van de oplossing en de prestaties van het proces. Hiertoe zijn een aantal simulatie-optimalisatie technieken ontwikkeld. Voor de toepassing van deze technieken is echter nog een grote specifieke kennis nodig, waardoor ze niet zomaar door iedereen toegepast kunnen worden.

In deze eindverhandeling wordt de methodologie van responsoppervlakken nader bestudeerd. De methodologie van responsoppervlakken wordt gebruikt om een benadering van het optimale punt te vinden in een multidimensionale parameter ruimte. In de eerste fase wordt een functie geschat van de eerste orde. Hieruit kan afgeleid worden welke parameters de grootste invloed hebben op het resultaat. Verfijning naar het optimale punt toe wordt gedaan aan de hand van het ontwerp van tweede orde, gebaseerd op de parameters met de grootste invloed. Zo kunnen kwadratische- en interactie-effecten ontdekt

worden in de ruimte dichtbij het optimale punt. Nadat de functie bepaald is en de coëfficiënten van deze functie geschat zijn, kan het optimum bepaald worden.

De techniek wordt eerst geïllustreerd aan de hand van een model ontwikkeld door Posner en Berg (1989). In dit model werden 3 controleerbare (interne) parameters geoptimaliseerd. Deze parameters waren de buffergrootte, de hersteltijd van een defecte machine en de tijd tussen twee defecten van de machine. De methodologie van responsoppervlakken bleek niet geschikt om dit probleem op te lossen. Ondanks het feit dat de drie parameters sterk significant waren, bleef de verklaring van het model door deze drie parameters beperkt tot 49,9%. De functie van de eerste orde was significant dus werd geëvolueerd naar een nieuw voorlopig optimum via de techniek van de steepest ascent. Alle verdere stappen in de methodologie van responsoppervlakken bleken niet significant te zijn, waardoor het punt gevonden in de eerste stap ook overgenomen werd als het optimum.

Het tweede deel van het onderzoek handelt over de gezamenlijke bijvulling van de voorraad. Hiervoor werd binnen Arena een model ontwikkeld voor twee producten. Van dit model werden drie externe parameters veranderd zodat 18 verschillende situaties ontstonden. Al deze situaties werden geoptimaliseerd aan de hand van de methodologie van responsoppervlakken. Vervolgens werden de resultaten van deze achttien situaties met elkaar vergeleken om na te gaan of er significante verschillen in zaten. In de eerste stap werden de significante parameters uit stap 1 van de methodologie van responsoppervlakken met elkaar vergeleken. Hierbij bleken geen significante verschillen op te treden. Het waren voornamelijk het bestelpunt van product 1 en het bestelpunt van product 2 die significant waren in de 18 situaties. Verder werden de optima met elkaar vergeleken. Bij een verandering van de verdeling van de vraag kwamen de waarden voor de optima goed overeen. Bij een verandering in de vaste bestelkosten werd een lichte neergaande trend gevonden bij situaties 1 tot en met 6 en situaties 7 tot en met 12. De optima van situaties 13 tot en met 18 bleven ongeveer constant omdat situaties 13, 14, 15 en 16 verloren verkopen hebben en situaties 17 en 18 niet. Dit komt overeen met de verwachtingen.

De optima werden ook vergeleken met de optima van het model waar beide producten apart behandeld werden. Hier was in 17 van de 18 gevallen de winst groter van het model waar

gewerkt werd met de gezamenlijke bijvulling van de voorraad. De grootte van de besparing wordt echter niet groter naarmate de vaste bestelkost stijgt. Dit houdt verband met de verloren verkopen. Bij de vergelijking van de verloren verkopen tussen deze twee modellen zijn er niet veel verschillen. Dit kan verklaard worden door de sterk gestegen bestelpunten van product 1 en product 2 omwille van de grote tekortkost per eenheid product. Als bestellingen gecoördineerd worden, wordt verwacht dat de verloren verkopen dalen, waardoor de winst groter wordt dan wanneer de producten apart behandeld worden. Deze besparingen worden groter als de vaste bestelkosten stijgen. Hierdoor wordt minder besteld waardoor de kans op tekorten minder vaak voorkomt. De grootte van de voorraad neemt hierdoor echter toe. De bevindingen stemmen dus niet overeen met de verwachtingen uit de literatuur.

8. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Uit de resultaten van de toepassing van de methodologie van responsoppervlakken op het model van Posner en Berg (1989) blijkt dat de regressie van de eerste orde, bekomen via de methode van responsoppervlakken, slechts een beperkt deel van de variatie in het model verklaart. De regressie van de tweede orde verhoogt dit verklarend effect maar weinig. Daarom is het aan te raden een andere techniek van simulatie-optimalisatie toe te passen op dit probleem om te kijken of dit betere resultaten oplevert.

Bij het model omtrent de gezamenlijke bijvulling van de voorraad zijn een aantal verdere onderzoeken mogelijk. Allereerst kan onderzocht worden hoe de bevindingen veranderen als de kosten veranderen. Een lagere kost voor tekorten, een grotere vaste bestelkost en/of hogere voorraadkosten zorgen er misschien voor dat de significante parameters en de resultaten veranderen.

Vervolgens kan gekeken worden hoe de resultaten veranderen als de lead time niet meer als constant behandeld wordt. In de praktijk kunnen grote schommelingen optreden in de tijd die nodig is om een product te ontvangen van een leverancier. Ten slotte kan ook de uitbreiding van het model, dat nu is opgesteld voor twee producten, naar meerdere producten onderzocht worden. Hier is de mogelijkheid om te besparen nog groter, daar de vaste bestelkost nu voor 2 extra producten bespaard kan worden in plaats van voor slechts 1 product zoals in dit onderzoek. Dit leunt al meer aan bij de werkelijkheid, waar bedrijven meestal voor meerdere producten moeten beslissen.

9. Lijst van geraadpleegde werken

9.1. Boeken en artikels

- Ackermann, J. en Müller, E. (2007) 'Modelling, planning and designing of logistics structures of regional competence-cell-based networks with structure types', *Robotics and computer – integrated manufacturing*, 23:6, p. 601-607.
- Andrad'ottir, S. (1998) 'A review of simulation optimization techniques', *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, p. 151-158
- Andrad'ottir, S.; Fu, M.C.; Carson, J.S.; Glover, F.; Harrell, C.R.; Yu-Chi Ho; Kelly, J.P. en Robinson, S.M. (2000) 'Integrating optimization and simulation: research and practice', *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, p. 610-616
- Angün, E.; Kleijnen, J.P.C.; Hertog, D.D. en Gurkan, G. (2002) 'Response surface methodology revisited', *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, p. 377-383.
- April, J.; Glover, F.; Kelly, J.P. en Laguna, M. (2003) 'Practical introduction to simulation optimization', *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, p. 71-78
- April, J.; Glover, F.W. en Fu, M.C. (2005) 'Simulation optimization: a review, new developments, and applications', *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, p. 83-95
- Azadivar, F. (1999) 'Simulation optimization methodologies', *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, p. 93-100
- Ballou, R.H. (1992) *Business logistics management* (3de druk), Englewood Cliffs, Prentice Hall
- Boberg, K.; Sautter, E.T. en Maltz, A. (1999), 'A customer service course: Bringing marketing and logistics together', *Journal of Marketing Education*, 21:2, p. 138-145.
- Boersma, J.; Hoenderkamp, T. en Roos, E. (1995) *Simulatie* (4^{de} druk), Schoonhoven, Academic Services, hoofdstuk 1 en 2

- Boesel, J.; Glover, F.; Bowden, R.O. en Kelly, J.P. (2001) 'Future of simulation optimization', *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, p. 1466-1469
- Bolis, S. en Maggi, R. (2003) 'Logistics Strategy and Transport Service Choices: An Adaptive Stated Preference Experiment', *Growth and Change*, 34:4, p. 490-504.
- Bowden, R.O. en Hall, J.D. (1998) 'Simulation optimization research and development', *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, p. 1693-1698
- Box, G.E.P. en Draper, N.R. (1987) *Empirical model-building and response surfaces*, New York, Wiley
- Brewer, A.M. en Hensher, D.A. (2001) 'Identifying the Overarching Logistics Strategy of Business Processes: An Exploratory Analysis', *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 4:1, p. 1-41.
- Carson, Y. en Maria, A. (1997) 'Simulation optimization: methods and applications', *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, p. 118-126
- Chan, F.T.S.; Lee, W.B.; Choy, K.L. en Chow, H.K.H. (2005), 'Design of a knowledge-based logistics strategy system', *Expert systems with applications*, 29:2, p. 272-290
- Chase, R.B.; Jacobs, R.F. en Aquilano, N.J. (2005) *Operations Management for competitive advantage* (11^{de} druk), New York, McGraw-Hill
- Chiadamrong N. (2003), A sequential procedure for manufacturing system design, *ScienceAsia*, 29, p. 57-65
- Chiu, H.N. (1995) 'The integrated logistics management system: a framework and case study', *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25:6, p. 4-22.
- Dekker, R.; Piersma, N.; van Oortmarssen, G.J. en Nicolai, R.P. (2004) 'Automated response surface methodology for stochastic optimization models with unknown variance', *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, p. 491-499.
- Esmeijer, G.W. (2001) *Operationele interne logistiek*, Schoonhoven, Academic service, hoofdstuk 9.
- Fleming, P.J.; Stewart, P. en MacKenzie, S.A. (2002) 'On the response surface methodology and designed experiments for computationally intensive distributed aerospace simulations', *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, p. 476-482.

- Gao, Z.; Yang, L.; Ji, X. en Li, K. (2006) 'Logistics distribution centers location problem and algorithm under fuzzy environment', *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 208:2, p. 303-315.
- Gehlsen, B. en Page, B. (2001) 'A framework for distributed simulation optimization', *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, p. 508-514
- Glover, F.; April, J., Better, M., Kelly J.P. en Laguna, M. (2006) 'Enhancing Business Process Management With Simulation Optimization', *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, p. 642-649
- Glover, F.; Kelly, J.P. en Laguna, M. (1998) The optquest approach to crystal ball simulation optimization, Colorado, University of Colorado
- Goyal, S.K. en Satir, A.T. (1989) 'Joint replenishment inventory control: Deterministic and stochastic models', *European Journal of Operations Research*, 38, p. 2-13
- Gürkan, G; Özge, Y.A. en Robinson, S.M. (1994) 'Sample path optimization in simulation', *Proceedings of the 1994 winter simulation conference*, p. 247-254
- Haley, G.T en Krishnan, R. (1985), 'It's time for CALM: computeraided logistics management', *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 15:7, p. 19-32
- Hillier, F.S. en Lieberman, G.J. (2005) *Introduction to operations research* (8^{ste} druk), New York, McGraw-Hill
- Kelton, D.W.; Sadowski, R.P. en Sturrock, D.T. (2007) *Simulation with Arena* (4^{de} druk), New York, McGraw-Hill, hoofdstuk 1
- Khuri, A. I. en Cornell, J. A. (1988), *Response surfaces: design and analyses*, Marcel Dekker Inc., New York
- Kim, J. en Ólafsson, S. (2002) 'Simulation optimization', *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, p. 79-84
- Kleijnen, J.P.C. en Sargent, R.G. (2000), A methodology for fitting and validating metamodels in simulation, '*European journal of Operational Research*', 30, p. 14-29
- Krueger, A.O. (2003), 'Globalisation, Preserving the benefits', *Tijdschrift OECD Observer*, Nr.240/241, p. 21-22.
- Lai, J.P. (2006) *Surrogate search: a simulation optimization methodology for large scale systems*, Pittsburgh, University of Pittsburgh

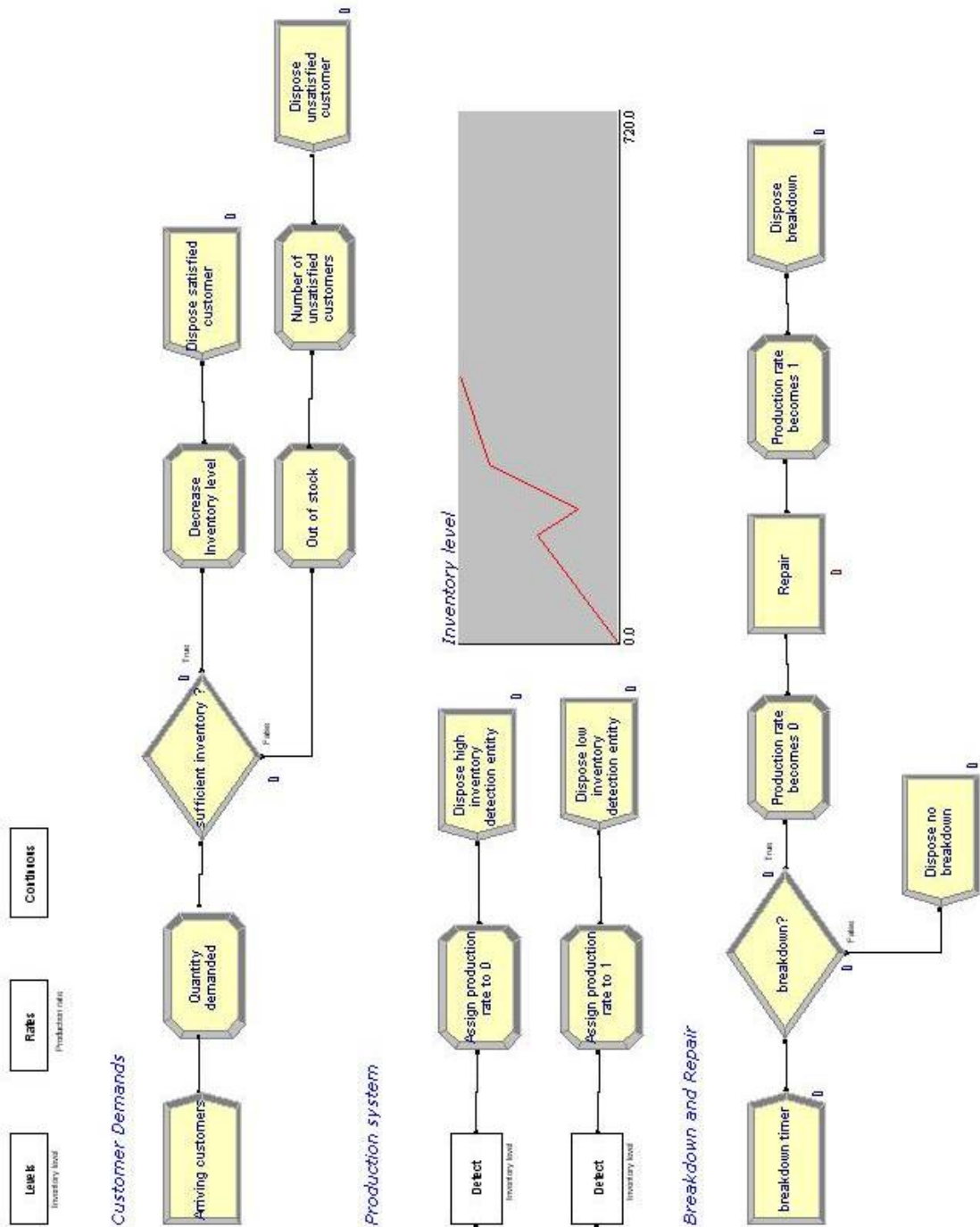
- Neddermeijer G.H., van Oortmarssen G.J., Piersma N. en Dekker R. (2000), A framework for response surface methodology for simulation optimization, *'Proceedings of the 2000 winter simulation conference'*, p. 129-136
- Ploos van Amstel, M.J.; Ploos van Amstel, W. en van Goor, A.R (1999) Fysieke distributie: denken in toegevoegde waarde (4de druk), Houten, Educatieve Partners Nederland BV.
- Porter, M.E. (1985) *Competitive advantage, Creating and Sustaining Superior Performance*, New York, The Free Press, a division of Macmillan Inc., Hoofdstuk 1.
- Posner, M.J.M. en Berg, M. (1989), Analysis of a production-inventory system with unreliable production facility, *'Operations Research Letters 8'*, p. 339-345
- Powers, R.F. (1989), 'Optimization models for logistics decisions', *Journal of business logistics*, 10:1, p. 106
- Ramaekers K., Janssens G.K. en Van Landeghem H. (2006), Towards logistics system parameter optimisation through the use of response surfaces, *4OR: A Quarterly Journal for Operations Research*, 4: 4, p. 331-342
- Silver, S.A.; Pyke, D.F. en Peterson, R. (1998) *Inventory Management and Production Planning and Scheduling (3^{de} druk)*, New York, John Wiley and Sons Inc.
- Suga, N. (2005), 'International Economies of Scale and the Gains from Trade', *Journal of Economics*, 85:1, p. 73-97
- Wardrop, D.M. en Myers, R.H. (1990), Some response surface designs for finding optimal conditions, *'Journal of Statistical Planning and Inference'*, 25, p. 7-28
- Waziruddin, S.; Brogan, D.C. en Reynolds Jr., P.F. (2004) 'Coercion through optimization: A classification of optimization techniques', *Proceedings of the 2004 Fall Simulation Interoperability Workshop*, September 2004, p. 1-9
- Witlox, F. (2006) *Vervoersbeleid – expeditie en verzending van goederen*, Diepenbeek, Universiteit Hasselt

9.2. Websites

- Center for Logistics Management (2007) 'What is logistics management?' (online)
(geraadpleegt op 17/10/2007)
Dit document is consulteerbaar op het volgende webadres:
URL:<http://www.unr.edu/coba/logis/>
- Laguna, M.; Kelly, J.P.; Glover, F. en April, J. (2004) 'The exploding domain of simulation optimization' (online)
Dit document is consulteerbaar op het volgende webadres:
URL:<http://www.opttek.com/publications/Exploding%20Domain%20sim%20opt%206-18-06.pdf>
- Lammers, B.; Ploos van Amstel, M. en Schoonderwoerd, B. (2002) 'De praktische kant van ketenlogistiek –van kinderschoenen naar actiestappers–' (online)
Dit document is consulteerbaar op het volgende webadres:
<URL:http://www.evo.nl/evo/menu.nsf/dyn_index.html?OpenForm&url=http://www.evo.nl/EVO/digifolder05.nsf/htmlViewDocuments/5122B7390BF71D44C1256FF500455F46?OpenDocument>
- Lammers, B.; Ploos van Amstel, M. en Schoonderwoerd, B. (2005) 'De logistieke keten-SWOT als handig hulpmiddel voor het MKB om betere resultaten te behalen' (online)
Dit document is consulteerbaar op het volgende webadres:
<URL:http://www.evo.nl/evo/menu.nsf/dyn_index.html?OpenForm&url=http://www.evo.nl/EVO/digifolder05.nsf/htmlViewDocuments/5122B7390BF71D44C1256FF500455F46?OpenDocument>
- Lammers, B. en Sauton, J.P. (2003) 'Op weg naar een betere positie van 'logistiek' binnen het bedrijf' (online)
Dit document is consulteerbaar op het volgende webadres:
<URL:http://www.evo.nl/evo/menu.nsf/dyn_index.html?OpenForm&url=http://www.evo.nl/EVO/digifolder05.nsf/htmlViewDocuments/5122B7390BF71D44C1256FF500455F46?OpenDocument>

Bijlagen

Bijlage 1: Model van Posner en Berg (1989)



Bijlage 2: Spss output eerste orde (1^{ste} stap)

Buffergrootte voor simulatie: 70 – 110 – 150

Hersteltijd voor simulatie: 1,5 – 3 – 4,5

Tijd tussen defecten voor simulatie: 6 – 9 – 12

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,706(a)	,499	,491	17480,72750

a Predictors: (Constant), FAILURE, REPAIR, BUFFER

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	56287931105,550	3	18762643701,850	61,401	,000(a)
	Residual	56531529272,920	185	305575833,908		
	Total	112819460378,470	188			

a Predictors: (Constant), FAILURE, REPAIR, BUFFER

b Dependent Variable: WINST

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	110108,434	1271,536		86,595	,000
	BUFFER	13653,775	1557,307	,456	8,768	,000
	REPAIR	-13108,919	1557,307	-,438	-8,418	,000
	FAILURE	9405,333	1557,307	,314	6,039	,000

a Dependent Variable: WINST

Bijlage 3: Spss output eerste orde (2^{de} stap)

Buffergrootte voor simulatie: 122 – 162 – 202
 Hersteltijd voor simulatie: 0,5 – 1,14 – 1,78
 Tijd tussen defecten voor simulatie: 8,67 – 11,67 – 14,67

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,175(a)	,031	,015	21090,25301

a Predictors: (Constant), FAILURE, REPAIR, BUFFER

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2591177087,153	3	863725695,718	1,942	,124(a)
	Residual	82287772804,123	185	444798771,914		
	Total	84878949891,276	188			

a Predictors: (Constant), FAILURE, REPAIR, BUFFER

b Dependent Variable: WINST

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	132344,051	1534,090		86,269	,000
	BUFFER	529,430	1878,869	,020	,282	,778
	REPAIR	-690,805	1878,869	-,027	-,368	,714
	FAILURE	-4450,549	1878,869	-,171	-2,369	,019

a Dependent Variable: WINST

Bijlage 4: Spss output tweede orde

Buffergrootte voor simulatie: 122 – 162 – 202
 Hersteltijd voor simulatie: 0,5 – 1,14 – 1,78
 Tijd tussen defecten voor simulatie: 8,67 – 11,67 – 14,67

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,257(a)	,066	,026	21141,62108

a Predictors: (Constant), FAILURE², REPXFAIL, BUFXFAIL, REPXBUF, FAILURE, REPAIR, BUFFER, REPAIR², BUFFER²

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	6565545552,205	9	729505061,356	1,632	,108(a)
	Residual	92522405347,714	207	446968141,776		
	Total	99087950899,919	216			

a Predictors: (Constant), FAILURE², REPXFAIL, BUFXFAIL, REPXBUF, FAILURE, REPAIR, BUFFER, REPAIR², BUFFER²

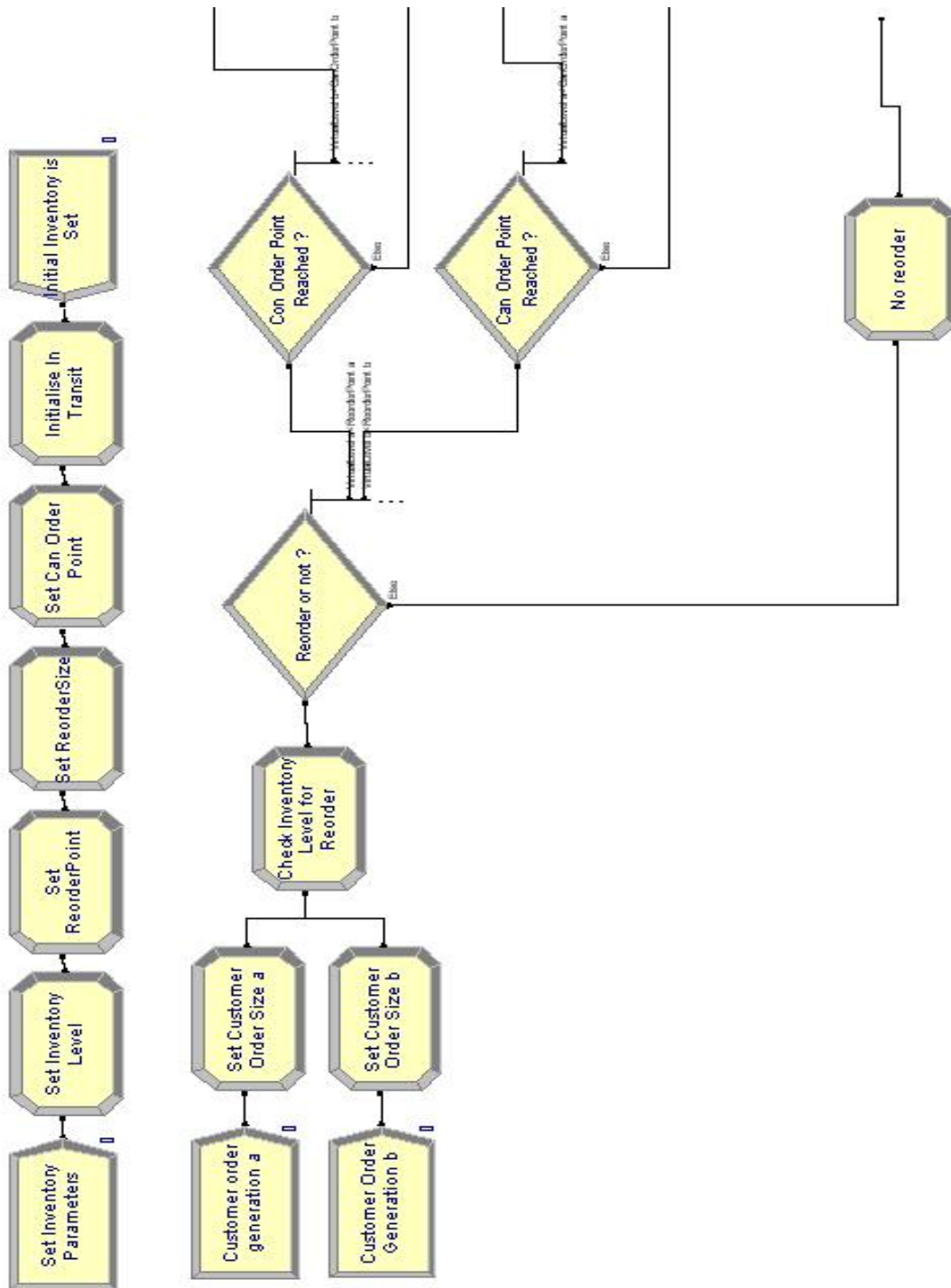
b Dependent Variable: WINST

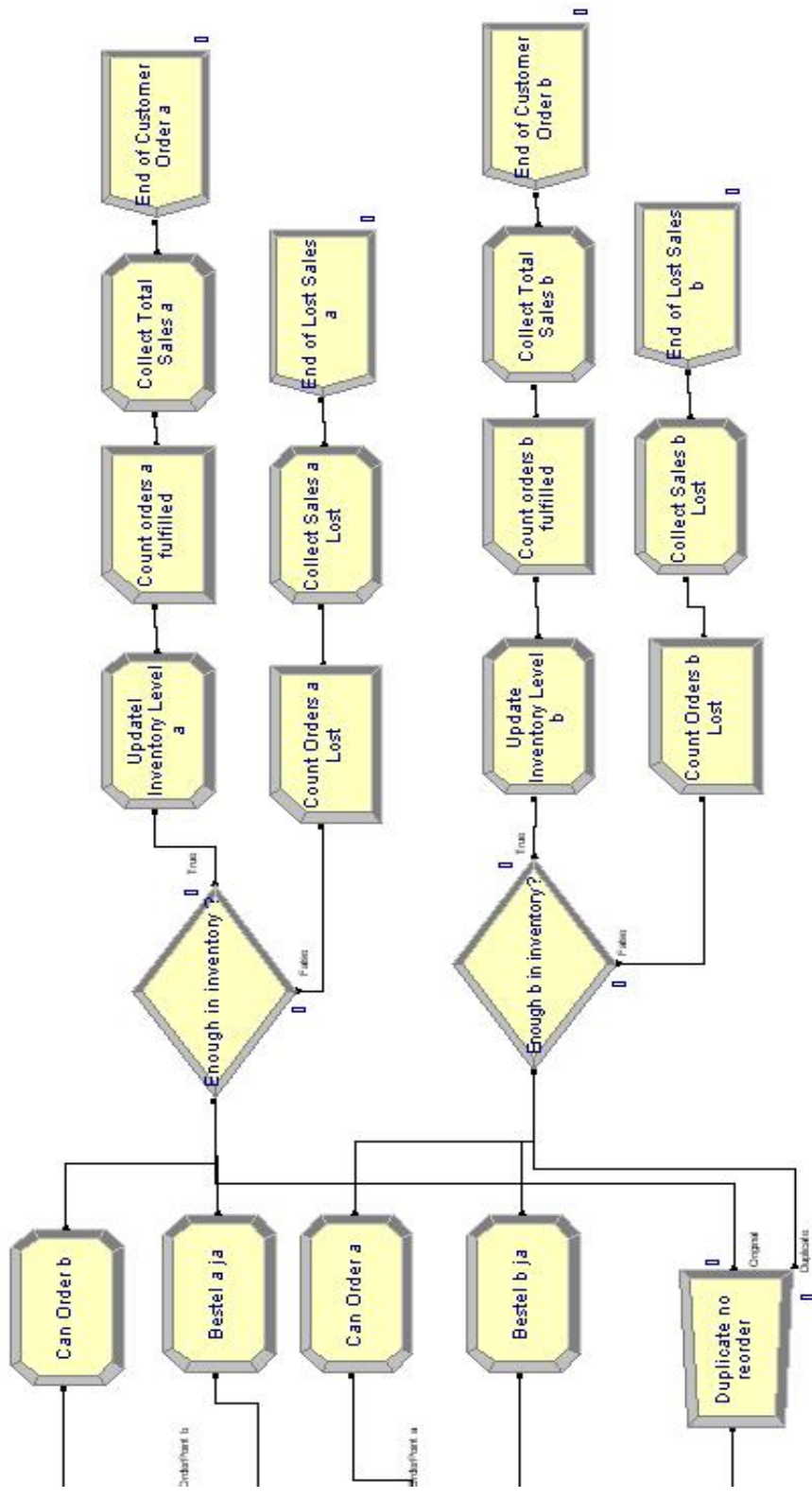
Coefficients(a)

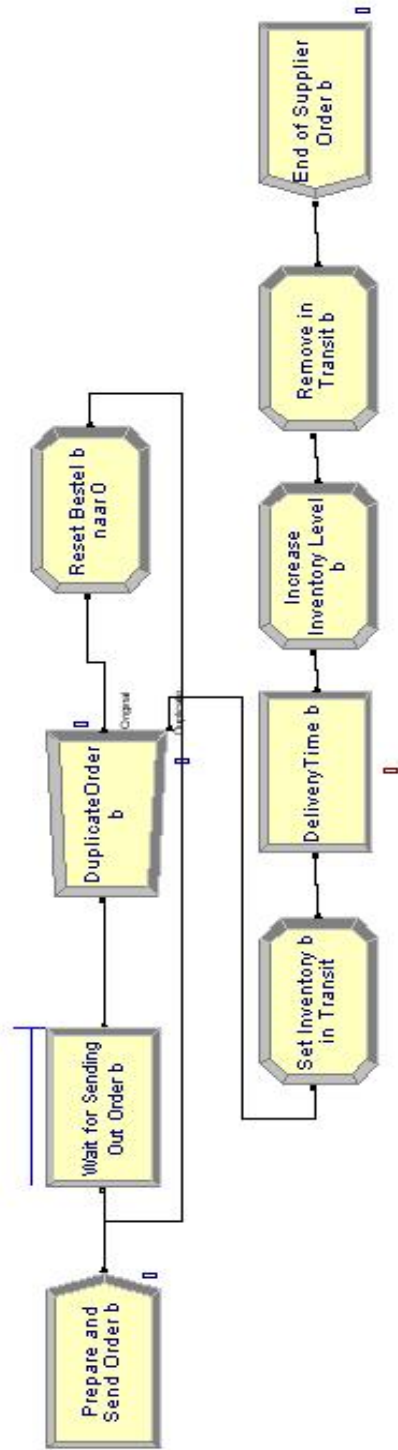
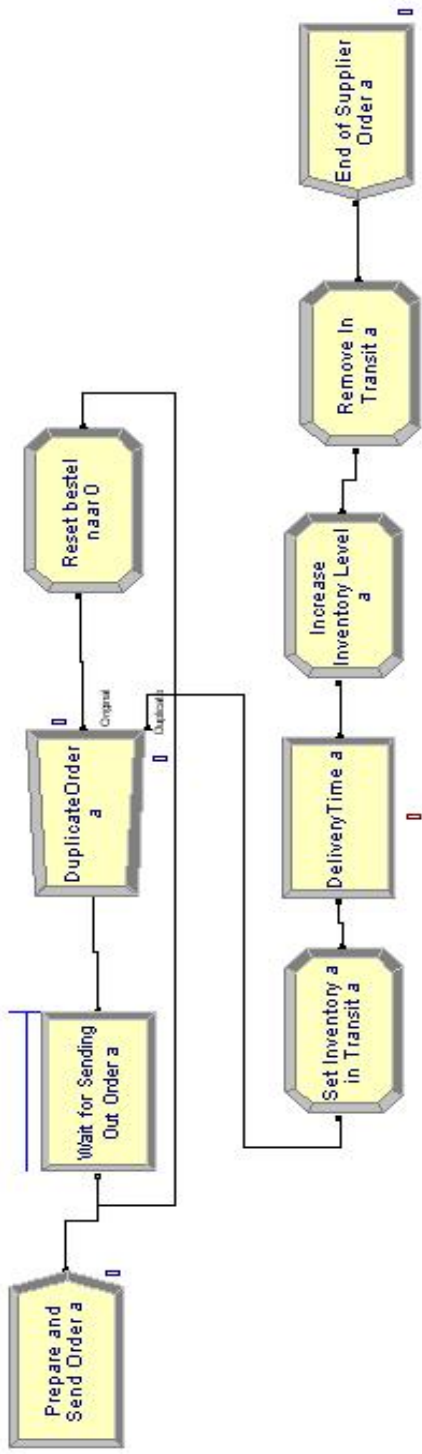
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	139148,119	4026,037		34,562	,000
	BUFFER	856,724	1643,317	,035	,521	,603
	REPAIR	-690,805	1883,445	-,025	-,367	,714
	FAILURE	-3613,688	1643,317	-,148	-2,199	,029
	BUFFER ²	-640,164	2230,614	-,021	-,287	,774
	REPXBUF	906,951	2306,740	,026	,393	,695
	REPAIR ²	-6437,496	3032,824	-,149	-2,123	,035
	BUFXFAIL	-472,663	2306,740	-,014	-,205	,838
	REPXFAIL	4250,318	2306,740	,124	1,843	,067
	FAILURE ²	-3227,564	2230,614	-,108	-1,447	,149

a Dependent Variable: WINST

Bijlage 5: Model voor gezamenlijke aanvulling voorraden







Bijlage 6: De verschillende situaties

Situatie	Verdeling vraag product 1	Verdeling vraag product 2	Vaste bestel-kost	Variabele bestel-kost (product 1 - product 2)
1	rate 0,25 - expo 40	rate 1,00 - expo 15	500	50 - 100
2	rate 0,50 - expo 20	rate 0,50 - expo 30	500	50 - 100
3	rate 0,25 - expo 40	rate 1,00 - expo 15	1000	50 - 100
4	rate 0,50 - expo 20	rate 0,50 - expo 30	1000	50 - 100
5	rate 0,25 - expo 40	rate 1,00 - expo 15	2000	50 - 100
6	rate 0,50 - expo 20	rate 0,50 - expo 30	2000	50 - 100
7	rate 0,25 - expo 40	rate 1,00 - expo 15	500	100 - 100
8	rate 0,50 - expo 20	rate 0,50 - expo 30	500	100 - 100
9	rate 0,25 - expo 40	rate 1,00 - expo 15	1000	100 - 100
10	rate 0,50 - expo 20	rate 0,50 - expo 30	1000	100 - 100
11	rate 0,25 - expo 40	rate 1,00 - expo 15	2000	100 - 100
12	rate 0,50 - expo 20	rate 0,50 - expo 30	2000	100 - 100
13	rate 0,25 - expo 40	rate 1,00 - expo 15	500	100 - 50
14	rate 0,50 - expo 20	rate 0,50 - expo 30	500	100 - 50
15	rate 0,25 - expo 40	rate 1,00 - expo 15	1000	100 - 50
16	rate 0,50 - expo 20	rate 0,50 - expo 30	1000	100 - 50
17	rate 0,25 - expo 40	rate 1,00 - expo 15	2000	100 - 50
18	rate 0,50 - expo 20	rate 0,50 - expo 30	2000	100 - 50

Bijlage 7: Berekening EOQ voor de verschillende situaties

Situatie 1

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	500	10	1000

$$\sqrt{(2 * 10000 * 500) / 10}$$

Situatie 2

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	500	10	1000

$$\sqrt{(2 * 10000 * 500) / 10}$$

Product 2

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	500	20	866

$$\sqrt{(2 * 15000 * 500) / 20}$$

Product 2

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	500	20	866

$$\sqrt{(2 * 15000 * 500) / 20}$$

Situatie 3

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	1000	10	1414

$$\sqrt{(2 * 10000 * 1000) / 10}$$

Situatie 4

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	1000	10	1414

$$\sqrt{(2 * 10000 * 1000) / 10}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	1000	20	1225

$$\sqrt{(2 * 15000 * 1000) / 20}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	1000	20	1225

$$\sqrt{(2 * 15000 * 1000) / 20}$$

Situatie 5

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	2000	10	2000

$$\sqrt{(2 * 10000 * 2000) / 10}$$

Situatie 6

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	2000	10	2000

$$\sqrt{(2 * 10000 * 2000) / 10}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	2000	20	1732

$$\sqrt{(2 * 15000 * 2000) / 20}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	2000	20	1732

$$\sqrt{(2 * 15000 * 2000) / 20}$$

Situatie 7

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	500	20	707

$$\sqrt{(2 * 10000 * 500) / 20}$$

Situatie 8

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	500	20	707

$$\sqrt{(2 * 10000 * 500) / 20}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	500	20	866

$$\sqrt{(2 * 15000 * 500) / 20}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	500	20	866

$$\sqrt{(2 * 15000 * 500) / 20}$$

Situatie 9

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	1000	20	1000

$$\sqrt{(2 * 10000 * 1000) / 20}$$

Situatie 10

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	1000	20	1000

$$\sqrt{(2 * 10000 * 1000) / 20}$$

Product 2

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	1000	20	1225

$$\sqrt{(2 * 15000 * 1000) / 20}$$

Situatie 11

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	2000	20	1414

$$\sqrt{(2 * 10000 * 2000) / 20}$$

Situatie 12

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	2000	20	1414

$$\sqrt{(2 * 10000 * 2000) / 20}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	2000	20	1732

$$\sqrt{(2 * 15000 * 2000) / 20}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	2000	20	1732

$$\sqrt{(2 * 15000 * 2000) / 20}$$

Situatie 13

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	500	20	707

$$\sqrt{(2 * 10000 * 500) / 20}$$

Situatie 14

<u>Product 1</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
10000	500	20	707

$$\sqrt{(2 * 10000 * 500) / 20}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	500	10	1225

$$\sqrt{(2 * 15000 * 500) / 10}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	500	10	1225

$$\sqrt{(2 * 15000 * 500) / 10}$$

Situatie 15

<u>Product 1</u>				
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈	
10000	1000	20	1000	

$$\sqrt{(2 * 10000 * 1000) / 20}$$

Situatie 16

<u>Product 1</u>				
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈	
10000	1000	20	1000	

$$\sqrt{(2 * 10000 * 1000) / 20}$$

<u>Product 2</u>				
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈	
15000	1000	10	1732	

$$\sqrt{(2 * 15000 * 1000) / 10}$$

<u>Product 2</u>				
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈	
15000	1000	10	1732	

$$\sqrt{(2 * 15000 * 1000) / 10}$$

Situatie 17

<u>Product 1</u>				
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈	
10000	2000	20	1414	

$$\sqrt{(2 * 10000 * 2000) / 20}$$

Situatie 18

<u>Product 1</u>				
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈	
10000	2000	20	1414	

$$\sqrt{(2 * 10000 * 2000) / 20}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	2000	10	2449

$$\sqrt{(2 * 15000 * 2000) / 10}$$

<u>Product 2</u>			
Gemiddelde vraag per periode	Vaste bestelkost	Opslagkost per periode per eenheid	EOQ ≈
15000	2000	10	2449

$$\sqrt{(2 * 15000 * 2000) / 10}$$

Bijlage 8: Berekening can-order punten voor de verschillende situaties

Situatie 1

<u>Product 1</u>	
Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1000
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	9
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	450

<u>Product 2</u>	
Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	866
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	16,2
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	405

Situatie 2

<u>Product 1</u>	
Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1000
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	9
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	450

<u>Product 2</u>	
Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	866
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	16,2
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	405

Situatie 3Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1414
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	6,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	640

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1225
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	11,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	570

Situatie 4Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1414
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	6,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	640

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1225
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	11,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	570

Situatie 5Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	2000
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	4,5
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	900

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1732
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	8,1
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	810

Situatie 6Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	2000
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	4,5
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	900

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1732
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	8,1
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	810

Situatie 7Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	707
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = $(\text{Vraag-BV})/\text{EOQ}$	12,7
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	318

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	866
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = $(\text{Vraag-BV})/\text{EOQ}$	16,2
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	405

Situatie 8Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	707
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = $(\text{Vraag-BV})/\text{EOQ}$	12,7
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	318

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	866
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = $(\text{Vraag-BV})/\text{EOQ}$	16,2
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	405

Situatie 9Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1000
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = $(\text{Vraag-BV})/\text{EOQ}$	9
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	450

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1225
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = $(\text{Vraag-BV})/\text{EOQ}$	11,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	570

Situatie 10Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1000
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = $(\text{Vraag-BV})/\text{EOQ}$	9
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	450

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1225
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = $(\text{Vraag-BV})/\text{EOQ}$	11,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	570

Situatie 11Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1414
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	6,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	640

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1732
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	8,1
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	810

Situatie 12Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1414
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	6,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	640

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1732
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	8,1
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	810

Situatie 13Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	707
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	12,7
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	318

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1225
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	11,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	570

Situatie 14Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	707
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	12,7
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	318

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1225
Vaste Bestelkost	500
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	11,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	570

Situatie 15Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1000
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	9
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	450

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1732
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	8,1
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	810

Situatie 16Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1000
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	9
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	450

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1732
Vaste Bestelkost	1000
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	8,1
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	810

Situatie 17Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1414
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	6,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	640

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	2449
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	5,7
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	1140

Situatie 18Product 1

Vraag gedurende periode	10000
Beginvoorraad	1000
EOQ	1414
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	20
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	6,4
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	640

Product 2

Vraag gedurende periode	15000
Beginvoorraad	1000
EOQ	2449
Vaste Bestelkost	2000
Voorraadkost per eenheid per periode	10
# bestellingen = (Vraag-BV)/EOQ	5,7
Can-order punt = (#bestellingen * vaste bestelkost/voorraadkost per eenheid per periode)	1140

Bijlage 9: Berekening van de kosten voor 1 replicatie

Variabele gegevens	
aantal verkopen product 1	9288,7
aantal verkopen product 2	13713,85
verloren verkopen product 1	552,33
verloren verkopen product 2	831,81
aantal bestellingen	20
aantal aankopen product 1	9000
aantal aankopen product 2	13022
gemiddelde voorraad product 1	519,64
gemiddelde voorraad product 2	418,14
eindvoorraad product 1	711,3
eindvoorraad product 2	308,15
Vaste gegevens	
verkoopprijs product 1	110
verkoopprijs product 2	110
vaste bestelkosten	500
aankoopprijs product 1	50
aankoopprijs product 2	100
voorraadkost product 1	10
voorraadkost product 2	20
Winst	668645,9

Bijlage 10: Output van de 7 verschillende ontwerpen

Model (5 replicaties volledig)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,745(a)	,554	,546	36826,53992

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	536546294070,020	6	89424382345,003	65,938	,000(a)
	Residual	431269705565,563	318	1356194042,659		
	Total	967815999635,583	324			

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

b Dependent Variable: WINST

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	296744,287	2042,769		145,266	,000
	BESTELP1	25090,252	2058,666	,456	12,188	,000
	BESTELH1	4474,534	2058,666	,081	2,174	,030
	CANORD1	4794,138	2058,666	,087	2,329	,020
	BESTELP2	31489,786	2058,666	,573	15,296	,000
	BESTELH2	-1589,929	2058,666	-,029	-,772	,441
	CANORD2	3169,654	2058,666	,058	1,540	,125

a Dependent Variable: WINST

Model (5 replicaties zonder centrum)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,749(a)	,562	,553	36576,65305

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	536546294070,021	6	89424382345,003	66,842	,000(a)
	Residual	418747534711,462	313	1337851548,599		
	Total	955293828781,483	319			

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

b Dependent Variable: WINST

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	297179,608	2044,697		145,342	,000
	BESTELP1	25090,252	2044,697	,459	12,271	,000
	BESTELH1	4474,534	2044,697	,082	2,188	,029
	CANORD1	4794,138	2044,697	,088	2,345	,020
	BESTELP2	31489,786	2044,697	,576	15,401	,000
	BESTELH2	-1589,929	2044,697	-,029	-,778	,437
	CANORD2	3169,654	2044,697	,058	1,550	,122

a Dependent Variable: WINST

Model (1 replicatie volledig)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,834(a)	,696	,664	31927,51523

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	135244163534,928	6	22540693922,488	22,112	,000(a)
	Residual	59123241268,190	58	1019366228,762		
	Total	194367404803,118	64			

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

b Dependent Variable: WINST

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	277067,109	3960,121		69,964	,000
	BESTELP1	33347,192	3990,939	,605	8,356	,000
	BESTELH1	5418,005	3990,939	,098	1,358	,180
	CANORD1	3401,513	3990,939	,062	,852	,398
	BESTELP2	30253,176	3990,939	,549	7,580	,000
	BESTELH2	-3329,692	3990,939	-,060	-,834	,408
	CANORD2	5821,359	3990,939	,106	1,459	,150

a Dependent Variable: WINST

Model (1 replicatie zonder centrum)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,839(a)	,704	,673	31555,05012

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	135244163534,928	6	22540693922,488	22,638	,000(a)
	Residual	56756107721,464	57	995721188,096		
	Total	192000271256,392	63			

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

b Dependent Variable: WINST

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	276312,774	3944,381		70,052	,000
	BESTELP1	33347,192	3944,381	,609	8,454	,000
	BESTELH1	5418,005	3944,381	,099	1,374	,175
	CANORD1	3401,513	3944,381	,062	,862	,392
	BESTELP2	30253,176	3944,381	,552	7,670	,000
	BESTELH2	-3329,692	3944,381	-,061	-,844	,402
	CANORD2	5821,359	3944,381	,106	1,476	,145

a Dependent Variable: WINST

Model (1replicatie fractioneel)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,842(a)	,710	,516	43333,80321

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	41287298818,007	6	6881216469,668	3,664	,040(a)
	Residual	16900366505,388	9	1877818500,599		
	Total	58187665323,395	15			

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

b Dependent Variable: WINST

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	273469,602	10833,451		25,243	,000
	BESTELP1	34776,965	10833,451	,577	3,210	,011
	BESTELH1	10526,565	10833,451	,175	,972	,357
	CANORD1	-7475,015	10833,451	-,124	-,690	,508
	BESTELP2	30765,735	10833,451	,510	2,840	,019
	BESTELH2	-4029,965	10833,451	-,067	-,372	,719
	CANORD2	15542,310	10833,451	,258	1,435	,185

a Dependent Variable: WINST

Model (5 replicaties fractioneel)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,758(a)	,574	,539	38661,53833

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	147079051397,972	6	24513175232,995	16,400	,000(a)
	Residual	109114161838,201	73	1494714545,729		
	Total	256193213236,173	79			

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

b Dependent Variable: WINST

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	296518,553	4322,491		68,599	,000
	BESTELP1	25090,420	4322,491	,443	5,805	,000
	BESTELH1	4591,757	4322,491	,081	1,062	,292
	CANORD1	4965,441	4322,491	,088	1,149	,254
	BESTELP2	33807,935	4322,491	,597	7,821	,000
	BESTELH2	-1269,265	4322,491	-,022	-,294	,770
	CANORD2	4316,442	4322,491	,076	,999	,321

a Dependent Variable: WINST

Model (20 replicaties fractioneel)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,686(a)	,470	,460	39640,87261

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

ANOVA(b)

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	436056057065,832	6	72676009510,972	46,249	,000(a)
	Residual	491847818601,076	313	1571398781,473		
	Total	927903875666,907	319			

a Predictors: (Constant), CANORD2, BESTELH2, BESTELP2, CANORD1, BESTELH1, BESTELP1

b Dependent Variable: WINST

Coefficients(a)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	288705,076	2215,992		130,283	,000
	BESTELP1	23357,563	2215,992	,434	10,540	,000
	BESTELH1	3588,280	2215,992	,067	1,619	,106
	CANORD1	6900,851	2215,992	,128	3,114	,002
	BESTELP2	26912,526	2215,992	,500	12,145	,000
	BESTELH2	4259,418	2215,992	,079	1,922	,055
	CANORD2	3765,000	2215,992	,070	1,699	,090

a Dependent Variable: WINST

Bijlage 11: Aantal bestellingen, gemiddelde voorraad en verschil in vraag

Aantal bestellingen

Situatie	Product 1	Product 2	Totaal apart	Gezamenlijk	Totaal samen
1	10	16	26	3	23
2	10	19	29	3	26
3	7	12	19	3	16
4	7	12	19	4	15
5	5	8	13	3	10
6	5	9	14	4	10
7	10	17	27	4	23
8	10	13	23	0	23
9	10	12	22	3	19
10	10	12	22	3	19
11	8	9	17	3	14
12	7	8	15	7	8
13	11	12	23	5	18
14	9	12	21	1	20
15	10	9	19	4	15
16	9	8	17	5	12
17	7	6	13	3	10
18	7	6	13	5	8

Gemiddelde voorraad gedurende de periode

Situatie	Product 1	Product 2	Situatie	Product 1	Product 1
1	668,69	633,44	11	866,46	1086,57
2	660,88	665,93	12	871,01	1029,47
3	922,25	834,96	13	532,12	682,83
4	896,25	859	14	709,04	816,37
5	1260,43	955,58	15	643,6	1060,87
6	1125,85	1070,36	16	607,07	1129,72
7	638,97	563,88	17	876,53	1643,95
8	691,76	819,97	18	891,47	1715,85
9	656,56	732,09			
10	664,32	936,51			

Verschil in verkopen

	oneven situaties	even situaties	product 1 - product 2
product 1	9841,03	14545,67	-3,19
product 2	9844,22	14496,1	49,57

Bijlage 12: Berekening van de verschillen in optima tussen de situaties

Al de benodigde gegevens voor deze berekeningen staan in bijlage 10 en in de tabel met de verloren verkopen.

Situaties	Via formule	Via verschil tussen uitkomsten uit tabel 16 p72
1 en 2	-2376	-2376
3 en 4	-2629,548	-2629,544
5 en 6	6275,192	6275,251
7 en 8	5978,16	5978,23
9 en 10	-3018,808	-3018,724
11 en 12	12587,2	12587,2
13 en 14	-3939,616	-3939,328
15 en 16	25159,616	25159,598
17 en 18	39,9	39,9

Formule: $(Vvk1p1 - Vvk2p1) * (VP + (VP - var\ kostp1)) + (Vvk1p2 - Vvk2p2) * (VP + (VP - var\ kostp2)) +$
 $(aantal\ bestel1 - aantal\ bestel2) * Vaste\ bestelkost + (VR1p1 - VR2p1) * VR\ kost\ p1 +$
 $(VR1p2 - VR2p2) * VR\ kost\ p2 + Verschil\ verkopen\ p1 * winstmarge\ p1 +$
 $Verschil\ verkopen\ p2 * winstmarge\ p2$

met: Vvk1p1 = verloren verkopen in situaties 1 van product 1
VP = verkoopprijs
VR1p1 = hoeveelheid voorraad in situatie 1 van product 1