

UNIVERSITEIT GENT

FACULTEIT ECONOMIE EN BEDRIJFSKUNDE

ACADEMIEJAAR 2010 – 2012

Procescontrole, prestatiemeting en productieplanning

Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van

Master of Science in de

Toegepaste Economische Wetenschappen: Handelsingenieur

Stefanie Ponchaut

Karen Van Obbergen

onder leiding van

Prof. dr. M. Vanhoucke

dr. Veronique Sels

Jeroen Colin



UNIVERSITEIT GENT

FACULTEIT ECONOMIE EN BEDRIJFSKUNDE

ACADEMIEJAAR 2010 – 2012

Procescontrole, prestatiemeting en productieplanning

Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van

Master of Science in de

Toegepaste Economische Wetenschappen: Handelsingenieur

Stefanie Ponchaut

Karen Van Obbergen

onder leiding van

Prof. dr. M. Vanhoucke

dr. Veronique Sels

Jeroen Colin

Vetrouwelijkheidsclausule

Ondergetekenden verklaren dat de inhoud van deze masterproef mag geraadpleegd en/of gereproduceerd worden, mits bronvermelding.

Stefanie Ponchaut

Karen Van Obbergen

Woord vooraf

Allereerst danken wij dr. Veronique Sels en Jeroen Colin, omdat we steeds bij hen terecht konden met onze vragen, alsook voor hun goede begeleiding. Het onderwerp van dit eindwerk, dat zo algemeen was, gaf ons de mogelijkheid om zelf de inhoud en de aanpak te kiezen. We willen hen dan ook danken voor de vrijheid die we hierin kregen.

Alsook willen wij prof. dr. Geert Poels vermelden omdat hij ons terug op het goede pad bracht bij het opstellen van onze simulatietool. Ook willen wij Mathias Vanderdonckt bedanken om ons de beginselen van Visual Basic aan te leren, waardoor we later in staat waren zelf programma's te schrijven om de data snel te verwerken.

Natuurlijk willen wij onze ouders bedanken omdat ze er steeds voor ons waren wanneer we hen nodig hadden. We zijn Toon Van Obbergen ook dankbaar voor zijn kritische reflectie. Als laatste persoon willen we ook Maarten D'Herde niet vergeten, aangezien hij ons al die uren voor het verwerken van de data en het bespreken van de tekst gesteund heeft.

Bedankt!

Inhoud

Vetrouwelijkheidsclausule	iv
Woord vooraf	v
Lijst van figuren	ix
Lijst van vergelijkingen	ix
Lijst van tabellen.....	ix
Lijst van gebruikte afkortingen.....	x
0 Inleiding	1
1 Productieplanning	4
1.1 Het doel	4
1.2 Algemene begrippen	5
1.2.1 De job	5
1.2.2 De doelfunctie	6
1.2.3 De machinestructuur.....	7
1.3 Soorten productieplanningsproblemen	9
2 Variabiliteit	11
2.1 Probleem	11
2.2 Oorzaken van variabiliteit	12
2.2.1 Indeling van variabiliteitsoorzaken.....	13
2.2.2 Gevolgen van variabiliteit.....	14
2.3 Bestrijden van variabiliteit.....	15
2.3.1 Robuust plannen	15
2.3.2 Herplannen	16
2.3.3 Gevolgen van herplannen	19
2.4 Reden tot onderzoek.....	21
3 Onderzoek 1	22
3.1 Doel onderzoek	22
3.2 Basisdata.....	22
3.3 Simulatietool	23
3.3.1 De variërende parameters	24
3.3.2 Toevoegen van variabiliteit	24
3.4 Verwachtingen	27
3.4.1 Variatie in release time	28
3.4.2 Variatie in processing time	29

3.4.3	Variatie in due date	30
3.4.4	Interactie tussen Pt, Rt en Dd.....	31
3.4.5	Interactie tussen jobs	32
3.5	Hypothesen	33
3.6	Simulatie.....	34
3.7	Verwerking van de nieuwe data en methode van analyse	34
3.8	Resultaten.....	35
3.8.1	Maximum lateness	35
3.8.2	Makespan	36
3.8.3	Mean flow time	37
3.8.4	Mean tardiness.....	39
3.8.5	Proportion of tardy jobs	39
3.8.6	Vergelijking tussen de verschillende doelfuncties	40
3.8.7	Vergelijking tussen de verschillende variabelen	42
3.9	Controleren van de hypothesen.....	42
3.10	Algemene conclusie onderzoek 1.....	44
4	Procescontrole.....	46
4.1	Het doel	46
4.2	Algemene begrippen	47
4.3	Aanwezigheid van variabiliteit	48
4.4	Control chart.....	49
4.4.1	Control charts varianten.....	49
4.4.2	Opstellen van control charts	51
4.4.3	Gebruik van de control charts	54
4.4.4	Type I & II fout	55
4.4.5	Sensitiviteitsregels voor control charts	56
4.4.6	Richtlijnen bij het ontwerp van control charts.....	57
4.4.7	Het effect van niet-normaliteit op de control charts	58
4.5	Algemene aanpak.....	58
4.5.1	Retrospectieve testen	59
4.5.2	Testen van real-life samples	60
5	Onderzoek 2	61
5.1	Het doel	61
5.2	Basisdata.....	62

5.3	Simulatietool	62
5.3.1	De variërende parameter	62
5.3.2	Toevoegen van variabiliteit: pRt en Rdev	62
5.4	Simulatie	64
5.5	Verwerking van de nieuwe data en methode van analyse	64
5.6	Verwachtingen	68
5.6.1	Evolutie doelfunctiewaarden	68
5.6.2	Controlelimieten	68
5.6.3	Type I fout en type II fout	70
5.7	Hypothesen	71
5.8	Resultaten	72
5.8.1	Evolutie doelfunctiewaarden	72
5.8.2	Controlelimieten	74
5.8.3	Type I fout	79
5.8.4	Type II fout	81
5.8.5	Impact variabele I	85
5.9	Controleren van de hypothesen	86
5.10	Algemene conclusie onderzoek 2	89
6	Algemeen besluit	92
7	Beperkingen van het onderzoek	95
8	Mogelijkheden voor verder onderzoek	97
	Lijst van de geraadpleegde werken	I
	Bijlage	VI
	1. Overzicht analysewaarden simulatie batch1676_0	VI
	2. Resultaten simulatie batch1676_0	VII
	3. Resultaten simulatie batch1676_0 zonder pDd en Pdev	VII
	4. Visualisaties gevonden statische verbanden onderzoek 1	VIII
	5. Control charts constanten	XI
	6. Geselecteerde batches onderzoek 2	XI
	7. Relatief verschil doelfunctiewaarden – lineaire regressie	XII
	8. Verschil controlelimieten – lineaire regressie	XIII
	9. Type I fout – lineaire regressie	XIV
	10. Type II fout – lineaire regressie	XIV
	11. Valse meldingen – lineaire regressie	XV

Lijst van figuren

Figuur 1: Schematisch overzicht van verwerkingskenmerken en doelfuncties	6
Figuur 2: Machinestructuur	8
Figuur 3: Machinestructuur flexible manufacturing	8
Figuur 4 : Productieplanning voor twee jobs	9
Figuur 5: Verwachte impact van verwerkingskenmerken op doelfuncties	27
Figuur 6: Effect van variatie in de release time	29
Figuur 7: Effect van variatie in processing time	30
Figuur 8: Effect van variatie in due date	31
Figuur 9: Effect van pRt en Rdev op het relatief verschil van M en MFT	38
Figuur 10: Overzicht relatief verschil van alle doelfuncties voor alle situaties	41
Figuur 11: Overzicht standaardafwijking van alle doelfuncties voor alle situaties	41
Figuur 12: Voorbeeld van een control chart	49
Figuur 13: Controlelimieten	51
Figuur 14: Normale verdeling op basis van 3 sigma	54
Figuur 15: Control chart: in control versus out of control	54
Figuur 16: Situaties onderzoek 2	63
Figuur 17: Voorstelling relatie CV – AV en overzicht per situatie	66
Figuur 18: Batch 1025 - MFT - Situatie 1	76
Figuur 19: Batch 1025 - MFT - Situatie 6	77
Figuur 20: Batch 1025 - ML - Situatie 1	78
Figuur 21: Type I fout - descriptieve analyse	79
Figuur 22: Type II fout descriptieve analyse	82
Figuur 23: Valse meldingen - descriptieve analyse	84
Figuur 24: Impact van I volgens verschil tussen UCL en LCL	85
Figuur 25: Impact van I volgens typefouten	85

Lijst van vergelijkingen

Vergelijking 1: Wiskundige voorstelling doelfuncties	7
Vergelijking 2: Onderzoek 1 – Relatief verschil	34
Vergelijking 3: Onderzoek 1 – Lineaire regressies	35
Vergelijking 4: Onderzoek 2 – Relatief verschil	64
Vergelijking 5: Onderzoek 2 - Verschil tussen controlelimieten	64
Vergelijking 6: Lineaire regressie doelfunctiewaarden	71
Vergelijking 7: Lineaire regressie controlelimieten	73
Vergelijking 8: Lineaire regressie type I fout	79
Vergelijking 9: Lineaire regressie type II fout	81
Vergelijking 10: Lineaire regressie valse meldingen	83

Lijst van tabellen

Tabel 1: Overzicht variabiliteitsparameters met percentages als waarde	27
Tabel 2: Overzicht type I en type II fout	56
Tabel 3: Mogelijke waarden variabelen onderzoek 2 uitgedrukt in percentages	63
Tabel 4: Overzicht CV en AV	66

Lijst van gebruikte afkortingen

α	Kans op een type I fout
β	Kans op een type II fout
μ	Gemiddelde
AV	Assignable cause variabiliteit
Ct	Completion time
CV	Common cause variabiliteit
CUMSUM	Cumulatieve som
Dd	Due date
Ddev	Standaardafwijking van de due date
DF _x	Waarde voor de doelfunctie als X aantal jobs verwerkt zijn
E	Earliness
EWMA	Exponentially weighted moving average
k	Nauwheid van de due date
I	Spreiding van de release times
LCL	Lower Control Limit
M	Makespan
MFT	Mean flow time
ML	Maximum lateness
MT	Mean tardiness
pDd	Kans op veranderingen in due date
Pdev	Standaardafwijking van de processing time
Perc	Percentage van afgewerkte jobs
pRt	Kans op veranderingen in release time
Pt	Processing time
PTJ	Proportion of tardy jobs
Q	Aanvaardbare speling voor een job
Rdev	Standaardafwijking van de release time
Rt	Release time
s	Standaardafwijking
SM	Single machine
SPC	Statistische procescontrole
St	Set-up time
T	Tardiness
T1F	Type I fout
T2F	Type II fout
TWC	Total weighted completion time
UCL	Upper Control Limit
VM	Valse meldingen

0 Inleiding

“Every forecast is wrong”

Stewart Brand

Als handelsingenieurs aan de Universiteit van Gent, hebben we reeds geleerd hoe we voorspellingen kunnen maken. Zo zijn wij in staat om de toekomstige vraag naar een product aan de hand van verschillende technieken in te schatten. Ook de methodes om de waarde van een bedrijf over tientallen jaren te bepalen zijn ons bekend. Hoewel al deze voorspellingen nuttig zijn voor verdere analyses, werden wij er steeds op gewezen dat, zoals voorgaande quote stelt, elke voorspelling fout is. Scenario- en sensitiviteitsanalyses worden dan ook meermaals gebruikt wanneer we de toekomst op papier proberen vast te leggen.

Earned Value Management werd ons aangeleerd tijdens het vak Projectmanagement. Deze techniek laat toe om het verloop van een project op te volgen en tracht op basis van het reeds geleverde werk een accurate voorspelling te maken van het verdere verloop. Op deze manier zal het tijdens de uitvoering van het project de vooropgestelde schatting bijstellen. Een zeer interessante techniek, die blijkbaar tot nu toe enkel toegepast wordt bij projectmanagement. In onze ogen lijkt zo’n techniek ook nuttig te zijn bij een productieplanning. Opvolging van het productieplan kan immers een grote meerwaarde betekenen. Vooral in een continu veranderende wereld, lijkt het cruciaal om niet vastgepind te worden op één waarde. Evenwel heerst dit nog steeds in de productieplanning. Er zijn reeds veel teksten geschreven, onderzoeken gedaan, algoritmen opgesteld, etc. maar steeds lag de focus op het bekomen van één uiteindelijke geoptimaliseerde doelfunctiewaarde. Indien men echter tijdens de uitvoering van het productieproces al opmerkt dat het originele productieplan niet meer exact gevolgd wordt, is het naïef om te denken dat alle afspraken, die gebaseerd zijn op dat plan, nagekomen kunnen worden. In een geglobaliseerde economie, waar de druk van concurrenten nooit ver weg is, lijkt het wel zeer belangrijk om afspraken na te komen. In dit eindwerk trachten we dan ook een aanzet te geven voor de opbouw van een techniek, gelijkaardig aan Earned Value Management, toegespitst op productieplanning.

Om de funderingen te leggen voor deze techniek, is het vereist om grondig te begrijpen waarom men niet in staat is de toekomst volledig te voorspellen en om bovendien na te gaan welke oorzaken juist leiden tot veranderingen in de uitvoering van het productieplan.

“We do not know anything about a thing until we can measure it”

Lord Kelvin

In overeenstemming met de visie van Lord Kelvin, trachten we deze veranderingen en hun impact te kwantificeren. Eenmaal dat de impact op het productieplan gekwantificeerd is, zal ook getest worden of het echt mogelijk is om tijdens het uitvoeren van het productieproces meer accurate voorspellingen te bekomen. Hoewel die voorspellingen de werkelijkheid nooit accuraat weergeven, lijken ons de inzichten behaald door dit onderzoek belangrijk en kan het helpen bij het uitwerken van Earned Value managementtechniek in productieplanning.

Wanneer men de **structuur** van deze masterproef overloopt, kan men twee grote delen opmerken, namelijk productieplanning en procescontrole. Meer gedetailleerd kunnen volgende onderdelen onderscheiden worden. Eerst wordt er een overzicht gegeven van concepten gerelateerd aan productieplanning. Alsook wordt er geschetst wat er in dit vakgebied al geschreven is gerelateerd aan variabiliteit en hoe deze bestreden kan worden door technieken van productieplanning. Een eerste onderzoek wordt daarna beschreven waarin de impact van variabiliteit op doelfuncties bestudeerd wordt. Een korte samenvatting besluit het eerste deel van dit eindwerk. Het tweede deel, de procescontrole, begint met een theoretische beschrijving van de kernconcepten van procescontrole. Er wordt vooral aandacht besteed aan statistische procescontrole. Een tweede onderzoek bouwt dan voort op het eerste onderzoek, maar bevat meer aandacht voor de werkelijke opvolging van het verloop van het productieplan. Alle verkregen inzichten worden hierna opgesomd en gebundeld in het algemeen besluit.

Bij de twee onderzoeken wordt er gebruik gemaakt van dezelfde **werkmethode**. Per onderzoek wordt er eerst een simulatietool ontwikkeld. Deze tool zal aan de hand van enkele welgekozen variabelen wijzigingen aanbrengen aan de basisdata volgens een bepaalde statistische verdeling. De data met toegevoegde variabiliteit weerspiegelen dan het werkelijke verloop van het productieplan. Dit plan wordt vergeleken met het originele productieplan. Vooraleer er analyses uitgevoerd worden, worden telkens de verwachtingen

opgeelijst en de resulterende hypothesen opgesomd. De exacte methode van dataverwerking en analyse wordt per onderzoek beschreven, maar algemeen worden de data eerst visueel geanalyseerd en vervolgens herwerkt tot bepaalde kernwaarden. Aan de hand van deze kernwaarden zullen dan lineaire regressies uitgevoerd worden om de data verder statistisch te bestuderen. De hieruit volgende resultaten en eventuele opmerkelijke zaken worden neergeschreven. Finaal wordt er ook nog gecontroleerd of de gestelde hypothesen gestaafd worden door de resultaten.

Het uitgevoerde onderzoek heeft natuurlijk wel enige **beperkingen**. Vooraleerst, is dit een theoretisch onderzoek waardoor de praktische controle van de resultaten nog niet uitgevoerd is. Eveneens wordt er gebruik gemaakt van een dataset die zich situeert in een single machine structuur. Er wordt ook de assumptie gesteld dat er maar een beperkt aantal verwerkingskenmerken varieert, namelijk enkel release times, processing times en due dates. Er wordt ook alleen maar gebruik gemaakt van een normale en een triangulaire verdeling om variabiliteit toe te voegen. Ook het aantal geëvalueerde doelfuncties is beperkt. Er wordt gebruik gemaakt van maximum lateness, mean flow time, makespan, mean tardiness en proportion of tardy jobs. Door gebruik te maken van basisdata waarbij de productieplanning geoptimaliseerd wordt volgens de maximum lateness doelfunctie wordt de toepasbaarheid van de resultaten nog meer gelimiteerd. Ook wordt er enkel rekening gehouden met bedrijven die gebruik maken van productieplanning, waardoor niet alle verkregen inzichten toegepast kunnen worden op bedrijven die gebruik maken van een productiebeleid. Het onderzoek duidt ook aan wat het effect is indien men niet zal reageren op veranderingen. Hetgeen in werkelijkheid niet per se gevolgd zal worden. Wanneer men specifiek kijkt naar de procescontrole kan men, nog een bijkomende beperking opmerken. Er wordt namelijk bij het realiseren van de retrospectieve testen geen onderzoek gedaan naar de reden van variabiliteit. Men zal de variabiliteit dan ook niet reduceren en het proces niet stabiel kunnen maken. Doordat de variabiliteit niet geëlimineerd wordt, zullen de controlelimieten die gebaseerd zijn op het proces met gecumuleerde variabiliteit hier een impact van ondervinden. De opgestelde procescontrole is dus niet volkomen realistisch, maar kan wel als geschikt bevonden worden om de hier aangenomen situatie te analyseren.

1 Productieplanning

In een **productieomgeving**, moet men met veel zaken rekening houden. Alle noodzakelijke grondstoffen, hulpstoffen en het personeel moeten op het juiste moment aanwezig zijn om het juiste product in de juiste hoeveelheid te produceren. Afgewerkte producten moeten dan worden verpakt om in de juiste hoeveelheid op het juiste moment naar de juiste klant verstuurd te worden. Om alles goed te laten verlopen, zal er een productieplanning opgesteld worden. Echter, in **realiteit** kan er tijdens de uitvoering van het productieproces altijd wel iets veranderen. Om de impact van deze veranderingen te analyseren, zal eerst de productieplanning zelf bestudeerd worden.

In dit **eerste hoofdstuk** over productieplanning zal eerst het doel beschreven worden, waarna productieplanning zelf gedefinieerd wordt en de kernconcepten verklaard. Op het einde van dit hoofdstuk worden de verschillende soorten van productieplanningsproblemen besproken.

1.1 Het doel

Productieplanning heeft als doel een **productieplan** op te stellen. Een productieplan heeft op zijn beurt dan weer als doel een optimale allocatie van middelen te bekomen en als basis te dienen om activiteiten in de hele supply chain te organiseren (Mehta & Uzsoy, 1998). Productieplanning moet er dus voor zorgen dat men op basis van het productieplan een voorspelling kan maken van de toekomstige productie aan de hand van een optimaal verbruik van bedrijfsmiddelen. Door het predicatieve plan kan men dan andere afspraken of taken vastleggen zoals het onderhoud van een bepaalde machine.

Niet alle bedrijven gebruiken echter productieplanning. Een alternatieve methode om de uitvoering van de productie te regelen is een **productiebeleid** op te stellen. In dat beleid worden er voorrangsregels gespecificeerd die bepalen hoe men tijdens het uitwerken van de productie zal beslissen welke job er eerst uitgevoerd wordt. Een voorbeeld van een beleidsregel is first come/first served waarbij enkel de volgorde waarin de jobs het productiesysteem binnenkomen, bepaalt in welke volgorde de jobs zullen behandeld worden. Als gevolg van het niet-toepassen van een productieplanning zal het gebruik van de middelen niet geoptimaliseerd kunnen worden. Deze methode zal niet verder behandeld worden.

1.2 Algemene begrippen

Er zijn veel verschillende **definities** voor productieplanning. Productieplanning wordt globaal omschreven als "de planning van het gebruik van verschillende middelen over tijdsperiodes op verschillende niveaus" (Swaminathan, Pfund, Fowler, Mason, Keha, 2007). In dit eindwerk wordt productieplanning als volgt gedefinieerd: het opstellen van een volgorde van jobs waarbij een doelfunctie geoptimaliseerd wordt rekening houdend met de machinestructuur. Dat jobs, doelfunctie en machinestructuur de kernwoorden zijn bij productieplanning, kan men ook bemerken in de Graham notatie, $\alpha/\beta/\gamma$. Deze universeel toegepaste notatie kan alle planningssituaties weergeven en werd ingevoerd door Graham et al.(1979). In $\alpha/\beta/\gamma$ duidt α de machinestructuur aan, β de verwerkingskenmerken en γ de doelfunctie. De kernconcepten zullen nu in detail besproken worden.

1.2.1 De job

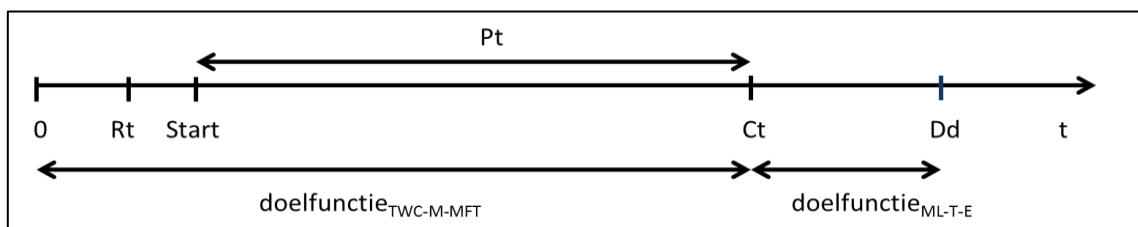
Elke job, i.e. een taak die in het productieplan uitgevoerd moet worden, heeft specifieke verwerkingskenmerken, al dan niet afhankelijk van een bepaalde machine. Een eerste kenmerk is de **processing time** (Pt). Dit is de tijd die een machine nodig heeft om de job uit te voeren. Soms is die processing time voor alle machines dezelfde, soms verschilt de processing time. Een verschil kan veroorzaakt worden door het gebruik van andere technologieën of een capaciteitsverschil. Een tweede verwerkingskenmerk is de **release time** (Rt). Deze toont aan wanneer de job ten vroegste kan verwerkt worden en hangt af van de beschikbaarheid van de benodigde onderdelen om de job uit te voeren. De **due date** (Dd) van een job is een derde kenmerk dat aanduidt wanneer de klant de job wenst afgewerkt te hebben. Zowel de release time als de due date zijn machineonafhankelijk.

Andere mogelijke kenmerken zijn **set-up times**(St) en precedence constraints. Set-up times geven de tijd weer die nodig is om een machine om te stellen na job₁ zodat job₂ kan behandeld worden. Deze tijd is dus afhankelijk van job₁, job₂ en de machine. **Precedence constraints** tonen dan weer de voorrangsregels tussen verschillende jobs. Dit kan bijvoorbeeld afhangen van de prioriteit van de jobs. Een overzicht van alle mogelijke verwerkingskenmerken vindt men terug in "*Scheduling: theory, algorithms and systems*" (Pinedo, 2002).

1.2.2 De doelfunctie

Het tweede belangrijke concept in de definitie is de te optimaliseren doelfunctie. Deze kan sterk verschillen tussen industrieën, alsook tussen verschillende bedrijven in dezelfde industrie doordat de doelfunctie afhangt van de **strategische focus** van het management. Elk bedrijf zal namelijk proberen aan de vraag te voldoen door een beleid te voeren dat in overeenstemming is met de gekozen strategische focus. Mogelijke strategische doelen kunnen zijn kostenleiderschap, kwaliteitsvolle producten, grote productvariatie, betrouwbaarheid in leveringstijden, etc. Deze doelen worden dan vertaald naar doelfuncties specifiek voor de productie. Het is mogelijk dat deze doelen botsen met elkaar en dan zal het bedrijf **prioriteiten** moeten stellen. Zo kan men bijvoorbeeld niet verwachten dat men met een minimum aan voorraad een hoge klantenservice verkrijgt. In (Silver, Pyken, Peterson, 1998) worden de voorwaarden opgesomd waaraan de doelfuncties moeten voldoen: gemakkelijk controleerbaar, aanpasbaar, eenvoudig te begrijpen, maar ook robuust.

Eenmaal dat een bedrijf een doelfunctie gekozen heeft, dan zal het proberen de jobs in te plannen zodat men een optimale waarde bekommt voor deze doelfunctie. Mogelijke doelfuncties zijn: total weighted completion time (TWC), makespan (M), mean flow time (MFT), maximum lateness (ML), tardiness (T) en earliness (E).



Figuur 1: Schematisch overzicht van verwerkingskenmerken en doelfuncties

De eerste drie, TWC, M en MFT, zijn enkel afhankelijk van het tijdstip waarop elke job afgewerkt is, i.e. de **completion time** van een job (C_t) (Figuur 1). Makespan is de maximale completion time, wat overeenkomt met de completion time van de laatst afgewerkte job. Indien een bedrijf deze waarde probeert te minimaliseren aan de hand van de productieplanning, dan zal men trachten de jobs op een bepaalde manier na elkaar te plannen zodat de laatste job zo vroeg mogelijk afgewerkt zal worden. De som van de completion times van alle jobs komt overeen met de flow time. De mean flow time wordt bekomen door de flow time te delen door het aantal uitgevoerde jobs.

Voor maximum lateness, (weighted) tardiness en earliness wordt er rekening gehouden met de completion time en de **due date**. Tardiness let op de mate van laattijdigheid van de jobs. Als een bedrijf deze waarde tracht te minimaliseren, zal het de jobs zodanig plannen dat over alle jobs de laattijdigheid minimaal is. Earliness daarentegen houdt enkel rekening met jobs die te vroeg afgewerkt worden. Wanneer men tardiness en earliness samenneemt, bekomt men de lateness. De lateness van een job wordt gedefinieerd als het verschil tussen de completion time en de due date. Hierdoor kan de lateness dus zowel een positieve als een negatieve waarde aannemen. Vooral bij bedrijven die handelen volgens de principes van just-in-time, zal men gebruik maken van deze doelfunctie. Indien men maximum lateness als doelfunctie kiest, zal men de planning evalueren volgens de job met de grootste laattijdigheid.

Een overzicht van de verschillende doelfuncties kan weerom teruggevonden worden in Pinedo (2002). Een opsomming van enkele doelfuncties met bijhorende formules wordt weergegeven in vergelijking 1.

$$\text{Maximum lateness: } ML = \text{maximum} \sum Ct_i - Dd_i$$

$$\text{Makespan: } M = \text{maximum } Ct_i \text{ met } Ct_i = Start_i + Pt_i$$

$$\text{Mean flow time: } MFT = \frac{\sum Ct_i}{n} \text{ met } n = \text{aantal jobs en } Ct_i = Start_i + Pt_i$$

$$\text{Mean tardiness: } MT = \frac{\sum Ct_i - Dd_i}{n} \text{ met } n = \text{aantal jobs en } Ct_i = Start_i + Pt_i$$

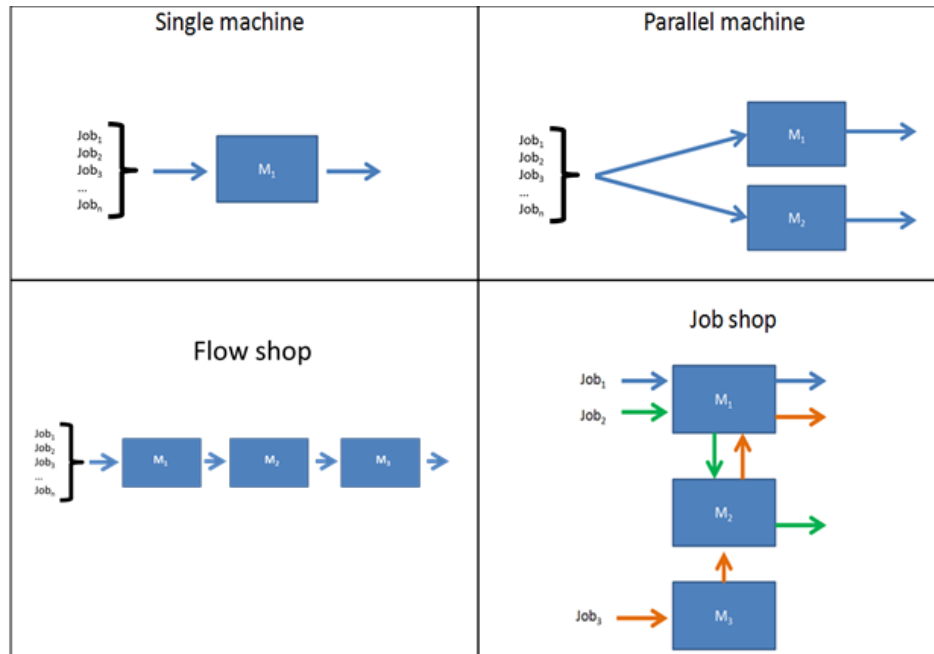
$$\text{Proportion of tardy jobs: } PTJ = \frac{\sum U_i}{n} \text{ met } n = \text{aantal jobs en } U_i = \begin{cases} 0 & \text{als } Ct_i - Dd_i \leq 0 \\ 1 & \text{als } Ct_i - Dd_i > 0 \end{cases}$$

Vergelijking 2: Wiskundige voorstelling doelfuncties

1.2.3 De machinestructuur

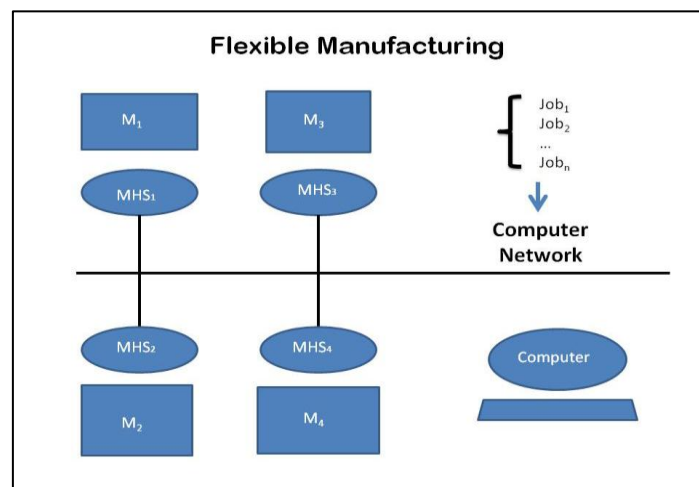
Algemeen genomen zijn er in productieomgevingen vijf verschillende machinestructuren mogelijk (Figuur 2 en 3). In het geval van een **single machine** (SM) structuur worden alle jobs verwerkt door 1 machine (M_1) en zal de productieplanning dus één volgorde van jobs opleveren. Bij een **parallel machine** structuur kunnen alle jobs door twee of meer, al dan niet identieke, machines behandeld worden die parallel opgesteld zijn. In deze situatie is het ook mogelijk dat de processing time van een job varieert afhankelijk van welke machine het

verwerkt. Het resultaat van de productieplanning zal een sequentie van jobs per machine zijn. Wanneer de machines of werkstations met parallelle machines serieel de jobs behandelen, spreekt men van een **flow shop** structuur. De **job shop** structuur houdt dan weer in dat de jobs elk een andere route volgen door de verschillende machines.



Figuur 2: Machinestructuur

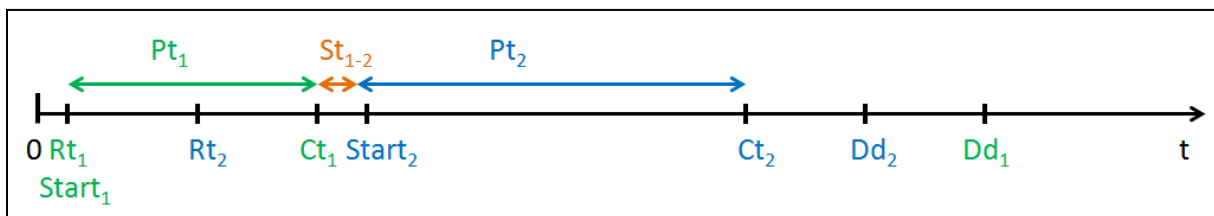
Naast deze eerder traditionele structuren, bestaat er ook **flexible manufacturing** (Figuur 3). Deze structuur bestaat uit een aantal werkstations en material handling systemen (MHS) die geïntegreerd worden via een computercontrole. Flexible manufacturing is in staat om flexibele routes te hanteren om de jobs te verwerken in plaats van de jobs in rechte lijnen door de verschillende werkstations te laten lopen (Zhou & Venkatesh, 1999).



Figuur 3: Machinestructuur flexible manufacturing

Samenvattend zal de productieplanning de mogelijke sequenties van jobs per beschikbare machine analyseren in de gekende machinestructuur. Tijdens de analyse wordt er getracht de volgorde en de verdeling van de jobs over de verschillende machines zodanig te bepalen dat de bedrijfsdoelfunctie geoptimaliseerd wordt.

In een volgend voorbeeld (Figuur 4), wordt de productieplanning vastgelegd voor job₁ en job₂ in een SMS. Elke job heeft zijn eigen specifieke verwerkingskenmerken, namelijk R_t , P_t en D_d . Alsook moet men rekening houden met de omsteltijd S_t maar er zijn geen precedence constraints in SMS. Indien het bedrijf tracht de makespan te minimaliseren, dan zal de productieplanning de sequentie 1-2 als resultaat geven.



Figuur 4 : Productieplanning voor twee jobs

1.3 Soorten productieplanningsproblemen

Behalve de Graham notatie, zijn er ook nog **andere dimensies** om planningssituaties aan te duiden. De verschillende problemen kunnen gedefinieerd worden als statisch of dynamisch, deterministisch of stochastisch en real-time of offline (Wan, 1995). Indien de jobs allemaal vanaf tijdstip 0 kunnen gepland worden, spreekt men over een statisch probleem. Wanneer er continu in het systeem nieuwe jobs kunnen arriveren, spreekt men dan weer over een dynamisch probleem. Indien men aanneemt dat de waarden voor de verwerkingskenmerken niet meer zullen veranderen, heeft men een deterministisch planningsprobleem en werkt men met exacte waarden. In het geval van een stochastisch planningsprobleem, heeft men geen exacte waarden voor de verwerkingskenmerken, maar zal men gebruik maken van statistische probabiliteitsfuncties. Of een situatie real-time of offline is, hangt af van de mate waarin men kan reageren op veranderingen, zoals het uitvallen van een machine of het wijzigen van due dates. In een offline probleem kan men niet reageren, bij een real-time probleem wel.

Al deze verschillende dimensies lijken steeds een onderscheid te maken in de mate dat er rekening gehouden wordt met **onzekerheid**. Bij een dynamisch probleem kunnen er onverwacht nieuwe jobs arriveren, bij een statisch probleem daarentegen niet. Een dynamisch probleem zal dan ook beter in staat zijn om met variabiliteit veroorzaakt door toekomstige jobs om te gaan. Bij een stochastisch planningsprobleem wordt erkend dat de waarden voor de verwerkingskenmerken niet met 100 procent zekerheid ingeschat kunnen worden. Vergeleken met een deterministisch planningsprobleem, houdt het stochastische probleem dus ook meer rekening met onzekerheid. Uiteindelijk is het ook duidelijk dat het kunnen reageren op veranderingen, i.e. een real-time probleem, tevens zal bijdragen om te kunnen omgaan met onzekerheid.

De noodzaak om rekening te houden met **variabiliteit**, zoals weergegeven in de soorten productieplanningsproblemen, vloeit voort uit de onzekerheid over de toekomst. Men kan dus wel een productieplan opstellen maar er kunnen steeds onvoorziene zaken voorvallen die de voorspelling niet meer realistisch maken. Aangezien het doel van dit eindwerk is om variabiliteit te analyseren, zal in het volgende hoofdstuk variabiliteit theoretisch bestudeerd worden.

2 Variabiliteit

Variabiliteit is afkomstig van een zekere **mate van onzekerheid**. In het ideale geval, zou men er altijd rekening mee moeten houden aangezien het in alle productiesystemen voorkomt. In onderzoek naar variabiliteit werden al verschillende planningssituaties geanalyseerd en algoritmen om een optimale planning te bekomen beschreven. Er bestaan ook al heuristieken voor vele NP-moeilijke¹ planningsproblemen die een goede planning verzekeren. Echter, er wordt in dit eindwerk bestudeerd wat de impact van variabiliteit juist is op een productieplan. Daarvoor zal eerst variabiliteit zelf en vervolgens de manieren waarop variabiliteit zich zal manifesteren in het productieproces geanalyseerd worden.

Het hoofdstuk omtrent variabiliteit begint met een korte probleemstelling, daarna wordt er een overzicht gegeven van de verschillende oorzaken van variabiliteit. De mogelijke indelingen en gevolgen van variabiliteit worden nadien besproken. Vervolgens worden opties weergegeven om variabiliteit te bestrijden en wordt er ook gewezen op de neveneffecten van deze opties. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een beschrijving van de aanleiding voor dit eindwerk.

2.1 Probleem

Wat vaak verondersteld wordt in studies omtrent variabiliteit in een productieomgeving, is een statistisch deterministisch planningsprobleem. Een tweede mogelijkheid is dat men werkt met een stochastisch planningsprobleem waarbij men de gemiddelde verwachtingswaarde gebruikt als de waarde van de verwerkingskenmerken. Echter, in realiteit ervaart men een **dynamisch stochastisch planningsprobleem** en kan men het toekomstige verloop niet met 100 procent zekerheid voorspellen. Het predicatieve plan, berekend om bestand te zijn tegen variabiliteit, zal hierdoor dan toch gevolgen ondervinden van veranderingen. Als gevolg zal het predicatieve plan in werkelijkheid dan toch niet exact uitgevoerd kunnen worden en is men niet in staat om de afspraken gebaseerd op het predicatieve plan na te komen.

¹ **NP-moeilijke problemen**, volgens F.C.R. SPIEKSMa. NP-moeilijke problemen zijn problemen waarvoor er (nog) geen polynomiaal exact algoritme bekend is. Het aantal rekenstappen nodig om tot een oplossing te komen is een exponentiële functie van de probleemgrootte. Het risico van een exponentiële methode is dat een uitkomst zeer lang op zich kan laten wachten (Spieksma, 2003).

2.2 Oorzaken van variabiliteit

In de literatuur worden vele mogelijke oorzaken aangereikt die het verschil tussen het predicatieve plan en de echte uitwerking kunnen verklaren. Het probleem van onzekerheid wordt zelf specifiek aangekaart (Cowling & Johansson, 2002). Er wordt geduid op het feit dat de onzekerheid afkomstig is van het gebrek aan accurate informatie. Dit **informatiegebrek** wordt opgesplitst in twee soorten, namelijk informatiegebrek over middelen en informatiegebrek gerelateerd aan de job. Voorbeelden van het eerste gebrek zijn het falen van de machines, een tekort aan middelen en een onderschatting van de processing times. Voor de tweede soort van informatietekort worden dan weer wijzigingen in prioriteiten en nieuwe jobs als voorbeeld gegeven.

Leus en Herroelen geven onbeschikbare middelen, laattijdige leveringen van materiaal en veranderende jobinhoud als oorzaak op (Leus & Herroelen, 2007). In een ander artikel wordt vermeld dat er afwijkingen kunnen plaatsvinden door het arriveren van nieuwe jobs, het falen van middelen of als een job een langere **processing time** heeft dan verwacht (Wu, Brown, Beck, 2009). Ook in (Sarin, Nagarajan, Jain, Liao, 2009) worden variërende processing times aangehaald, net als het uitvallen van machines en het beschikken over incomplete informatie betreffende de due dates. De redenering waarom processing times variëren wordt in de literatuur als volgt neergeschreven: de schatting van een processing time is afhankelijk van verschillende factoren, zoals de machinestructuur, de operator, het nodige materiaal, etc. Al deze factoren kunnen veranderen en daardoor aanleiding geven tot een foutieve schatting van de processing time (Leimi & Sabuncuoglu, 2002). Een tweede oorzaak van verandering in het productieplan beschreven in deze studie is de variatie in werklust, hetgeen afhankelijk is van wijzigingen in de vraag en dus niet gecontroleerd kan worden. Als laatste worden ook de wijzigingen in de **due dates**, door veranderingen in interne of externe factoren, aangehaald. In een ander wetenschappelijk artikel worden weer de inkomende nieuwe jobs, de geannuleerde jobs, de veranderingen in prioriteiten, de verwerkingsvertragingen, het uitvallen van machines en de afwezigheid van grondstoffen, personeel of gereedschap bestempeld als vaak voorkomende oorzaken van afwijkingen tussen het predicatieve plan en het echte verloop (Hall & Potts, 2004). Er bestaat ook al een overzicht van alle factoren die kunnen leiden tot wijzigingen in het predicatieve plan waarbij per factor ook de relevante artikels vermeld worden (Vieira et al., 2003).

Er bestaan ook al meerdere studies die telkens één oorzaak apart bestudeerden, bijvoorbeeld het effect van het uitvallen van machines (Cai, Wu, Zhou, 2011) en (Mehta & Uzsoy, 1998). Gedurende de analyse van de onzekere processing times als oorzaak, werd al opgemerkt dat deze onzekerheid vooral voorkomt in industrieën met op maat gemaakte producten (Cao, Patterson, Bai, 2005). Andere studies die onzekere processing times behandelen zijn (Wu et al., 2009), (Herrmann, 1997), (Swaminathan et al., 2007) en (Daniels & Carrillo, 1997). Bij het analyseren van veranderlijke due dates, werden de onvoorspelbare verstoringen in de levering van afgewerkte goederen en de verandering in de vraag van de klant opgesomd als redenen waarom de due dates veranderen (Aissi, Aloulou, Kovalyov, 2011). Een studie omtrent **variërende release times**, onderzocht de impact van laattijdige leveringen waarbij men zich baseerde op data van een Franse autoassemblagefabriek. Door onder andere verkeersfiles, vrachtwagens die in panne staan en stakingen bleek dat 20% van de release times moest verlaat worden (Sevaux & Sorensen, 2004). Er zijn ook nog andere artikels die real-life voorbeelden van variabiliteit bespreken. Zo wordt er onder andere besproken wat de voornaamste oorzaken van variabiliteit zijn specifiek voor de chemische procesindustrie (Kopanos, Capón-García, Espuña, Puigianer, 2008).

2.2.1 Indeling van variabiliteitsoorzaken

Niet alleen voorbeelden van oorzaken kan men terugvinden maar ook manieren om de verschillende oorzaken van variabiliteit in te delen. De oorzaken kunnen geclassificeerd worden als **intern of extern**, waarbij interne oorzaken afhankelijk zijn van het productieproces zelf, zoals het uitvallen van een machine of een vertraging in het verwerkingsproces (Schumacher, 2000). Voorbeelden van externe oorzaken zijn spoedbestellingen en foutieve voorraaddata. Een mogelijke gelijkaardige indeling classificeert de oorzaken ofwel onder **omgevingsonzekerheid** ofwel onder **systeemonzekerheid** (Ho, 1989). Omgevingsonzekerheid betreft onzekerheden waar men in het productieproces niets aan kan veranderen, zoals de vraag. Systeemonzekerheid is afhankelijk van het productieproces, zoals onzekerheid over de processing time. Ook volgens (Mc Kay, Buzacott, Safayeni, 1989) kunnen de oorzaken ingedeeld worden aan de hand van de onzekerheid. Deze indeling is echter eerder gebaseerd op de **mate van onzekerheid** en heeft twee extremen: de compleet ongekende oorzaak en de gekende onzekerheid.

In een andere artikel worden de oorzaken in vier groepen geclassificeerd, namelijk veranderingen in **externe vraagvoorwaarden** (bv. verandering in vraagpatroon), **interne aanbodvoorwaarden** (bv. verandering in lead time), effecten van **rolling planning horizon** en **systeemeffecten** (Grubbstrom & Tang, 2000). In een rolling horizon planningsstructuur, wordt enkel informatie over de jobs binnen een constant tijdsinterval in beschouwing genomen. Naarmate de tijd verstrijkt, wordt het schema verder 'gerold' en worden nieuwe, bijkomende jobs opgenomen in de planning (Blackburn, Kropp, Millen, 1986). Systeemeffecten duiden dan weer op de hiërarchische afhankelijkheden. Indien een beslissing op een hoger hiërarchisch niveau verandert, zal er een kettingreactie ontstaan en zal die een impact hebben op de lagere niveaus.

2.2.2 Gevolgen van variabiliteit

Een verschil tussen het predicatieve productieplan en het werkelijke verloop is het gevolg van alle mogelijke vormen van variabiliteit. Het probleem is dat de variabiliteit niet kan gecontroleerd worden en dat het resulteert in **systeeminstabiliteit**, **voorraadsurplus**, **klantenontevredenheid** en **verlies van inkomsten** (Sarin, Nagarajan, Jain, Liao, 2009). Alsook zullen de afspraken die gebaseerd zijn op het predicatieve plan moeten herzien worden. In een flow shop of een job shop structuur is de variabiliteit nog gevaarlijker aangezien variabiliteit die zich bevindt in het begin van het productieproces, zal escaleren naarmate men het proces verder doorloopt (Hopp & Spearman, 2001). Ideaal zou men ook rekening moeten houden met de impact van de variabiliteit niet alleen binnen het eigen bedrijf maar op de gehele supply chain. De reden hiervoor is dat de variabiliteit zal escaleren naarmate men de supply chain doorloopt en een gelijkaardig effect bekommt als het **bullwhip effect**.

Doordat variabiliteit niet vermeden kan worden, is het essentieel het te meten, te begrijpen, de oorzaken te zoeken en deze te beheren zodat men toch een effectief en efficiënt productiebeheer bekommt. Hoewel er wetenschappelijke papers zijn die stellen dat variabiliteit altijd gereduceerd moet worden, is er ook een mening dat variabiliteit niet in se slecht hoeft te zijn, maar afhankelijk is van de **strategische keuzes** die het management maakt (Hopp & Spearman, 2001).

In de literatuur worden er reeds vele mogelijkheden gesuggereerd om variabiliteit te bestrijden. Herplannen en het opstellen van een robuust productieplan zijn hierbij vaak gehanteerde technieken en zullen in detail besproken worden.

2.3 Bestrijden van variabiliteit

Zoals reeds aangegeven, wordt variabiliteit veroorzaakt door verschillende vormen van onzekerheid. Hoe men kan plannen onder onzekerheid wordt onder andere beschreven in (Sevaux & Sorensen, 2004). In dit artikel, *A genetic algorithm for robust schedules in a one-machine environment with ready times and due dates*, wordt er gerefereerd naar een nog ongepubliceerd manuscript van Davenport en Beck die een onderscheid maken tussen proactieve en reactieve planning. In het geval van een **proactieve planning** implementeert men extra buffertijd in de planning, maakt men gebruik van probabilistische technieken om een robuuste planning te bepalen en stelt men diverse planningen op om zo onvoorziene gebeurtenissen op te vangen. Robuust plannen is een onderdeel van deze proactieve planning. In **reactieve planning** daarentegen, worden procedures ontwikkeld die de planning re-optimaliseren wanneer er verstoringen optreden. Herplannen behoort tot deze categorie.

2.3.1 Robuust plannen

Robuust plannen zorgt ervoor dat de planning bestand is tegen enige variabiliteit. Er bestaan verschillende methoden om tot een robuuste planning te komen (Wu et al., 2009). Vier verschillende manieren zullen kort beschreven worden. Vooraleerst bestaan er **redundancy-based technieken**. Bij deze aanpak worden er buffers in tijd, capaciteit of voorraad gebruikt om onverwachte gebeurtenissen op te vangen. Mogelijke buffers zijn het toelaten van overuren en het gebruik van onderaannemers. Het gebruik van buffers wordt ook in andere literatuur vermeld (Hopp & Spearman, 2001) en ook worden voorbeelden van deze techniek beschreven (Mehta & Uzsoy, 1998). Een tweede techniek, **contingent scheduling**, anticipeert op mogelijke afwijkingen in de planning en genereert verscheidene schema's die optimaal functioneren indien een bepaalde geanticipeerde afwijking zich voordoet (Wu et al., 2009). Een derde aanpak, beschreven in datzelfde artikel, is het gebruik van **sampling en scenario's** om een robuuste planning te ontwikkelen. Hierbij wordt een beroep gedaan op branch-and-bound algoritmen of heuristieken, waarna de Monte Carlo simulatie wordt toegepast om de scenario's te evalueren. Als laatste wordt in het artikel ook **probabilistisch plannen** kort

toegelicht. Kansen worden toegekend aan de mogelijke afwijkingen. Nadien worden de verschillende plannings geëvalueerd. De planning met de hoogste waarschijnlijkheid op het behalen van een bepaald resultaat zal dan geselecteerd worden.

In de studie omtrent robuust plannen wordt er vaak gerefereerd naar Kouvelis en Yu. Vooral omdat zij de techniek van **robuust discreet optimaliseren** duidelijk uit de doeken hebben gedaan (Kouvelis & Yu, 2003). De beschreven aanpak maakt gebruik van scenario's om onzekerheid te structureren. Elk scenario stelt een mogelijke uitkomst voor, waarbij elk scenario zich kan voordoen met een bepaalde onbekende probabiliteit. Door gebruik te maken van een minimax criterium probeert men vervolgens beslissingen te identificeren die ongeacht de uitkomst goed presteren. De oplossingen met de beste worst-case performance worden geselecteerd. Er worden drie verschillende criteria voorgesteld om een finale oplossing te selecteren, namelijk de maximale kost of de absolute robuustheid, de maximale spijt of robuuste afwijking en de relatieve robuuste afwijking. In de literatuur kan men ook vele voorbeelden van robuust plannen terugvinden. In een voorbeeld in een SM structuur wordt een stabiel plan gedefinieerd als een robuust plan waarbij de wijzigingen in het plan klein zijn ten opzichte van de variabiliteit in de verwerkingskenmerken (Leus & Herroelen, 2007).

2.3.2 Herplannen

Aangezien men niet altijd beschikt over de mogelijkheid om buffers te implementeren of andere vormen van robuust plannen toe te passen, zal men vanaf een bepaalde graad van variabiliteit de planning wel moeten **aanpassen**. Herplannen is een dynamische aanpak waarbij men reageert op verstoringen en hierbij rekening houdt met informatie over de toekomst (Bean, Birge, Mittenthal, Noon, 1991).

In *Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies, and methods, Journal of Scheduling* wordt een zeer duidelijk overzicht geschetst van het herplanningsproces (Vieira et al., 2003). Zo belicht het de herplanningsstrategie, het herplanningsbeleid en de verschillende herplanningsmethoden.

De **herplanningsstrategie** beschrijft of er al dan niet een productieplanning wordt opgesteld. Zo bestaat er een dynamische planning, waarbij er geen planningsplan gecreëerd of hernieuwd worden. Anderzijds bestaat er een predictieve-reactieve planning, waarbij dit wel het geval is en er een bepaald herplanningsbeleid gevolgd wordt.

Het **herplanningsbeleid** omschrijft wanneer en hoe de herplanning gerealiseerd wordt. Het beleid vermeldt welke gebeurtenissen aanleiding geven tot herplannen. Verder stelt het beleid ook welke methode gebruikt wordt om de huidige planning te herzien. Er bestaan drie verschillende beleidsvormen, nl. periodisch herplannen, event-driven herplannen en hybridisch herplannen. Bij de eerste beleidsvorm wordt de planning periodiek herzien. Het is echter niet evident om de optimale herplanningsperiode te bepalen. In het geval van een event-driven herplanningstactiek wordt de planning herzien als er zich een bepaalde gebeurtenis voordoet, zoals het uitvallen van een machine, een dringende bestelling, een afgelaste bestelling, of een verandering in de prioriteit van een job. Hybride herplanning kan gezien worden als een combinatie van de voorgaande beleidsvormen aangezien de planning periodiek herzien wordt, maar er ook herplant wordt indien er zich speciale gebeurtenissen voordoen.

De paper kijkt vervolgens naar de **herplanningsmethoden**, wat de manier bepaalt waarop de planning gegenereerd en herzien wordt. Een overzicht van de drie meest gehanteerde planningsmethoden wordt gegeven, namelijk right-shift herplannen, gedeeltelijk herplannen en volledig herplannen.

- Right-shift herplannen stelt elke overblijvende job uit met de lengte van de productieonderbreking. Op een Gantt chart komt dit overeen met het naar rechts verschuiven van de volgende jobs met een grootte gelijk aan de tijd die nodig is om de planning uitvoerbaar te maken.
- Gedeeltelijke herplanning daarentegen gaat alleen de jobs herplannen die beïnvloed worden door de verstoring, waardoor de methode ook als affected operations herplanning gekend staat. Bij deze aanpak tracht men zo veel mogelijk de initiële planning te behouden. Een voorbeeld van gedeeltelijk herplannen is Match-up scheduling, waarbij de planning herzien wordt met als doel het nieuwe schema zo

snel en zoveel mogelijk te laten overeenstemmen met het oorspronkelijke plan (Cowling & Johansson, 2002).

- De derde methode is volledige herplanning. Hierbij worden alle jobs die niet behandeld zijn voor het tijdstip van herplannen herzien, zelf de jobs die niet beïnvloed worden door de verstoring. Het gevolg is dat volledige herplanning leidt tot meer instabiliteit, maar anderzijds kan er wel een betere planning opgesteld worden door een grotere vrijheid bij het plannen.

Aan het einde van het herplanningsproces zal er een **evaluatie** van de bekomen planning plaatsvinden. Dit kan gebeuren aan de hand van verscheidene prestatiecriteria, die gegroepeerd kunnen worden in drie groepen: planefficiëntie, planstabiliteit en de kost van herplanning (Vieira et al., 2003). Om de **efficiëntie** van de planning, of de bruikbaarheid van de planning (Cowling & Johansson, 2002), na te gaan, kijkt men naar de verbetering in de doelfuncties. Maatstaven gerelateerd aan de tijd zoals makespan, mean tardiness, maximum lateness en mean flow-time worden toegepast op het nieuwe plan. De **stabiliteit** van de planning wordt geëvalueerd door te kijken naar de afwijkingen tussen de oorspronkelijke en de nieuwe planning en de impact dat het nieuwe plan heeft op het verloop van de productie. Als laatste evalueert men op basis van de **herplanningskosten**. De planningsuitvoerbaarheid kan ook gebruikt worden als een maat om de kwaliteit van het plan te evalueren (Kopanos et al., 2008). Een plan is uitvoerbaar als de planning realiseerbaar is in een aanvaardbare tijdspanne zonder daarbij vooropgestelde beperkingen te overtreden. Pas als een plan als uitvoerbaar bestempeld wordt, mag het management overwegen om dit plan als nieuw productieplan te gebruiken.

Ter aanvulling kunnen er in de literatuur **voorbeelden** van herplanning teruggevonden worden, zoals na het binnenkomen van nieuwe jobs (Hall & Potts, 2004). Alsook kan men een duidelijk overzicht van herplannen bekomen in *A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems* (Ouelhadj & Petrovic, 2009).

2.3.3 Gevolgen van herplannen

- *Kosten*

De kosten ontstaan bij het herplannen, kunnen onderverdeeld worden in drie categorieën: calculatiekosten, set-upkosten en transportkosten (Vieira et al., 2003). **Calculatiekosten** omvatten alle overheadkosten gemaakt bij het herplannen, alsook de kosten van de investering in de nodige informatiesystemen en de kosten van administratie, onderhoud en herstelling. **Set-upkosten** ontstaan wanneer materiaal opnieuw toegewezen wordt of wanneer gereedschap herpland moet worden door wijzigingen in het productieplan. **Transportkosten** of material handling kosten ontstaan doordat materiaal vroeger geleverd moet worden dan voorzien of doordat jobs getransporteerd moeten worden naar een andere plek in de fabriek.

- *Prestatie productiesysteem*

Herplannen kan ook een impact hebben op de prestatie van het productiesysteem, gemeten aan de hand van de **doelfuncties**. De aspecten van het herplanningsbeleid die hierbij een invloed uitoefenen zijn de **herplanningsfrequentie**, de **herplanningsperiode** en de **gemiddelde processing time** van de jobs. Zo zal een lagere herplanningsfrequentie, wat weerspiegeld wordt in langere herplanningsperioden, het aantal set-ups verminderen door het groeperen van gelijkaardige jobs, maar zal het de cycle time en WIP² verhogen (Vieira et al., 2003). In deze situatie, wanneer de herplanningsperiode relatief lang is, kunnen jobs starten en afgewerkt worden tussen de momenten van herplanning. Dit zal evenwel resulteren in een hogere calculatiekost tijdens het herplannen doordat meer jobs in overweging genomen worden bij het herplanningsprobleem. Daarentegen zal een hogere herplanningsfrequentie, en dus kortere herplanningsperioden, toelaten om sneller te reageren op verstoringen, maar zal het aantal set-ups verhogen. Wanneer de periode relatief kort is, zullen er telkens op het tijdstip van herplannen een aantal beschikbare jobs wachten om verwerkt te worden. Andere jobs, die reeds gestart zijn, moeten nog verder afgewerkt worden.

² **WIP (Work in progress)** verwijst naar al het materiaal en de gedeeltelijk afgewerkte producten die zich bevinden in de verschillende fases van het productieproces. Het is de stock tussen de start en het eindpunt van het productieproces. WIP bevat niet de stock van grondstoffen aan het begin van het productieproces en ook niet de stock van afgewerkte producten aan het einde van het productieproces.

Verschillende opinies bestaan omtrent de **impact van herplannen** op de prestatie van het productiesysteem. De herplanningsperiode zal een grotere impact hebben op de prestatie van het productiesysteem wanneer er meer onzekerheid is (Muhlemann, Lockett, Farn, 1982). Een periodiek herplanningsbeleid zorgt voor een nagenoeg optimale prestatie wanneer de order release periodiek plaatsvindt (Church & Uzsoy, 1992).

Alsook wordt er gesteld dat event-driven herplanning nuttig kan zijn, maar dat meer frequent herplannen de prestatie van het productiesysteem niet significant zal verbeteren. Er kan dan ook weer aangetoond worden dat match-up scheduling, waarbij meer jobs opnieuw toegewezen worden, leidt tot een betere prestatie dan een right-shift methode waarbij de jobs simpelweg uitgesteld worden (Bean et al., 1991).

- *Nervousness*

Eén van de grootste problemen veroorzaakt door herplannen is nervousness of instabiliteit. Er kan gesteld worden dat nervousness zich voordoet doordat elke aanpassing in hogere hiërarchische productiesystemen een verandering teweeg brengt in lagere hiërarchische productieplannen (Grubbstrom & Tang, 2000). Deze aanpassingen hebben een toenemend effect in productiesystemen. Hierdoor zal een 'nervous' productieplan weinig voorspelbaar zijn. Nervousness wordt gestimuleerd wanneer de planning frequenter herzien wordt. Dit kan in verband gebracht worden met het **herplanningsbeleid** en de verschillende **herplanningsmethoden**. Zo zal periodiek herplannen zorgen voor meer stabiliteit en minder nervousness dan wanneer er constant herpland wordt. Right-shift scheduling zal zorgen voor de minste nervousness en de meeste planningsstabiliteit. Gedeeltelijk herplannen zal beogen om planningsstabiliteit met weinig nervousness te bekomen. En tenslotte, wordt er bij volledig herplanning een hoge nervousness teweeg gebracht.

Wanneer men beslist om al dan niet te herplannen, dan moeten er wel een aantal **stabiliteitsfactoren** in rekening gebracht worden (Kopanos et al., 2008). Deze factoren zijn de afwijking in starttijden van de jobs, het opnieuw toewijzing van de onderdelen en de aanpassing van de jobsequentie. Door deze stabiliteitsfactoren in beschouwing te nemen, kan men planningen genereren die een hogere mate van stabiliteit en minder nervousness hebben waardoor deze meer geschikt zijn voor reële toepassing.

Het is duidelijk dat frequent herplannen het productieproces meer nervous en moeilijk te voorspellen maakt, maar dit moet zeker afgewogen worden tegen het voordeel van frequent herplannen, namelijk de mogelijkheid om sneller in te grijpen bij verstoringen.

2.4 Reden tot onderzoek

Robuust plannen en herplannen kunnen helpen om de variabiliteit gedurende de uitvoering van het productieplan te bestrijden, maar brengen wel neveneffecten met zich mee. Men kan ook opmerken dat men bij het herplannen verschillende keuzes moet maken en gevolgen moet afwegen. Hoewel er een aantal methodes voorhanden zijn om variabiliteit te bestrijden, lijkt het cruciaal om inzicht te verkrijgen in de **impact van variabiliteit** op de prestatie van de productieplanning. Dit inzicht kan helpen bij het maken van beslissingen.

Dit **eindwerk** tracht dit inzicht te bekomen door te onderzoeken hoe de variabiliteit zich in het productieplan manifesteert en wat het effect van variabiliteit is op het verloop van het productieplan. De prestatie van het opgestelde productieplan zal gemeten worden aan de hand van enkele doelfuncties. Deze doelfuncties zullen in het onderzoek gebruikt worden als indicatoren die het effect van variabiliteit op het productieproces weergeven. In een eerste onderzoek zal de impact van veranderingen op de eindwaarde van een doelfunctie bestudeerd worden. In een tweede onderzoek wordt de impact van variabiliteit geanalyseerd gedurende de uitvoering van het productieproces door middel van procescontrole. Beide onderzoeken worden hierna in detail besproken.

3 Onderzoek 1

3.1 Doel onderzoek

Het eerste onderzoek tracht na te gaan wat **het effect is van veranderingen** in de verschillende verwerkingskenmerken op de uiteindelijke waarde van de doelfuncties. Er zal onderzocht worden of een productieplan tot een goede **schatting** leidt van deze waarde of dat de vooropgestelde waarde van het productieplan juist een onder- of overschatting is van de werkelijke waarde. Eens het verband tussen de verschillende verwerkingskenmerken en de eindwaarde van de doelfunctie duidelijk is, zal er getest worden of het mogelijk is de waarde van de verschillende doelfuncties in te schatten wanneer de variatie in de verwerkingskenmerken constant zou zijn. Indien men dit correct zou kunnen inschatten, zou men in staat zijn om tijdens het opstellen van het productieplan bepaalde afspraken met enige zekerheid vast te leggen.

In **dit hoofdstuk** wordt er eerst vermeld met welke basisdata het onderzoek uitgevoerd wordt. Dan zal de werking van de simulatietool uitgelegd worden. De theoretische verwachtingen en bijhorende hypothesen worden opgelijst, waarna de verwerking van de nieuwe data en de analysemethode verklaard worden. Nadien zullen de resultaten van het onderzoek besproken worden, net als een controle van de gestelde hypothesen. De algemene conclusie van onderzoek 1 sluit dit hoofdstuk af.

3.2 Basisdata

Om het effect van variabiliteit op een planning te onderzoeken, wordt de **dataset** opgesteld in *A hybrid genetic algorithm for the single machine maximum lateness problem with release times and family set-ups* (Sels & Vanhoucke, 2012) gebruikt als basisgegevens. Dit onderzoek baseert zich op een single machine structuur waarbij de enige machine constant beschikbaar is en maximaal één job tegelijk kan uitvoeren. Er wordt ook de assumptie van ‘non preemption’ aangenomen, hetgeen inhoudt dat een job, die verwerkt wordt in de machine, niet kan stopgezet worden om een andere job voorrang te geven. Naast de processing time, de release time, de due date en de set-up times wordt er ook gewerkt met families van jobs als verwerkingskenmerk. Eén jobfamilie omvat alle jobs die dezelfde specificaties hebben. Indien in de planning twee opeenvolgende jobs uit verschillende families komen, zal er

rekening moeten gehouden worden met de specifieke set-up time tussen die families. Het doel van dit **hybridisch genetische algoritme** is het minimaliseren van de maximum lateness (Sels & Vanhoucke, 2012). Volgens de Graham notatie gaat dit artikel om een $1|r_{ij}, s_{fg} | L_{\max}$ planningssituatie.

De processing times, release times en due dates worden in het voorgenoemde onderzoek steeds **uniform verdeeld** over een vooraf gedefinieerd interval. De release times zijn afhankelijk van de som van alle processing times en de parameter l , waarbij l de grootte van het interval specificeert als een percentage van de som van alle processing times. Doordat de release times uniform verdeeld worden over dat interval, geeft de l -waarde dus een idee van de spreiding van de release times. De due dates zijn dan weer afhankelijk van de release time, de processing time en parameters k en q . De parameter k bepaalt het tijdstip waarop de due date kan vallen, namelijk eerder vroeg of eerder laat ten overstaan van de som van de release time en de tijd nodig om de job te verwerken. De parameter q bepaalt de aanvaardbare speling die een job krijgt, ook wel slack genoemd.

Voor dit eindwerk wordt gebruik gemaakt van de datasets met een probleemgrootte van 100 jobs. Door het toepassen van het algoritme worden per set van parameters l , k en q alle waarden bekomen voor de verschillende **doelfuncties**, namelijk de maximum lateness (ML), makespan (M), mean flow time (MFT), mean tardiness (MT) en proportion of tardy jobs (PTJ). Deze vijf doelfuncties worden gekozen om het effect van variabiliteit op zowel due date gebaseerde doelfuncties als op de completion time gebaseerde doelfuncties na te gaan. De formules die gebruikt worden om deze doelfuncties te berekenen kan men terugvinden in vergelijking 1 (supra, p. 7).

3.3 Simulatietool

In (Sels & Vanhoucke, 2012) wordt er verondersteld dat de waarden voor P_t , R_t , D_d en S_t niet veranderen tijdens de uitwerking. In dit onderzoek wordt de impact van variabiliteit bestudeerd en daarom wordt er een simulatietool ontwikkeld om in de gegeven data enige **variabiliteit** te introduceren. De simulatietool zal eerst de lijst van data inlezen, dan variabiliteit toevoegen, vervolgens de nieuwe data wegschrijven en die uiteindelijk als input gebruiken voor verder onderzoek.

3.3.1 De variërende parameters

Zoals reeds aangegeven in de literatuurstudie zijn er veel waarden die gewijzigd kunnen worden door variabiliteit. Op basis van de onderzoeken beschreven in de literatuur, wordt er geopteerd om drie parameters te laten variëren, namelijk processing times, release times en due dates. De variabiliteit in deze drie verwerkingskenmerken omvat zowel interne als externe onzekerheid. Men veroorzaakt namelijk zelf direct of indirect wijzigingen in Pt, Rt en Dd. De **processing time** kan bijvoorbeeld veranderen doordat de processing time onderschat wordt, er kwaliteitsproblemen vastgesteld worden of de jobinhoud wijzigt. De release times en due dates zullen meestal veranderen door het toedoen van anderen, onafhankelijk van eigen acties. Variabiliteit in de **release time** kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden door laattijdige leveringen van grondstoffen of foutieve voorraadgegevens. De **due dates** kunnen zowel verlaat als vervroegd worden door de klant. Deze drie verwerkingskenmerken worden gekozen als variabelen omdat er aangenomen wordt dat deze de grootste kanshebbers zijn om een impact uit te oefenen op de verschillende doelfuncties.

Er wordt verwacht dat de **set-up time** voornamelijk bepaald wordt door manuele handelingen, hierdoor zal er waarschijnlijk meer variabiliteit in St aanwezig zijn dan wanneer ze automatisch uitgevoerd zou worden (Cao, Patterson, Bai, 2005). Toch wordt er besloten om deze parameter niet te laten variëren. Een toevoeging van een parameter zou leiden tot een onoverzichtelijk geheel van parameters en misschien statistisch minder significante resultaten als gevolg hebben. Alsook wordt er verwacht dat het effect van variabiliteit in St geabsorbeerd wordt in de variabiliteit van de processing times waardoor het niet nodig is de impact van variabiliteit in de set-up time apart te bestuderen.

3.3.2 Toevoegen van variabiliteit

De gebruikte werkwijze om variabiliteit toe te voegen aan de basisdata is voornamelijk gebaseerd op een reeds bestaande werkwijze (Leimi & Sabuncuoglu, 2002). Elk van de drie variabelen kan gewijzigd worden via verschillende manieren, maar in deze thesis wordt geopteerd om elk kenmerk te veranderen volgens ofwel een **normale ofwel een triangulaire verdeling**. Er wordt verondersteld dat de planner in staat is om een redelijke schatting te maken van de werkelijke waarde waardoor de geschatte originele waarde steeds als gemiddelde kan genomen worden. Er wordt ook geopteerd om een normale en een

triangulaire verdeling te gebruiken omdat er verondersteld wordt dat er 50 procent kans is om een kleinere waarde uit te komen dan de originele en 50 procent kans om een grotere waarde uit te komen. In de realiteit wordt er verwacht dat er meer kans is dat een release time verlaat zal worden en een due date meer kans heeft om vervroegd te worden dan verlaat. Toch wordt er aan beide dezelfde kans gegeven omdat deze indeling van kansen het meest onbevooroordeeld lijkt. Hierdoor kan men het effect van variabiliteit algemeen bekijken in plaats van zekere kansen op te leggen en daardoor de resultaten meer toe te spitsen tot één bepaalde sector of industrie. De **standaardafwijking** van de normale verdeling en het interval voor de triangulaire verdeling worden bepaald door een percentage te nemen van het gemiddelde. Om het percentage vast te leggen per scenario wordt er gebruik gemaakt van de variabelen Pdev, Ddev en Rdev.

- *Pdev*

In de simulatietool wordt er voor de **processing time** eerst een standaardnormale verdeling, i.e. een normale verdeling met 0 als gemiddelde en 1 als standaard afwijking, gegenereerd waarbij dan een willekeurige waarde uit deze verdeling geselecteerd wordt door middel van de standaardfunctie `.nextGaussian()` toe te passen. Deze willekeurige waarde wordt vervolgens vermenigvuldigd met de standaardafwijking van de processing times, Pdev, die de volgende percentages kan aannemen: 10, 20 en 30. Bijvoorbeeld indien de planner voor een job in de planning stelt dat Pt gelijk is aan 10 en Pdev aan 20 dan zal er impliciet een normale verdeling gecreëerd worden met 10 als gemiddelde waarde en 2 als standaard afwijking. Voor deze verdeling bevindt 99,7 procent van alle getallen zich in het interval [4,16].

- *Ddev*

Om een normale verdeling te genereren voor de **due dates** wordt er gebruik gemaakt van de colt package³ en de functie `.nextDouble(gemiddelde waarde, standaardafwijking)`. Deze functie genereert een normale verdeling met de opgegeven gemiddelde waarde en de opgegeven standaardafwijking en selecteert meteen ook willekeurig een getal uit deze verdeling. De mogelijke waarden voor Ddev zijn 10, 25 en 40 procent.

³ **Colt package** (European Organization for Nuclear Research, 1999): een verzameling van verschillende open source libraries. De code dient als hulp bij wetenschappelijk en technische programmeren in Java, URL:<<http://acs.lbl.gov/software/colt/>>

- *Rdev*

De variabiliteit in de **release times** wordt uitzonderlijk niet gegenereerd door een normale verdeling maar door een triangulaire functie. Er wordt gebruik gemaakt van de functie `.nextInt(maximale waarde)` waarbij de getallen variëren tussen 0 en een gegeven maximale waarde. Het maximum wordt gelijkgesteld aan het verschil tussen de gemiddelde waarde + 1 keer de standaardafwijking en de gemiddelde waarde – 1 keer de standaardafwijking. Eén getal wordt geselecteerd uit dit interval en dan opgeteld bij het minimum, hetgeen gelijkstaat aan de gemiddelde waarde – 1 keer de standaardafwijking. De werkelijke waarde voor de R_t zal dus zeker in het interval $[\mu * (1 - Rdev), \mu * (1 + Rdev)]$ liggen. Het kan voorkomen dat de werkelijke waarde een negatief getal wordt, dan wordt er geopteerd om deze waarde gelijk te stellen aan 0 aangezien het voor de planning niet uitmaakt of het job juist op tijdstip 0 beschikbaar is of vroeger. $Rdev$ kan in de verschillende situaties gelijk gesteld worden aan 20 of 30 procent.

Hoewel deze thesis de impact van variabiliteit wil nagaan wordt er toch geopteerd om niet alle waarden voor R_t en D_d te veranderen aangezien dit niet realistisch lijkt. Om het aantal wijzigingen in R_t en D_d te bepalen, wordt er gebruikgemaakt van nog twee extra parameters, namelijk pR_t en pD_d .

- *pRt*

Deze parameter bepaalt hoe groot de kans is dat een **release time** effectief zal gewijzigd worden. In de simulatietool wordt er dan ook eerst een random getal gegenereerd tussen 0 en 1 via de functie `random.nextDouble()`. Indien dit willekeurig getal kleiner of gelijk is aan pR_t , wordt de bijhorende release time gewijzigd, anders blijft de release time onveranderd. Er wordt gewerkt met 10 en 20 procent kans. Deze percentages zijn gebaseerd op *A genetic algorithm for robust schedules in a one-machine environment with ready times and due dates* waarin wordt vermeld dat in een reële Franse autoassemblagefabriek bij ongeveer 20 procent van alle jobs de release times veranderd werden (Sevaux & Sorensen, 2004).

- *pDd*

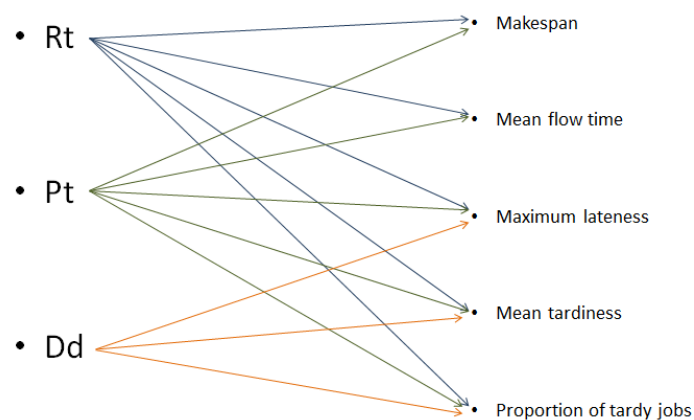
Deze parameter bepaalt hoeveel kans er is dat een **due date** effectief zal veranderen. Net zoals bij pRt wordt er eerst willekeurig een getal geselecteerd in het interval [0,1] waarna dit getal vergeleken wordt met pDd. De gekozen percentages horende bij de kansen zijn 5 en 10, net zoals de percentages die gebruikt werden in (Leimi & Sabuncuoglu, 2002).

Pdev	pRt	Rdev	pDd	Ddev
10	10	20	5	10
20	20	30	10	25
30				40

Tabel 1: Overzicht variabiliteitsparameters met percentages als waarde

3.4 Verwachtingen

Voorafgaande aan de uitvoering van de simulatie, wordt er eerst **theoretisch** nagegaan wat de te verwachte impact is van de variabiliteit in de verwerkingskenmerken op de doelfunctiewaarden en welke hypothesen hieruit kunnen voortvloeien.



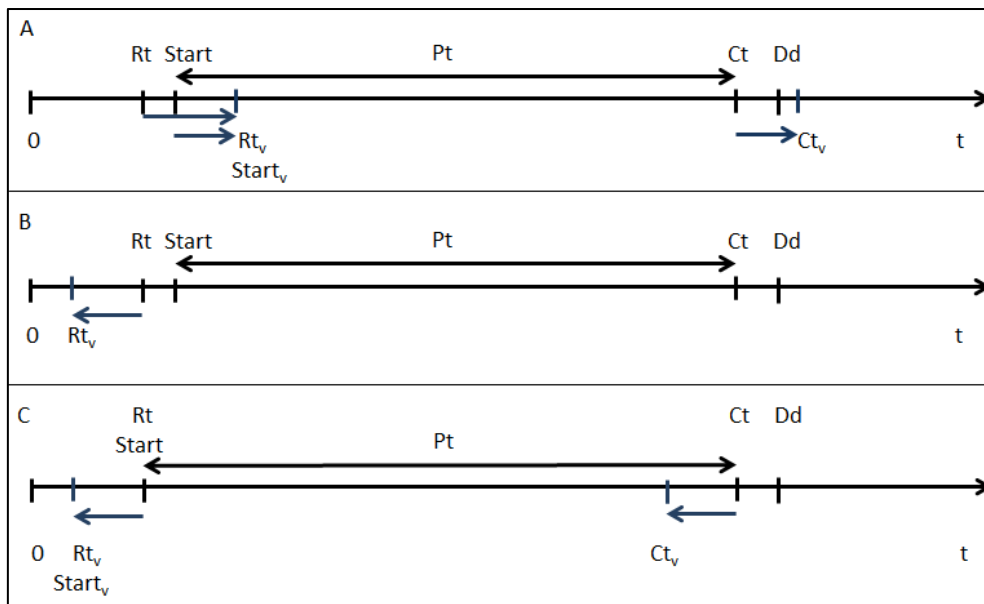
Figuur 5: Verwachte impact van verwerkingskenmerken op doelfuncties

Aangezien de makespan en de mean flow time onafhankelijk zijn van de due date, zal de variatie in de due dates geen impact hebben op deze doelfuncties. Er wordt wel verwacht dat deze doelfuncties een effect zullen ondervinden van variatie in de release times en in de processing times. De due date gebaseerde doelfuncties, namelijk maximum lateness, mean tardiness en proportion of tardy jobs, worden dan weer verwacht een impact te ondervinden van de variabiliteit in zowel de release times, de processing times als de due dates (Figuur 5).

3.4.1 Variatie in release time

Bij een **vertraging** in de release time zal men geen impact ondervinden als de nieuwe release time (Rt_v) zich nog steeds voor de geplande starttijd bevindt. Indien variatie in de release time ervoor zou zorgen dat een job pas later beschikbaar is dan het tijdstip waarop men gepland had met die job te starten, dan leidt deze variatie bij een onveranderlijke processing time tot een latere starttijd en een latere completion time. Hierdoor zullen makespan en mean flow time vergroten. Het is echter mogelijk dat deze completion time de due date nu wel of nog meer overschrijdt dan verwacht, waardoor ook de maximum lateness, de mean tardiness en de proportion of tardy jobs kunnen vergroten (Figuur 6A). Echter, indien de nieuwe release time zich nog steeds situeert voor de geplande starttijd, dan zal er geen effect ondervonden worden van deze variatie in de doelfuncties en dan zorgt deze wijziging er enkel voor dat de grondstoffen en andere materialen een kortere periode moeten gestockeerd worden vooraleer bewerkt te worden.

Een **vervroeging** van de release time zal enkel effect hebben indien de machine voor de geplande starttijd van deze job niet gebruikt wordt en dus wacht tot die specifieke job beschikbaar is (Figuur 6C). In deze situatie en gegeven dat de processing time ongewijzigd blijft, zal de starttijd vervroegen en de completion time verkleinen. Een kleinere completion time kan op zijn beurt leiden tot een lagere waarde voor alle doelfuncties. Echter, indien de starttijd van de job onafhankelijk is van de release time dan zal een vervroeging enkel aanleiding geven tot een voorraad aan benodigde middelen die men nu langer zal moeten beheren alvorens verwerkt te kunnen worden (Figuur 6B). In dit geval zal de verandering dus geen invloed hebben op de doelfuncties.

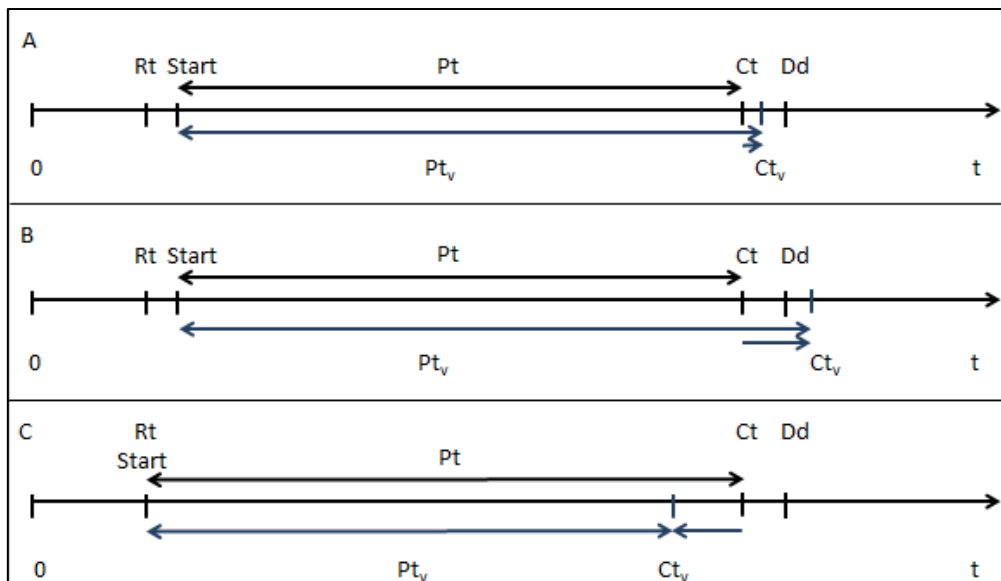


Figuur 6: Effect van variatie in de release time

3.4.2 Variatie in processing time

verschillende mogelijkheden worden gevisualiseerd in figuur 7 waarbij Pt_v de nieuwe processing time weergeeft. Het effect van een **onderschatting** van de processing time op de due date gebaseerde doelfuncties is afhankelijk van de grootte van de onderschatting (Figuur 7A en 7B). Er wordt hierbij verondersteld dat de release times en de due dates ongewijzigd blijven. Een onderschatting van Pt leidt altijd tot een grotere completion time, hetgeen een effect zal hebben op de mean flow time en de makespan. Indien de nieuwe completion time zich nog voor de originele due date situeert in de tijd, dan zal er geen verschil optreden bij de maximum lateness, de mean tardiness en de proportion of tardy jobs. Echter, indien de onderschatting zo groot is dat de nieuwe completion time toch de due date overschrijdt of nog meer overschrijdt dan in de planning voorzien was, dan zal dit een versterkend effect hebben op de drie due date gebaseerde doelfuncties.

Naast een onderschatting, is het ook mogelijk dat de processing time **overschat** wordt in de originele planning (Figuur 7C). Dit zal een positief effect hebben op de completion time indien de release time onveranderd blijft. Dit positieve effect zal zich dan ook vertalen in een lagere waarde voor de makespan en de mean flow time. Een overschatting kan ook een effect hebben op de due date gebaseerde doelfuncties indien de originele completion time de due date had overschreden. In dit geval bekomt men een lagere waarde voor zowel maximum lateness, mean tardiness als proportion of tardy jobs.



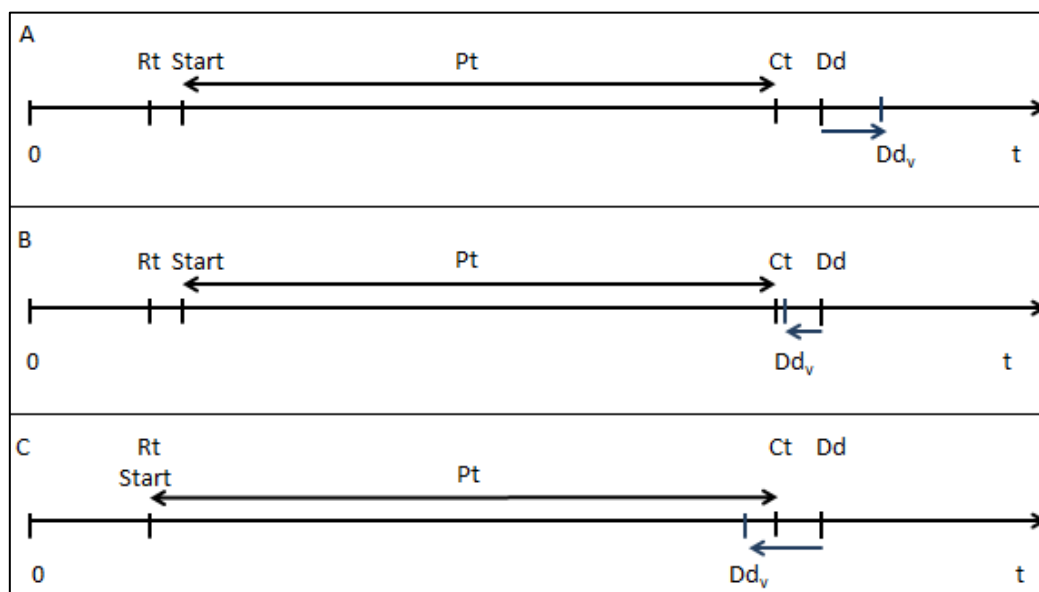
Figuur 7: Effect van variatie in processing time

3.4.3 Variatie in due date

Een verandering in de due date (Dd_v) zal enkel kunnen leiden tot een wijziging in de maximum lateness, de mean tardiness en de proportion of tardy jobs. De eerste mogelijkheid is dat de due date, door een wijziging van de klant, in werkelijkheid naar een **latere** datum verlegd wordt dan gepland. Als de processing time en de release time niet veranderen, dan kan dit als gevolg hebben dat een job die de due date oorspronkelijk overschreed, nu de due date niet meer overschrijdt en dus niet meer als laattijdig beschouwd wordt. Dit zal een impact hebben op alle drie de due date gebaseerde doelfuncties. Een latere due date kan ook leiden tot een situatie waarin de job de due date minder overschrijdt dan gepland en de maximum lateness en de mean tardiness dus een lagere waarde zullen aannemen maar de proportion of tardy jobs zal hierdoor niet veranderen. Indien de completion time van de job de due date niet overschreed in het originele plan, dan zal deze verandering geen effect hebben op de due date gebaseerde doelfuncties. (Figuur 8A)

De tweede mogelijkheid is dat de due date **vervroegd** wordt. De grootte van de vervroeging zal bepalen wat het resultaat hiervan zal zijn. Indien de grootte van de vervroeging kleiner is dan de grootte van de slack die de planning bezat, i.e. het tijdsinterval tussen de completion time en de due date, dan zal deze vervroeging geen effect hebben op de drie doelfuncties (Figuur 8B).

Een vervroeging die de grootte van de aanwezige slack overtreft, zal er daarentegen voor zorgen dat de job als laattijdig beschouwd wordt (Figuur 8C). De grootte van laattijdigheid zal opgenomen worden in de mean tardiness en de maximum lateness. Alsook zal deze job nu bijgerekend worden in de proportion of tardy jobs waardoor ook deze doelfunctiewaarde zal toenemen. Indien de job in de planning reeds als laattijdig beschouwd werd, dan zal een vervroeging van de due dates ertoe leiden dat de maximum lateness en de mean tardiness een grotere waarde zullen aannemen. Echter, de waarde voor de proportion of tardy jobs zal niet veranderen.



Figuur 8: Effect van variatie in due date

3.4.4 Interactie tussen Pt, Rt en Dd

In het voorgaande wordt er enkel rekening gehouden met de variatie in één veranderlijke, maar in werkelijkheid is het mogelijk dat er twee of zelfs drie variabelen gelijktijdig een andere waarde aannemen dan vooropgesteld in de planning. Hierdoor kunnen effecten van de variabiliteit ofwel **versterkt** ofwel **afgezwakt** worden. Zo kan het bijvoorbeeld gebeuren dat een job door een laattijdige levering een hogere waarde verkrijgt voor de release time, maar dat dit effect gecompenseerd wordt doordat de processing time overschat werd. Of een job kan beïnvloed worden door zowel een onderschatting van de processing times als een vervroeging van de due date, waardoor deze twee negatieve effecten elkaar zullen versterken.

3.4.5 Interactie tussen jobs

Een volgende niveau van analyse wordt gecreëerd door de interactie tussen de verschillende jobs. Tot nu toe wordt er enkel rekening gehouden met het effect van variabiliteit in verschillende variabelen op een doelfunctie van één job. In deze simulatie wordt echter het effect nagegaan van variabiliteit in alle drie de verwerkingskenmerken op de combinatie van 100 jobs die **elkaar opvolgen** en allemaal verwerkt worden door één machine. Een wijziging in due date zal geen invloed hebben op het verloop van alle jobs maar wel een effect hebben op de due date gebaseerde doelfuncties. De veranderingen in release times en processing times kunnen wel een invloed hebben op het verder verloop van de planning. Deze veranderingen kunnen hierdoor ook een effect hebben op de doelfuncties van de volgende jobs. Indien een job vroeger afgewerkt wordt, als resultaat van een overschatting van de processing time of een vervroegde release time, dan zou de volgende job vroeger kunnen starten indien de release time van deze tweede job dit toelaat. Indien de release time van die tweede job echter later is of verlaat wordt door de laattijdige levering van de benodigde goederen, dan zal het effect van de vervroegde release time of de overschatte processing time niet verdergezet worden.

3.5 Hypothesen

Ondanks de verscheidenheid aan mogelijke gevolgen van variabiliteit in de verwerkingskenmerken, worden volgende effecten verwacht:

1. Veranderingen in processing time en release time leiden tot veranderingen in alle vijf de doelfuncties.
2. Veranderingen in due dates leiden tot veranderingen in de drie due date gebaseerde doelfuncties.
3. Hoe groter de veranderingen in de drie verwerkingskenmerken, hoe groter de wijzigingen in de doelfunctiewaarden.
4. De veranderingen in de release times, due dates en processing time zullen een evenredige en gelijkwaardige impact hebben op de doelfuncties.
5. De onderschatting van de processing time en de verlating van de release time zullen een grotere impact hebben op de doelfuncties dan respectievelijk de overschatting en de vervroeging ervan.

Reden: Bij de release time zal een verlating een groter effect hebben op de hele jobreeks aangezien de jobs optimaal gepland zijn om de maximum lateness te minimaliseren. Er wordt dan ook verwacht dat er minder kans is dat er genoeg slack tussen de jobs aanwezig is om deze verlating op te vangen. Bij een verkorting van een release time, zal het effect vlugger tegengewerkt worden door de geplande starttijden van de andere jobs. Uit diezelfde redenering volgt ook de verwachting voor de processing time.

6. De doelfunctie maximum lateness zal anders presteren onder druk van variabiliteit dan de andere doelfuncties.

Reden: tijdens de planning wordt de jobsequentie opgesteld met als streefdoel de maximum lateness te optimaliseren. Aangezien deze doelfunctie gebruikt wordt in de planningsfase, wordt er verwacht dat deze minder robuust zal zijn voor de toegevoegde variabiliteit.

3.6 Simulatie

De verschillende percentages, zowel degene voor de standaardafwijking als degene voor de kans, worden met elkaar gecombineerd zodat er een volledige vergelijking kan bekomen worden aan de hand van 72 verschillende **scenario's**. Eén lukraak gekozen batch, namelijk batch 1676_0, wordt onderworpen aan al deze scenario's. De reden dat de verschillende scenario's op slechts één batch worden toegepast, is dat op deze manier de parameters l, k en q van de basisdata geen effect hebben op de variabiliteitstudie. Per scenario worden 100 verschillende situaties gesimuleerd zodanig dat een gebalanceerd resultaat bekomen wordt en extreme situaties uitgesloten worden.

3.7 Verwerking van de nieuwe data en methode van analyse

Het hybride genetisch algoritme (Sels & Vanhoucke, 2012) wordt vooraleerst toegepast op de originele data en genereert de volgorde van de jobs en de waarden voor de verschillende doelfuncties. Deze **sequentie** van jobs wordt vervolgens opnieuw toegepast op de nieuwe data, waaraan variabiliteit toegevoegd werd. Tenslotte wordt voor deze nieuwe data de waarde voor de vijf doelfuncties bepaald in alle 72 scenario's en alle 100 situaties per scenario.

Per scenario wordt de gemiddelde eindwaarde per doelfunctie berekend. Deze waarde wordt steeds vergeleken met de originele eindwaarde voor de doelfuncties, door het **relatieve verschil** te berekenen (Vergelijking 2). Deze analysewaarde wordt dan gebruikt om de stabiliteit van de originele planning te bestuderen. Een positief relatief verschil houdt in dat de werkelijke waarde onderschat werd, een negatief relatief verschil dat de werkelijke waarde overschat werd. Naast dit relatieve verschil, wordt ook de standaardafwijking voor elke situatie per doelfunctie berekend en gebruikt als tweede parameter voor de analyse. De standaardafwijking is een indicator voor de variabiliteit binnen elke doelfunctie in elk scenario. Een overzicht van deze relatieve verschillen en standaardafwijkingen kan geconsulteerd worden in bijlage 1.

$$\text{Relatief verschil} = \frac{\mu_{\text{alle situaties}} - \text{originele waarde}}{\text{originele waarde}}$$

Vergelijking 2: Onderzoek 1 – Relatief verschil

De relatieve verschillen en standaardafwijkingen per doelfunctie worden geanalyseerd in SPSS. Telkens wordt er een **lineaire regressie** uitgevoerd waarbij het relatieve verschil of de standaardafwijking van de doelfunctie wordt gelijkgesteld aan een lineaire functie van P_{dev} , pRt , R_{dev} , pDd en D_{dev} (Vergelijking 3). Aan de hand van een significantieniveau van vijf procent, wordt dan gekeken welke parameters een significante invloed uitoefenen. De significante parameters per doelfunctie met hun bijhorende standaard coëfficiënten en p-waarden kan men vinden in bijlage 2. Ook de (aangepaste) R^2 -waarden worden vermeld om de verklarende kracht van de functie weer te geven.

$$\text{Relatief verschil} = \beta_1 \cdot P_{dev} + \beta_2 \cdot pRt + \beta_3 \cdot R_{dev} + \beta_4 \cdot pDd + \beta_5 \cdot Dd$$

$$\text{Standaardafwijking} = \beta_1 \cdot P_{dev} + \beta_2 \cdot pRt + \beta_3 \cdot R_{dev} + \beta_4 \cdot pDd + \beta_5 \cdot Dd$$

Vergelijking 3: Onderzoek 1 – Lineaire regressies

3.8 Resultaten

Alle lineaire regressies, behalve de lineaire regressie met het relatieve verschil voor mean tardiness als afhankelijke, hebben hoge **aangepaste R^2 waarden**, namelijk steeds groter dan 0,90. Dit toont aan dat de vooropgestelde functie een grote verklarende kracht heeft. Aangezien de lineaire regressie van het relatieve verschil voor mean tardiness niet voldoende verklarende kracht heeft en dus onbetrouwbare resultaten weergeeft, zal deze regressie niet besproken worden. De resultaten van de regressies en visualisaties van de statistische verbanden kunnen teruggevonden worden in bijlage 2, 3 en 4.

3.8.1 Maximum lateness

Het **relatieve verschil** van de maximum lateness ondervindt impact van zowel de variatie in de release times, de kans op wijzigingen in de due dates en de variatie in de due dates. Al deze variabelen leiden tot een grotere waarde voor het relatieve verschil hetgeen weerspiegelt dat variabiliteit in Rt en Dd er gemiddeld genomen voor zorgt dat de werkelijke maximum lateness onderschat wordt. Men kan hieruit afleiden dat de ML-waarde verkregen bij het opstellen van het productieplan als een minimum waarde kan beschouwd worden.

De **standaardafwijking** wordt enkel door de variabiliteit in release times en due dates significant bepaald en opnieuw hebben deze variabelen een positieve invloed. Een

verandering in R_t en D_d zal dus weerspiegeld worden in de doelfunctie waardoor deze grotere schommelingen zal vertonen.

Voor zowel het relatieve verschil als de standaardafwijking wordt de **variabiliteit in de due dates** als belangrijkste variabele aangeduid. Indien men wil verzekeren dat de maximum lateness-waarde van de planning behouden blijft, moet men zich dus vooral focussen op het behouden van de oorspronkelijke due dates en in mindere mate op de release times. Opmerkelijk is dat er minder aandacht moet geschonken worden aan de processing times, aangezien deze geen significante invloed hebben op het relatieve verschil en evenmin op de standaardafwijking..

3.8.2 Makespan

De variabiliteit in de release time, **R_{dev}** , wordt geclassificeerd als de variabele met de grootste impact op zowel het relatieve verschil als op de standaardafwijking van de makespan waarde. Net zoals bij de doelfunctie ML zal variabiliteit in de release times er gemiddeld genomen voor zorgen dat de werkelijke makespan onderschat wordt. De veranderingen in de release time hebben wel een negatief effect op de standaardafwijking. Dit houdt in dat, indien er meer veranderingen zijn in de release times, de veranderingen in de eindwaarde beperkter worden. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de effecten van de veranderingen elkaar kunnen afzwakken waardoor er geen extreme doelfunctiewaarde bekomen wordt. De andere significante variabelen zijn de variatie in de processing time en de kans op variatie in de release time.

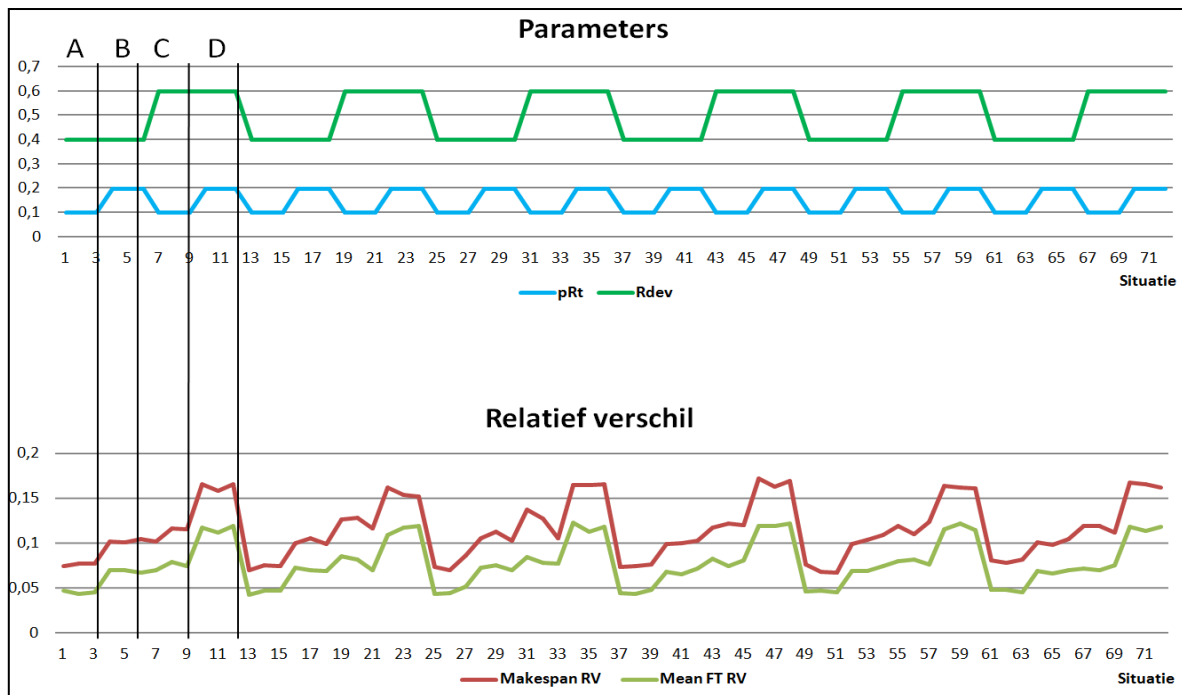
Opmerkelijk is dat de variabiliteit in processing time, **P_{dev}** , een **negatief effect** heeft op het relatieve verschil. Het negatieve effect duidt aan dat als deze variabele toeneemt, de afhankelijke in waarde zal dalen indien alle andere data ongewijzigd blijven. Met andere woorden, bij een hogere variabiliteit in de processing time zal gemiddeld genomen het relatieve verschil tussen de verwachte waarde en de werkelijke doelfunctiewaarde van de makespan afnemen. Men zal dus de werkelijke makespan correcter inschatten hoewel de werkelijke processing times sterk afwijken van de geplande processing times.

De lineaire regressie toonde ook dat de standaardcoëfficiënten voor de **pDd** van nul verschilt. De hypothese dat de kans op variabiliteit in de due dates geen invloed heeft op het relatieve verschil wordt dus weerlegd. Dit statistisch verband wordt echter niet opgenomen in de resultaten aangezien dit theoretisch niet mogelijk is. Er wordt een tweede lineaire regressie uitgevoerd in SPSS zonder pDd en Ddev (Bijlage 3). De verklaringskracht van deze regressie is 2 honderdsten kleiner dan de vorige regressie en bevat andere standaardcoëfficiënten voor Pdev, Rdev en pRt. De relatieve grootte van de impact en het teken ervan blijven echter wel dezelfde.

3.8.3 Mean flow time

De resultaten voor de mean flow time zijn gelijklopend aan de resultaten voor de **makespan** en dit kan men ook waarnemen (Figuur 9). Alweer hebben de veranderingen in de release times de grootste impact op beide afhankelijk en schommelen de standaardcoëfficiënten rond dezelfde waarden als genoteerd bij de makespan. Ook voor de andere onafhankelijke variabelen blijken de standaardcoëfficiënten ongeveer dezelfde als degene opgemeten bij de makespan.

Er wordt ook weer een **impact van pDd** op het relatieve verschil gemeten, maar dit statistisch verband wordt wederom genegeerd. Net zoals bij makespan wordt er hier een tweede lineaire regressie uitgevoerd zonder pDd en Ddev, waarbij gelijklopende resultaten bekomen worden. Het enige verschil is dat de variabiliteit in de processing time nu geen invloed heeft op de standaardafwijking van mean flow time. Deze regressie heeft echter weerom een kleinere verklaringskracht (Bijlage 3).



Figuur 9: Effect van pRt en Rdev op het relatief verschil van M en MFT

Wanneer men de gevonden statistische verbanden voor het relatieve verschil van de mean flow time en de makespan visualiseert (Figuur 9), wordt hier ook de **similariteit in het verloop van M en MFT** duidelijk weergegeven. Er wordt enkel de link gelegd met het verloop van pRt en Rdev over de 72 verschillende situaties, aangezien dit de meest significante variabelen zijn. Een **terugkerend patroon** kan opgemerkt worden, dat bovendien in 4 fasen ingedeeld kan worden. Dit wordt weergegeven voor de eerste cyclus, namelijk A,B,C en D. De positieve invloed van pRt en Rdev wordt hierdoor duidelijk zichtbaar. In A heeft zowel pRt als Rdev de laagste waarde waardoor in deze fase het relatieve verschil voor de mean flow time ook de kleinste waarde aanneemt. In D heeft zowel pRt als Rdev de grootst mogelijke waarde en leidt dit tot de grootste waarde voor het relatieve verschil. In B heeft pRt een hogere waarde aangenomen dan in A waardoor het relatieve verschil ook toeneemt. In C heeft Rdev dan weer een hogere waarde dan in A en doordat deze variabele een iets grotere impact heeft dan pRt, liggen de waarden voor het relatieve verschil in deze fase hoger dan in fase B. De schommelingen die zich dan nog eens per fase afspelen, zijn afhankelijk van Pdev maar deze variabiliteit heeft duidelijk een kleinere impact dan degene in de release times.

3.8.4 Mean tardiness

Op basis van de regressie blijkt dat de kans op variatie in de release en de variabiliteit in de release times een invloed uitoefenen op de **standaardafwijking** van mean tardiness. Hierbij heeft de variabiliteit in de release times de grootste impact, die positief is. Grotere veranderingen in de release times worden hier dus ook weerspiegeld in de eindwaarde en zullen dus tot meer variabiliteit in de doelfunctie leiden. De kans op variatie in release times heeft dan weer een kleiner, maar negatief effect. Indien men deze twee samenneemt kan men opmerken dat als er meer kans is dat de release time verandert, de standaardafwijking van mean tardiness kleiner zal worden doordat de veranderingen elkaar tegenwerken. Echter, indien die veranderingen in de release times in grootte toenemen dan zal dit effect volledig verdwijnen en zal de doelfunctie toch grote schommelingen vertonen.

3.8.5 Proportion of tardy jobs

Het **relatieve verschil** voor de proportion of tardy jobs blijkt afhankelijk te zijn van pRt, Rdev, pDd en Ddev, waarbij de variabiliteit in release times de grootste invloed heeft. Zowel de kans op veranderingen als de grootte van de veranderingen in de release times, blijken een positief effect te hebben op het gemiddelde relatieve verschil ten overstaan van pDd en Ddev, die een negatief effect hebben. Hoe groter de kans op wijzigingen in due dates en hoe groter de variabiliteit in de werkelijke due dates, hoe lager het gemiddelde aantal aan laattijdige jobs zal zijn ten overstaan van het aantal aangenomen in de originele planning. Men kan dus concluderen dat wijzigingen in due dates ervoor zorgen dat er gemiddeld genomen minder laattijdige jobs zullen zijn dan verwacht. Veranderingen in de release times zullen dan weer het aantal laattijdige jobs doen toenemen. Het effect van de release times kan echter zwaarder doorwegen aangezien de gerelateerde variabelen grotere standaardcoëfficiënten bezitten (Bijlage 2).

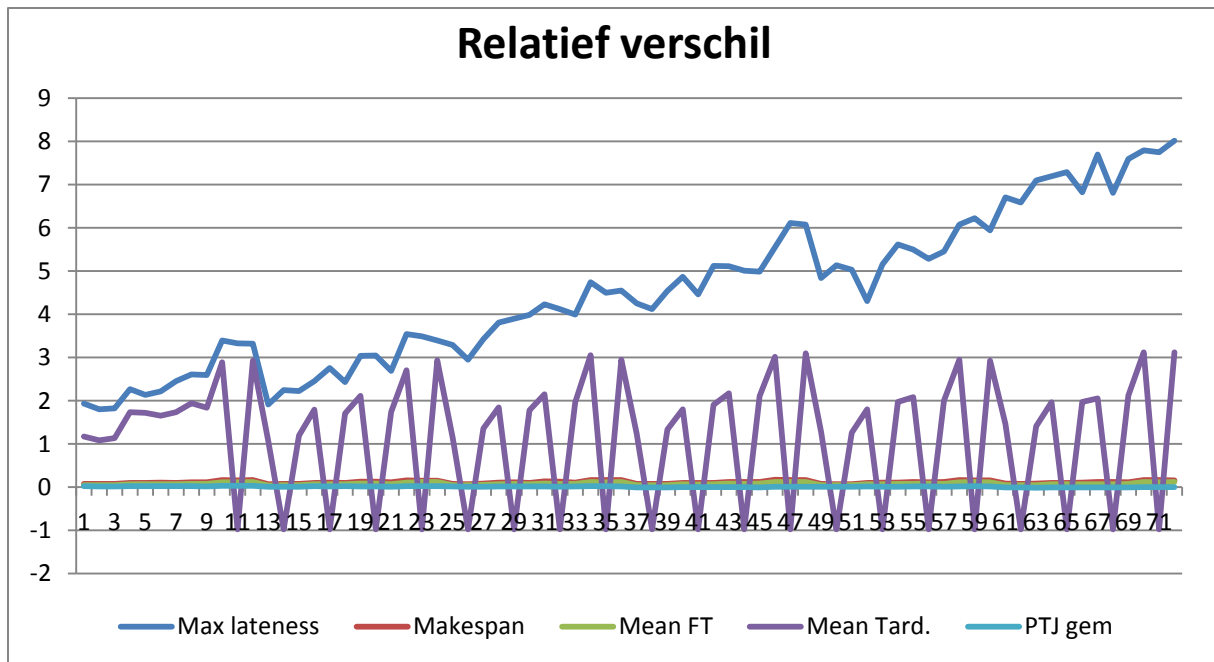
De **standaardafwijking** voor proportion of tardy jobs wordt positief beïnvloed door de volgende vier variabelen: Pdev, Rdev, pDd en Ddev. Hetgeen aanduidt dat bijna alle variabelen ervoor zorgen dat deze doelfunctie grotere schommelingen zal ondergaan. Het grote verschil met de vorige resultaten is dat de belangrijkste variabele nu de kans op veranderingen in due dates is en niet een variabele horende bij de release times.

3.8.6 Vergelijking tussen de verschillende doelfuncties

Op het vlak van de **relatieve verschillen**, blijkt zowel de makespan als de mean flow time waarden aan te nemen die variëren binnen een beperkt interval, namelijk $[0 ; 0,2]$ (Figuur 10). Dit toont aan dat de variabiliteit steeds geleid heeft tot ofwel een correcte schatting ofwel een onderschatting van de werkelijke waarde. Voor de proportion of tardy jobs is het interval het kleinst, namelijk $[-0,05 ; 0,05]$. Uit dit interval kan men afleiden dat, ondanks de aanwezigheid van variabiliteit, men deze waarde toch relatief goed heeft ingeschat. Het interval duidt ook aan dat het mogelijk is dat de werkelijke waarde overschat wordt.

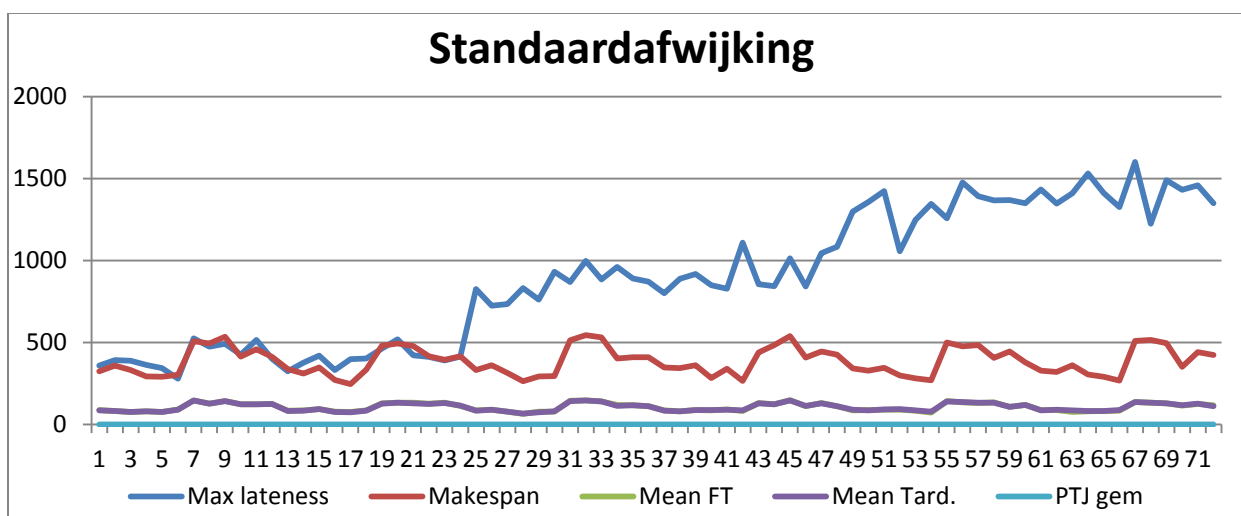
Voor de **mean tardiness** is het interval waarin het relatieve verschil waarden aanneemt veel groter dan bij de andere doelfuncties en de schommelingen zijn extremer (Figuur 10). Er wordt wel vastgesteld dat er een zeker patroon schuilt in het verloop van het relatieve verschil van de mean tardiness, hoewel dit patroon zich pas stelt vanaf het tiende scenario. Door de grote schommelingen die zich telkens voor 3 opeenvolgende scenario's voordoen, kan men afleiden dat vooral de processing time een grote invloed heeft, maar het effect ervan niet lineair is. Men ziet namelijk dat indien P_{dev} de waarden aanneemt van 20 en 60 procent er een positieve waarde bekomen wordt, maar bij 40 procent een negatieve waarde. Dit niet-lineaire effect en het feit dat het patroon maar vanaf scenario 10 begint, verklaart waarom SPSS niet in staat was om een lineaire regressie op te stellen met een voldoende grote verklaringswaarde.

De **maximum lateness** heeft dan weer minder grote schommelingen dan de mean tardiness doelfunctie, maar vertoont wel een stijgende lijn over alle 72 scenario's. Het relatieve verschil van de maximum lateness noteert ook de grootste gemiddelde waarde. Verder is ook de minimum gemiddelde waarde voor de maximum lateness een positief getal. Hieruit volgt dat deze doelfunctie de werkelijke uitkomst gemiddeld genomen in alle scenario's onderschatte. De onderschatting door de aanwezigheid van variabiliteit is zelfs zo extreem dat de werkelijke waarde voor de maximum lateness tot 9 keer de grootte van de geschatte waarde kan aannemen.



Figuur 10: Overzicht relatief verschil van alle doelfuncties voor alle situaties

Voor alle doelfuncties kan men opmerken dat de aanwezigheid van variabiliteit tot variabiliteit in de doelfuncties leidt. Reeds uit de statistische resultaten kon men afleiden dat deze impact anders is voor elke doelfunctie. De **standaardafwijkingen** vertonen een cyclisch patroon binnen een beperkt interval voor alle doelfuncties, behalve voor de maximum lateness (Figuur 11). Bij maximum lateness wordt weer een stijgende trend waargenomen, hetgeen verklaard kan worden door de toenemende waarde van Ddev. Het interval waarin de standaardafwijking van de maximum lateness zich bevindt is weerom de grootste, namelijk [200;1600]. Het op één na grootste interval behoort bij de standaardafwijking van de makespan, het kleinste interval bij de proportion of tardy jobs, namelijk [0,010 ; 0,025].



Figuur 11: Overzicht standaardafwijking van alle doelfuncties voor alle situaties

3.8.7 Vergelijking tussen de verschillende variabelen

Alle parameters, behalve de variabiliteit in de release times, hebben zowel positieve als negatieve effecten op de afhankelijken. Uit regressies met een hoge verklaringskracht blijkt dat de variabiliteit in de release time, **Rdev**, een impact heeft op alle doelfuncties en telkens als gevolg heeft dat de werkelijke waarde onderschat wordt. Bij zes van de negen regressies blijkt de variabiliteit in de release times zelfs de grootste impact te hebben. In de overige drie gevallen zijn de factoren gerelateerd aan de due dates de belangrijkste. Afhankelijk van welke doelfunctie men gebruikt, zal men zich op de variabiliteit in bepaalde verwerkingskenmerken moeten focussen.

3.9 Controleren van de hypothesen

1. Veranderingen in processing time en release time leiden tot veranderingen in alle vijf de doelfuncties.

Studie: De significante standaardcoëfficiënten, verkregen via de lineaire regressies, tonen aan dat de veranderingen in de release times een effect hebben op de doelfuncties. Het effect van de variabiliteit hangt wel af van de doelfunctie. Voor de processing time kan deze hypothese niet gestaafd worden.

2. Veranderingen in due dates leiden tot veranderingen in de drie due date gebaseerde doelfuncties.

Studie: Uit de lineaire regressies blijkt dat veranderingen in due dates een impact hebben op zowel de maximum lateness als de proportion of tardy jobs. Het effect op de doelfunctie mean tardiness kan niet worden aangetoond doordat de regressieresultaten onbetrouwbaar zijn.

3. Hoe groter de veranderingen in de drie verwerkingskenmerken, hoe groter de wijzigingen in de doelfunctiewaarden, met andere woorden, hoe groter de toegevoegde variabiliteit, hoe groter de standaardafwijkingen van de doelfuncties.

Studie: Uit de resultaten van de lineaire regressies voor de standaardafwijkingen wordt afgeleid dat deze hypothese bevestigd wordt voor alle drie de parameters, namelijk Pdev, Rdev en Ddev.

Opmerkelijk is dat pRt , de kans op verandering in de release times, een omgekeerd effect heeft voor de volgende doelfuncties: makespan, mean flow time en mean tardiness. Dit houdt in dat hoe hoger het percentage jobs die kunnen veranderen, hoe beperkter de variabiliteit is in de doelfuncties. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat indien er meer jobs met een veranderende Rt zijn, er ook dus meer kans is dat jobs zowel verlaten als vervroegen. Als het aantal toeneemt, zal het effect van één verandering minder doorwegen op de totale variabiliteit. Het effect kan namelijk sneller afgezwakt worden doordat de verandering van een release time van een andere job een tegenovergesteld effect kan veroorzaken. Door zowel meer kans op vervroegingen als verlatingen in release times, zal de ruimte, waarin de eindwaarde varieert, beperkt worden. Het resultaat is dat men een kleinere standaardafwijking verkrijgt. Echter, er moet aan herinnerd worden dat dit effect minder doorweegt dan het effect van de toenemende variabiliteit in de release times.

4. De veranderingen in de release times, due dates en processing times zullen een evenredige en gelijkwaardige impact hebben op de doelfuncties.

Studie: Deze hypothese wordt niet ondersteund door de statistische resultaten. In het overgrote deel van de lineaire regressies, heeft $Rdev$ een grotere impact dan $Pdev$ en $Ddev$. Echter, uit de resultaten blijkt dat voor het relatieve verschil en de standaardafwijking van de maximum lateness de variabiliteit in de due dates het effect van $Rdev$ overtreft. Voor de standaardafwijking van de doelfunctie proportion of tardy jobs, wordt $Rdev$ ook overtroffen door pDd . Veranderingen in de processing time hebben indien er een significant statistisch verband is, altijd de kleinste impact op de doelfuncties.

5. De onderschatting van de van processing time en de verlating van de release time zullen een grotere impact hebben op de doelfuncties dan respectievelijk de overschatting en de vervroeging ervan.

Studie: Deze hypothese wordt enkel bevestigd voor de release time. De variabiliteit in Rt leidt steeds tot een groter relatief verschil doordat het steeds een positieve standaardcoëfficiënt heeft. Aangezien de relatieve verschillen van de doelfunctiewaarden dus altijd groter zullen worden, lijkt de verlating van de release times een grotere impact te hebben. Bij processing times wordt er, indien

de invloed significant is, een negatieve standaardcoëfficiënt verkregen, hetgeen inhoudt dat dit deel van de hypothese niet kan bevestigd worden.

6. De doelfunctie, maximum lateness, zal anders presteren onder druk van variabiliteit dan de andere doelfuncties.

Studie: Uit de vergelijking van de verschillende doelfuncties blijkt dat de doelfunctie maximum lateness minder bestand is tegen variabiliteit dan de andere doelfuncties (Figuur 10 en 11). De andere doelfuncties schommelen binnen een beperkt interval ten overstaan van de stijgende trend die men kan opmerken bij maximum lateness. Uit dit resultaat kan men afleiden dat een planning opstellen met als streefdoel het optimaliseren van een bepaalde doelfunctie, er juist toe kan leiden dat men in werkelijkheid, onder invloed van variabiliteit, extremere afwijkingen zal bekomen ten overstaan van de optimale doelfunctiewaarde.

3.10 Algemene conclusie onderzoek 1

Hoewel de impact van veranderingen in de verwerkingskenmerken steeds een andere invloed heeft op de uiteindelijke waarde en de variabiliteit per doelfunctie, kunnen toch enige algemene conclusies getrokken worden. Allereerst kan men opmerken dat variabiliteit in de verwerkingskenmerken **altijd een impact** zal hebben op de eindwaarde van alle vijf bestudeerde doelfuncties.

Qua **verwerkingskenmerken**, blijkt dat een wijziging in release times een impact zal hebben op zowel due date gebaseerde doelfuncties als op niet due date gebaseerde. Een goede verstandhouding met leveranciers, net als een b-plan om veranderingen in de beschikbaarheid van middelen tegen te gaan, is dan ook aangewezen. Veranderingen in de due dates zullen dan weer een impact hebben op de due date gebaseerde doelfuncties. Echter afhankelijk van welke doelfunctie men gebruikt, zal de werkelijke doelfunctiewaarde dichter of verder van de geschatte waarde liggen wanneer er meer wijzigingen voorvallen. Veranderingen in de processing times blijken een positieve impact te hebben op de voorspellingskracht van de geschatte doelfunctiewaarde.

Uit de resultaten blijkt ook dat een planning opstellen met als streefdoel het **optimaliseren** van een bepaalde doelfunctie er juist toe kan leiden dat de waarde in werkelijkheid extremer zal afwijken van de geoptimaliseerde doelfunctiewaarde. De reeds gemaakte afspraken zullen dan ook onder druk komen te staan.

Het **correct voorspellen** van het relatieve verschil tussen de werkelijke en de vooropgestelde doelfunctiewaarde lijkt in minstens 90 procent van de gevallen mogelijk indien men beschikt over een gekende, constante en normaal verdeelde variabiliteit in de processing times, de release times en de due dates. Enkel voor de mean tardiness doelfunctie blijkt dit niet mogelijk te zijn.

Uit de analyses blijkt dat de gevolgen van veranderingen in de verwerkingskenmerken tot extreme verschillen kunnen leiden en de impact veel groter kan zijn dan de wijziging zelf. Hierdoor zou een bedrijf dan ook best opteren om de **evolutie in de productieplanning** continu op te volgen. De opvolging van de impact van een verandering doorheen het hele verloop van een productieplan is het doel van het tweede onderzoek. Er zal gebruik gemaakt worden van procescontrole aangezien bijhorende technieken geschikt zijn om een productieproces continu op te volgen en te controleren.

4 Procescontrole

Uit onderzoek 1 wordt duidelijk dat variabiliteit de prestatie van het productieplan, weergegeven aan de hand van de doelfuncties, sterk kan beïnvloeden. Het wordt dan ook aangeraden om de variabiliteit zo veel mogelijk op te volgen en te controleren. De reeds bestaande methoden die aangehaald worden in onderzoek 1, zoals herplannen en robuust plannen kunnen hiervoor aangewend worden. Echter, beide methoden hebben hun nadelen. Er wordt in deze thesis dan ook voor een andere aanpak gekozen. In dit tweede deel wordt er getracht een **procescontrole** uit te werken die verder bouwt op de resultaten van onderzoek 1. Er zal enkel gebruik gemaakt worden van veranderingen in **release times** omdat uit onderzoek 1 blijkt dat R_t een beduidende impact hebben op alle doelfuncties. De procescontrole zou in staat moeten zijn om de prestatie van het productieplan continu op te volgen en weer te geven hoe de variabiliteit zich van het begin tot het einde van het productieproces manifesteert.

In **dit tweede deel** zal men eerst een literatuurstudie terugvinden betreffende procescontrole. Deze studie handelt over procescontrole zelf en hoe dit een middel kan zijn om variabiliteit in kaart te brengen. Er wordt vervolgens dieper ingegaan op het belang van control charts in procescontrole en hoe deze charts gebruikt worden bij de verschillende fasen in de procescontrole.

4.1 Het doel

Procescontrole kan gedefinieerd worden als het toepassen van een geheel van technieken om de uitvoering van het **productieproces te beheren** en op een continue wijze te verbeteren. De controletechnieken zullen helpen bij het analyseren van informatie betreffende het verloop van het productieproces en op deze manier een inzicht geven in hoe het productieproces optimaal kan bijgestuurd worden. Het doel van procescontrole is verzekeren dat de productie volledig volgens plan uitgevoerd wordt door het proces continu op te volgen en te evalueren. Op deze manier beoogt procescontrole de variabiliteit van het proces te beheren. Hoewel het niet altijd doenbaar en/of wenselijk is om variabiliteit volledig te elimineren, zal procescontrole trachten om het zo veel mogelijk te reduceren. Voor de opvolging van het proces zijn er bepaalde prestatieparameters nodig. Deze waarden zullen in elk productieproces specifiek geselecteerd worden omdat ze in staat moeten zijn de prestatie van het specifieke productieproces aan te geven.

4.2 Algemene begrippen

Statistische procescontrole (SPC) is een specifiek soort van procescontrole waarbij men gebruik maakt van statistische methoden. Statistiek wordt zowel descriptief gebruikt om data te analyseren als predicatief om de werking van het productieproces te voorspellen. Ook indien er corrigerende maatregelen nodig zijn, zal de statistiek ervoor zorgen dat men beter in staat is om een geïnformeerde beslissing te nemen. In het domein van SPC wordt er ook een onderscheid gemaakt tussen de statistische en de dynamische aanpak. Bij dynamische SPC wordt er niet alleen gebruik gemaakt van historische data, maar zal men ook informatie, die men in de tussentijd verworven heeft, in beschouwing nemen. In deze thesis wordt er echter gefocust op statische SPC en gebruikt men enkel historische data om eenmalig controlewaarden op te stellen die niet meer zullen veranderen.

Er moet wel opgemerkt worden dat men SPC niet kan gelijkstellen aan **statistische kwaliteitscontrole**. SPC is een statistische techniek die men kan gebruiken om aan statistische kwaliteitscontrole te doen, waarbij men focust op het vinden van kwaliteitsfouten en het meten en verbeteren van kwaliteit. Zo kan men nagaan of het product de benodigde kwaliteit heeft door te verifiëren of het aan een specifieke vereiste voldoet, zoals bijvoorbeeld lengte en gewicht. SPC kan hierbij gebruikt worden om deze productkenmerken op te volgen. Echter, in deze thesis ligt de focus op het achterhalen van operationele fouten. Dit soort fouten heeft geen effect op de kwaliteit (Thompson & Koronacki, 1993). Er zullen dan ook geen productkenmerken gerelateerd aan kwaliteit onderzocht worden, maar enkel data gerelateerd aan de proceskenmerken, zoals de waarde die een bepaalde doelfunctie aanneemt. Een mogelijke operationele fout is het gebrek aan materiaal aangezien dit een effect zal hebben op de waarde die de doelfunctie aanneemt.

Statistische procescontrole probeert voornamelijk **twee factoren** na te gaan. Namelijk, of het proces stabiel is en of het proces capabel is om de taken uit te voeren zoals men verwacht. Het eerste wordt vooral bekeken vanuit een operationele hoek waarbij de consistentie van het proces nagegaan wordt. Het tweede wordt eerder vanuit een managementhoek geëvalueerd. Volgens (Levinson, 2010) moet het proces om zowel stabiel als capabel bevonden te worden, voldoen aan twee kenmerken, respectievelijk, relatieve variabiliteit en accuraatheid.

4.3 Aanwezigheid van variabiliteit

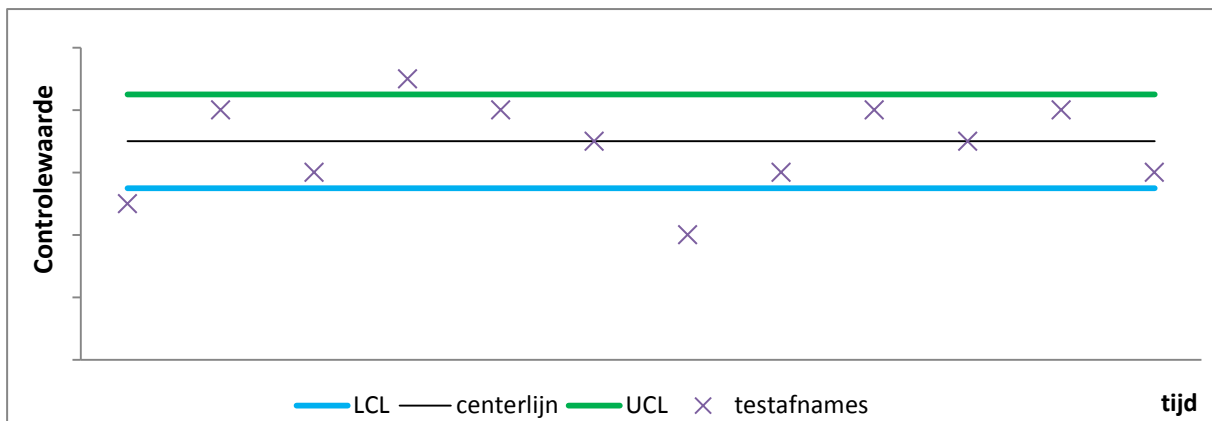
Net als in het vakgebied van productieplanning, wordt bij procescontrole het belang van variabiliteit erkend en het feit dat variabiliteit onvermijdelijk is in elk proces (Thompson & Koronacki, 1993). Bijgevolg wordt in papers omtrent procescontrole veel nadruk gelegd op het begrijpen van de soort en oorzaak van variabiliteit, zoals in (Jiju & Tolga, 2003). Algemeen wordt variabiliteit in twee groepen ingedeeld, namelijk de **common causes variabiliteit** en de special causes variabiliteit.

De eerste groep betreft variabiliteit veroorzaakt door factoren die inherent zijn aan het proces. In deze situatie is er dus variabiliteit aanwezig, maar is men toch in staat om de toekomst te voorspellen met een bepaalde zekerheid. De tweede groep, **special causes variabiliteit**, betreft variabiliteit gerelateerd aan oorzaken die niet inherent zijn aan het productieproces en leiden tot een onvoorspelbare toekomst. Special causes variabiliteit zal namelijk het patroon, gedefinieerd door variabiliteit van de common causes, verstoren. De oorzaken van special causes variabiliteit worden ook “**Pareto glitches**” genoemd (Thompson & Koronacki, 1993), vermoedelijk naar aanleiding van een befaamde quote van Pareto, die stelt *In a system, a relatively few failure reasons are responsible for the catastrophically many failures.*

Net zoals er in het deel van productieplanning afgeraden wordt om op alle variabiliteit te reageren en zo nervousness te creëren, wordt er bij procescontrole afgeraden om te proberen de eerste soort van variabiliteit te elimineren. Indien men dit wel zou proberen, bekomt men **tampering of overadjustment**. Dit zal een tegengesteld effect hebben en juist leiden tot een grotere mate van variabiliteit in het productieproces (Levinson, 2010). Er wordt dan ook aangeraden om zich eerst te focussen op de special causes variabiliteit, aangezien deze volledig kan weggewerkt worden ten overstaan van de variabiliteit veroorzaakt door common causes, die enkel stelselmatig gereduceerd kan worden.

4.4 Control chart

Een control chart, allereerst opgesteld door Shewhart in 1924, is een belangrijk instrument voor statistische procescontrole en wordt gebruikt bij SPC om het proces te analyseren. Het specificeert voor elk bestudeerd kenmerk een centerlijn en twee limietlijnen, de **Upper Control Limit(UCL)** en de **Lower Control Limit(LCL)**. Historische data kunnen op de chart worden uitgezet en hierop kan men zich dan baseren om het verloop van het productieproces te analyseren (Figuur 12).



Figuur 12: Voorbeeld van een control chart

4.4.1 Control charts varianten

Er bestaan verschillende varianten van control charts (Haridy & Wu, 2009). Een eerste indeling wordt gemaakt aan de hand van hoeveel kenmerken er zullen worden opgevolgd. Indien dit maar één kenmerk is dan spreekt men van een univariate control chart. Indien er meerdere kenmerken gevolgd worden die gerelateerd zijn, dan maakt men gebruik van multivariate control charts.

Univariate control charts kan men aanwenden om een verscheidenheid aan factoren te laten opvolgen, zoals het gemiddelde of de variabiliteit. Indien men het gemiddelde van het productkenmerk over de verschillende testafnames wil controleren, gebruikt men een $\bar{X}$ -chart. Indien het niet mogelijk is om verschillende waarden te verzamelen in een testafname, dan zal men moeten werken met een individuele control chart in plaats van een $\bar{X}$ -chart. Deze individuele control chart is echter minder krachtig dan de $\bar{X}$ -chart.

Bij dynamische SPC zal men dan weer gebruik maken van een **CUMSUM-chart** (cumulative sum) in plaats van de $\bar{X}$ -chart. Het gebruik van de cumulatieve som van de testwaarden zou leiden tot een efficiëntere controle doordat het toestaat de tijd tussen de testafnames en het aantal observaties in één testafname te herbepalen. Een andere, vaak gebruikte control chart is de **EWMA-chart** die de exponentially weighted moving average van alle voorgaande testafname gemiddeldes zal opvolgen. Bij de EWMA-chart worden de testafnames in geometrisch afneembare volgorde gewogen, zodat de meest recente testafnames het zwaarste doorwegen en de eerste testafnames weinig bijdragen tot de bepaling van het gemiddelde. Er zijn nog andere control charts mogelijk voor het opvolgen van het gemiddelde, maar niet elke chart is even geschikt voor elk doeleinde. In (Ou, Wu, Tsung, 2012) worden de prestaties en het verschil in prestaties tussen de verschillende control charts beschreven.

Indien men inzicht wil krijgen in de variabiliteit kan men gebruik maken van de **R-chart**. Deze chart bestudeert het interval, ook wel de range genaamd, tussen de waarden bij de testafnames. Het interval wordt gelijk gesteld aan het verschil tussen de maximale en de minimale waarde. Er kan echter ook gebruik gemaakt worden van de **S-chart**, waarbij men aan de hand van de historische data de standaardafwijking berekent. Beide charts geven een inzicht in de variabiliteit. In het verleden werd er voornamelijk gebruik gemaakt van de R-chart, doordat het interval makkelijker te berekenen is. Echter, door de evolutie in technologie wordt nu ook de S-chart meer en meer aangewend. Men zou kunnen stellen dat de $\bar{X}$ -chart de variabiliteit tussen testafnames weergeeft, met andere woorden de variabiliteit van het proces over tijd, terwijl de R- of S-chart de variabiliteit binnen een enkele testafname voorstelt, met andere woorden de variabiliteit op een gegeven moment.

Indien het te bestuderen kenmerk geen continue variabele is, maar enkel twee waarden kan aannemen, dan spreekt men van een **attribuut**. Een voorbeeld hiervan is het controleren of de geobserveerde jobs hun due date gehaald hebben en dus ofwel op tijd ofwel te laat waren. Deze binaire variabele zal men bestuderen aan de hand van een **P-chart**. Ook de EWMA-chart wordt in sommige gevallen gebruikt om attributen te monitoren.

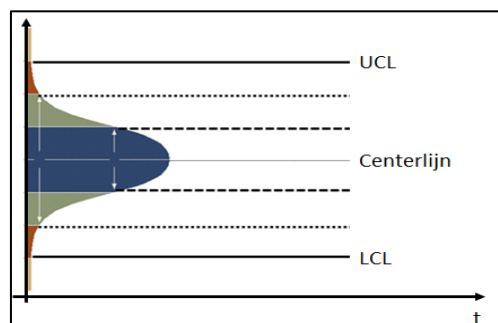
Qua **multivariate** control charts zijn er ook meerdere mogelijkheden, afhankelijk van wat men wil opvolgen. Eén bekend voorbeeld is de Hotellings'T control chart die de covariantie van de multivariate normale verdeling nagaat (Bersimis, Psarakis, Panaretos, 2007).

Naast deze univariate en multivariate control charts zijn er ook nog **speciale** control charts zoals een trend control chart. Deze gebruikt men indien er zich een trend vertoont in de data die niet veroorzaakt wordt door special causes variabiliteit.

4.4.2 Opstellen van control charts

Bij het opstellen van een control chart, zal men vooral eerst data verzamelen door middel van testafnames. De dataverzameling doet men op basis van wat Shewhart (1931) **rationele subgroepen** noemt. Rationele subgroepen worden zodanig gekozen dat de kans op verschillen tussen waarden behorende tot verschillende subgroepen maximaal is en de kans op verschillen voor waarden behorende tot dezelfde subgroep minimaal is. Zo is bij het opstellen van control charts voor productieprocessen het tijdstip waarop een order verwerkt wordt een logische rationele subgroep omdat het toelaat om special causes die plaatsvinden na verloop van tijd te detecteren.

Om de control chart op te stellen gaat men uit van de **centrale limietstelling**, die stelt dat “the average of infinite samples follow the normal distribution even if the underlying population is nonnormal”. Met andere woorden, indien er een oneindig aantal testafnames genomen zou worden, dan zouden de gemiddelde waarden over alle testafnames zich volgens een normale verdeling distribueren (Figuur 13), onafhankelijk van de eigenlijke verdeling van de observatiewaarden.



Figuur 13: Controlelimieten

Verder worden ook volgende **assumpties** gesteld: de observaties moeten onafhankelijk, normaal en identiek verdeeld zijn met een vast gemiddelde en standaardafwijking opdat het proces geen invloed zou ondervinden van special causes variabiliteit. Het is belangrijk dat er aan deze voorwaarden voldaan is aangezien anders de analyse gebaseerd op de bekomen chart onbetrouwbaar kan zijn. Als de benodigde gegevens aan de voorwaarden voldoen, kan men overgaan tot het bepalen van de limietlijnen.

De **gemiddelde waarde** en de variabiliteit van het proces zijn meestal onbekend waardoor men een schatting van deze parameters moet maken op basis van data verzameld uit de testafnames. De schatting zou gebaseerd moeten zijn op 20 tot 25 testafnames die elk 4 à 5 observaties bevatten. De schatting van de gemiddelde waarde vindt men dan door:

$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m}$ waarbij $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ de gemiddelden van de verschillende testafnames zijn en m het aantal testafnames voorstelt.

De schatting van de variabiliteit gebeurt meestal op basis van de **range methode**. De range van de testafname is het verschil tussen de kleinste en grootste observatie:

$R = x_{max} - x_{min}$. De gemiddelde range wordt vervolgens op analoge wijze bekomen: $\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m}$ waarbij $R_1, R_2, \dots, R_m$ de ranges van de verschillende testafnames zijn en m het aantal testafnames.

Indien men de variabiliteit wil weergeven op basis van de **standaardafwijking** dan zal men ook hier gebruik maken van de verzamelde data. Indien men m testafnames uitvoerde die telkens n observaties bevatten dan kan men het gemiddelde van de m standaardafwijkingen berekenen via: $\bar{s} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i$ waarbij s_i de standaardafwijking is van de i -de testafname.

Eens men deze waarden berekend heeft kan men de controlelimieten voor de control charts gaan opstellen.

De controlelimieten voor de $\bar{x}$ -chart (bij gebruik van R)

$$UCL = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$$

$$Center\ Line = \bar{\bar{x}}$$

$$LCL = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$$

De controlelimieten voor de $\bar{x}$ -chart (bij gebruik van s)

$$UCL = \bar{\bar{x}} + A_3 \bar{s}$$

$$Center\ Line = \bar{\bar{x}}$$

$$LCL = \bar{\bar{x}} - A_3 \bar{s}$$

De constanten A_2 en A_3 zijn afhankelijk van de grootte van de testafname en kunnen teruggevonden worden in de bijlage 5.

De controlelimieten voor de R-chart

$$UCL = D_4 \bar{R}$$

$$Center\ Line = \bar{R}$$

$$LCL = D_3 \bar{R}$$

De controlelimieten voor de s-chart

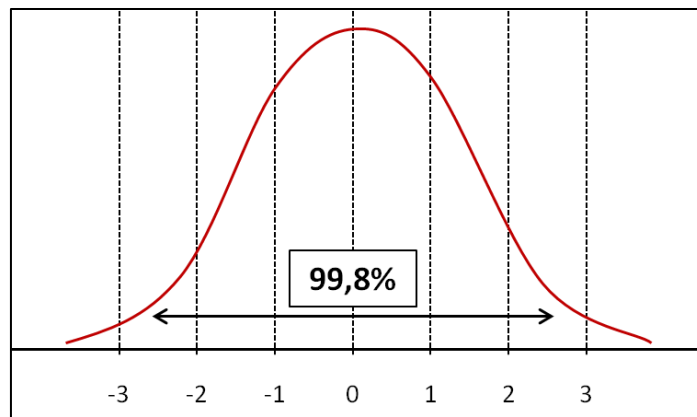
$$UCL = B_4 \bar{s}$$

$$Center\ Line = \bar{s}$$

$$LCL = B_3 \bar{s}$$

De constanten B_3 en B_4 net als D_3 en D_4 zijn afhankelijk van het aantal observaties per testafname en kunnen teruggevonden worden in bijlage 5.

Er bestaat ook een **alternatieve aanpak** voor het opstellen van de controlelimieten op basis van de standaardafwijking. Bij deze methode worden de limietlijnen vastgelegd op 3 standaardafwijkingen afstand van de centerlijn in plaats van gebruik te maken van de constanten B_3 en B_4 . Door het toepassen van de centrale limietstelling kan men ervan uitgaan dat 99,8 procent van alle mogelijke waarden van de normale verdeling zich binnen drie standaardafwijkingen van het gemiddelde zullen bevinden (Figuur 14).

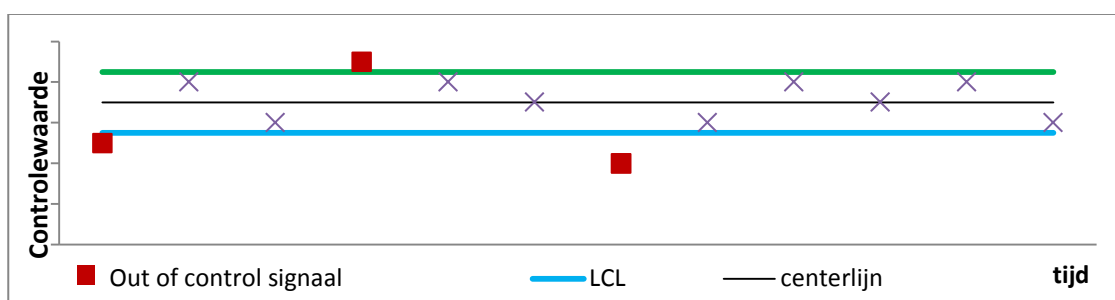


Figuur 14: Normale verdeling op basis van 3 sigma

Naast het gebruik van de controlelimieten wordt er soms ook gewerkt met **specificatielimieten**. De controlelimieten zijn gebaseerd op de natuurlijke variabiliteit in het proces en er wordt daarom soms ook naar gerefereerd als natuurlijke tolerantie limieten. De specificatielimieten, daarentegen, worden extern vastgelegd door het management. Er bestaat dan ook geen enkel mathematisch of statistisch verband tussen de controlelimieten en de specificatielimieten.

4.4.3 Gebruik van de control charts

Na het opstellen van de control charts kunnen de waarden op de chart uitgezet worden. Waar de waarden zich bevinden ten overstaan van de controlelimieten, zal bepalen of een proces **in control** of **out control** is. Indien een proces in control is, dan is het proces stabiel en ondervindt het enkel variabiliteit van common causes. Echter indien het proces out of control blijkt te zijn, dan wordt er gesteld dat er special cause variabiliteit aanwezig is, die leidt tot een verandering in ofwel de verwachte gemiddelde waarde ofwel de verwachte standaardafwijking (Jiju & Tolga, 2003). In (Evans, 2007) stelt men dat het out of control zijn van een proces zelfs kan leiden tot veranderingen in de vorm van de verdeling.



Figuur 15: Control chart: in control versus out of control

De **nulhypothese** van de control charts luidt dat indien de waarde van de testafname zich bevindt binnen de twee uiterste limieten, namelijk de UCL en LCL, dan is het proces nog steeds in control. Indien een waarde zich hier buiten bevindt, dan zal deze nulhypothese weerlegd worden en zal het proces out of control bevonden worden (Figuur 15). De control chart geeft dus aan of een proces statistisch gezien out of control bevonden wordt, maar zal geen verklaring geven over wat er juist veranderd is of wat de oorzaak zou zijn van deze verandering. Het onderzoek naar de oorzaak van deze verandering en de impact ervan is dan aangewezen, net als het uitvoeren van een out of control action plan (OCAP) [(Jiju & Tolga, 2003), (Levinson, 2010)]. Zowel het onderzoek naar de oorzaak van variabiliteit als het uitvoeren van de OCAP zijn essentieel voor het bekomen van een effectieve SPC implementatie (Montgomery, 2005).

Zoals reeds vermeld kan special cause variabiliteit leiden tot verscheidene veranderingen in de procesparameters. Zo is het mogelijk dat het gemiddelde ogenblikkelijk naar een nieuwe waarde verschuift en daar blijft, dit effect staat gekend als een **sustained shift**. Het effect kan echter ook van korte duur zijn en het gemiddelde zal dan relatief snel zijn oorspronkelijke in control waarde weer aannemen. Bij het toepassen van het gebruikelijke statistische hypothese test model zal vooral bij het optreden van een sustained shift een betrouwbaar resultaat bekomen worden.

4.4.4 Type I & II fout

Bij het gebruik van de control chart bestaat de mogelijkheid dat er een foutieve indicatie wordt gegeven. Een overzicht van deze fouten wordt weergegeven in tabel 2. Zo kan een proces volgens de control chart out of control zijn terwijl het in werkelijkheid niet zo is. Dit noemt men de **type I fout**. Het risico op zo'n vals alarm wordt gelijk gesteld aan het significantieniveau α waarmee men werkt (Colledani & Tolio, 2009). Dit vals alarm wordt veroorzaakt door het feit dat de controlelimieten opgesteld zijn om 99,8 procent van de waarden juist te classificeren, maar niet de volledige 100 procent.

Er is nog een mogelijke fout die men kan maken bij het gebruik van de control chart, namelijk de **type II fout**. Het kan dat men uit de control chart afleidt dat het proces in control is, hoewel dit in werkelijkheid niet het geval is. Zo zal de control chart een vals gevoel van veiligheid creëren. De kans op een type II fout wordt weergegeven door β .

Gerelateerd aan deze parameter β , is de power, gegeven door $1 - \beta$. De power van een statistische test kan omschreven worden als de waarschijnlijkheid van het verwerpen van de nulhypothese H_0 , gegeven dat een specifiek alternatief waar is (Walpole, Myers, Myers, Ye, 2007).

Bij het optreden van type I en II fouten speelt de **ligging van de controlelimieten** een beduidende rol. Wanneer de controlelimieten verder van de centerlijn liggen dan zal het risico op type I fouten afnemen, terwijl het risico op type II fouten zal toenemen. Dit verklaart mede waarom er in praktijk vaak wordt gewerkt met 3 sigma limieten voor het opstellen van de LCL en de UCL.

		Werkelijkheid	
		H_0 is waar	H_0 is niet waar
Beslissing	H_0 niet verwerpen	Juiste beslissing	Type II fout
		$1 - \alpha$ kans	β kans
	H_0 verwerpen	Type I fout	Juiste beslissing
		α kans	$1 - \beta$ kans

Tabel 2: Overzicht type I en type II fout

4.4.5 Sensitiviteitsregels voor control charts

Om te bepalen of een proces out of control is, kunnen meerdere criteria tegelijkertijd toegepast worden op een control chart. Het basis criterium om te stellen dat het proces out of control is, is wanneer één of meerdere punten zich buiten de controlelimieten bevinden. Om de sensitiviteit van de control chart te verhogen kunnen supplementaire criteria gebruikt worden. Op deze manier kan men sneller reageren op special cause variabiliteit. Enkele van de meest gebruikte **sensitiviteitsregels** zijn:

1. Eén of meerdere punten bevinden zich buiten de controlelimieten.
2. Twee of drie opeenvolgende punten bevinden zich buiten de twee sigma waarschuwinglimieten, maar nog steeds binnen de controlelimieten.
3. Vier of vijf opeenvolgende punten bevinden zich buiten de één sigma limieten.
4. Acht opeenvolgende punten bevinden zich aan dezelfde kant van de center lijn.

Wanneer er meerdere regels tegelijkertijd toegepast worden, maakt men vaak gebruik van een **rangschikking** in de out of control signalen. Zo zal men, bijvoorbeeld, wanneer de controlelimieten overschreden worden meteen op zoek gaan naar de oorzaak van de special cause variabiliteit. Echter, wanneer er twee opeenvolgende punten de waarschuwinglimieten overschrijden dan zal men meestal enkel de frequentie van testafnames verhogen (Montgomery, 2005).

Een **nadeel** van het gebruik van meerder sensitiviteitsregels, zoals bevestigd in onderzoek van Champ en Woodall (1987), is dat hierdoor veel sneller een vals alarm aangegeven wordt en dus het risico op type I fouten toeneemt.

Daarnaast kan men ook **visuele testen** toepassen op de control charts. Zo zal men bijvoorbeeld controleren of er geen afwijking van de verwachte gemiddelde waarde is door de control chart te controleren op een trendlijn. Indien de waarden van de testafnames een stijgende of dalende lijn zouden vertonen kan dit namelijk wijzen op mean drift en is verder onderzoek aangewezen. Behalve een trendlijn kan het vertonen van een cyclisch patroon ook een aanzet zijn tot verder onderzoek.

4.4.6 Richtlijnen bij het ontwerp van control charts

Bij het **ontwerpen van de control chart** moet men beslissen hoeveel observaties de testafnames moeten bevatten, hoe wijd de controlelimieten moeten liggen en hoe vaak men testafnames zal uitvoeren. Elk van deze beslissingen zal een impact hebben op de uiteindelijke samenstelling van de control chart. Er bestaan echter wel enkele richtlijnen die gevolgd kunnen worden bij het nemen van deze beslissingen.

Voor het bepalen van de **grootte van de testafname** is het vooral van belang of men grote of kleine procesveranderingen wil detecteren. Indien het volstaat om middelmatige tot grote veranderingen te achterhalen zal een testafname met 4 tot 6 observaties voldoende zijn. Indien men echter kleinere veranderingen wil bespeuren zal men 15 tot 25 observaties nodig hebben per testafname. Een alternatief voor het verhogen van het aantal observaties is het toepassen van (meerdere) sensitiviteitsregels, maar zoals reeds vermeld wordt deze praktijk eerder afgeraden. In deze situatie kan men zich beter wenden tot het gebruik van CUMSUM- of EWMA-charts. De grootte van de testafname kan ook een rol spelen wanneer er een afweging moet gemaakt worden tussen het gebruik van R- of s-charts. Zo zal de R-chart

relatief ongevoelig zijn voor veranderingen in de standaardafwijking wanneer men kleine testafnames gebruikt en bekomt men dan een beter resultaat met de s-chart. Voor grotere testafnames blijkt de R-chart effectiever te zijn, hoewel, wanneer de grootte van de testafname toeneemt tot meer dan 10 observaties het opnieuw aan te raden zal zijn om de s-chart te gebruiken.

Bij het bepalen van de grootte van de testafname en de **frequentie van testen** maakt men meestal een afweging tussen kleine en frequente testafnames ten overstaan van grote en minder frequente testafnames. Welke keuze optimaal is, zal afhangen van de situatie. Bijvoorbeeld, een systeem met een hoge productiesnelheid zal nood hebben aan relatief frequente testafnames. Om te bepalen hoe **wijd de controlelimieten** moeten liggen, maakt men in praktijk vaak gebruik van de drie sigma controlelimieten. Er zijn echter situaties waarin deze limieten niet optimaal zijn. Indien type I fouten duur zijn om te onderzoeken, dan kan men beter bredere controlelimieten gebruiken. Indien men daarentegen snel en makkelijk out of control signalen kan onderzoeken, dan zal het aan te raden zijn om nauwere controlelimieten te gebruiken.

4.4.7 Het effect van niet-normaliteit op de control charts

Het effect van afwijkingen van de normaliteitsvoorwaarde in de control charts is reeds door verscheidene auteurs onderzocht. Zo stelt Burr (1967) dat de gebruikelijke constanten die gebaseerd zijn op de normaliteitstheorie robuust zijn tegen de **normaliteitsassumptie** en dat ze steeds toegepast kunnen worden, tenzij de onderliggende verdeling extreem niet-normaal is. Schilling en Nelson (1976) onderzochten het effect eveneens en kwamen tot de vaststelling dat testafnames die 4 of 5 observaties bevatten voldoende robuust zijn voor het toepassen van de normaliteitsvoorwaarde. Hun onderzoek stelde verder ook vast dat R-charts veel gevoeliger zijn voor afwijkingen van de normale verdeling dan de $\bar{X}$ -chart.

4.5 Algemene aanpak

Er zijn **twee stappen** te onderscheiden als men in het vakgebied van SPC wil nagaan of special causes variabiliteit aanwezig is of niet, namelijk retrospectieve testen en testen van real-time samples. Na deze testen wordt er nagegaan of het proces wel capabel is. Echter, er zal op dit deel van SPC niet dieper ingegaan worden.

4.5.1 Retrospectieve testen

Het **doel** van retrospectieve testen is het samenstellen van test controlelimieten om te bepalen of het proces in control was tijdens de periode dat de data verzameld werd. Op deze manier kan men nagaan of er betrouwbare controlelimieten opgesteld kunnen worden om het proces in de toekomst op te volgen. Eerst zullen er data verzameld worden. Voor retrospectieve testen gebruikt men meestal 20 tot 25 subgroepen. Een volgende stap is het berekenen van de controlelimieten aan de hand van de besproken formules (supra, p. 53) en op basis van de data uit de subgroepen. Nadien zal men dan de gecollecteerde waarden weergeven in de control chart. Wanneer er zich waarden buiten de controlelimieten bevinden, zullen deze gedetecteerd worden en zal men de oorzaak van de special cause variabiliteit gaan onderzoeken. De oorzaak van de special cause zal aangeven hoe de variabiliteit gereduceerd kan worden en deze waarde zal vervolgens geëlimineerd worden uit de berekening van de controlelimieten.

In sommige gevallen zal het niet mogelijk zijn om een oorzaak te vinden en heeft men twee opties: de waarde elimineren uit de berekening of de waarde behouden. Als deze waarde werkelijk een out of control conditie voorstelt dan zullen de daarop gebaseerde controlelimieten te wijd zijn. Wanneer er echter maar één of twee extreme waarden gevonden worden zullen deze de control chart niet significant verstoren en kunnen de bekomen controlelimieten alsnog aanvaard worden voor verdere analyse. In het geval dat de waarden geëlimineerd zijn, al dan niet met verder onderzoek naar de onderliggende special cause, zullen nieuwe controlelimieten berekend moeten worden.

Deze werkwijze zal herhaald worden tot men uiteindelijk een dataset en daarop gebaseerde controlelimieten bekomt die overeenstemmen met een in control proces. In deze fase wil men vooral verzekeren dat men de **special cause variabiliteit** kan detecteren door middel van de opgestelde controlelimieten.

4.5.2 Testen van real-life samples

De nadruk in deze fase ligt op het **opvolgen van het proces**. Additionele testafnames worden verzameld en uitgezet op de control charts. In deze fase is het proces meestal redelijk stabiel. De special cause variabiliteit vertoont hier kleinere afwijkingen dan in de eerste fase doordat de oorzaken van grote special cause variabiliteit reeds geëlimineerd zijn. Door de kleinere variabiliteitsschommelingen zullen in deze fase Shewart control charts minder effectief zijn. Ook het toepassen van meerdere sensitiviteitsregels om kleiner afwijkingen sneller te detecteren valt af te raden. In de plaats daarvan is het aangewezen een beroep te doen op EWMA-control charts.

5 Onderzoek 2

5.1 Het doel

In het eerste onderzoek wordt nagegaan wat het effect is van variatie in de verschillende verwerkingskenmerken op de doelfuncties. Het eerste onderzoek wordt gebruikt om te begrijpen hoe de variabiliteit in de verwerkingskenmerken zich zal vertalen in de eindwaarde van de doelfuncties. In dit tweede onderzoek wordt er echter nog een stap verder gegaan. Er zal namelijk gecontroleerd worden of men in staat zou zijn om reeds **tijdens de uitvoering** van het productieplan het effect van de variabiliteit te meten en zodoende de prestatie van de planning continu op te volgen. Om dit verloop op te volgen wordt er gebruik gemaakt van procescontrole. Ook wordt er nagegaan of men reeds tijdens de uitvoering voorspellingen kan maken van de uiteindelijke eindwaarde. Aan de hand van dit onderzoek kan men analyseren of men in staat zou zijn om, indien nodig, op tijd in te grijpen en zo de kans te verhogen dat men alsnog de gewenste eindwaarde bekommt.

Op basis van de inzichten bekomen in de literatuurstudie omtrent procescontrole wordt er een **eigen procescontrole** opgesteld waarbij **variabiliteit geïntroduceerd wordt via de release times**. Verder zal het gebruik van de **doelfuncties als prestatieparameters** bij procescontrole geëvalueerd worden. Aan de hand van control charts zal er gecontroleerd worden of eventuele extreme veranderingen in de release times opgemerkt worden tijdens de uitvoering. Naast het opmerken van deze extreme veranderingen zal er ook gekeken worden welk effect ze hebben op de huidige doelfunctiewaarde en op de eindwaarde van de doelfunctie.

In onderzoek 2 wordt er eerst vermeld van welke basisdata men vertrekt om het onderzoek te realiseren. Vervolgens zal uitgelegd worden hoe de simulatietool is opgesteld en hoe de basisdata hierdoor verwerkt worden, waarna tevens de methode van analyse besproken wordt. Na de bespreking van de simulatie, worden er een aantal theoretische verwachtingen en bijhorende hypothesen gesteld, die vervolgens getoetst worden aan de bekomen resultaten. Onderzoek 2 sluit af met een algemene eindconclusie.

5.2 Basisdata

Aangezien het tweede onderzoek voortbouwt op onderzoek 1, wordt er opnieuw gebruik gemaakt van de **datasets** met een probleemgrootte van 100, die opgesteld waren in *A hybrid genetic algorithm for the single machine maximum lateness problem with release times and family set-ups* (Sels & Vanhoucke, 2012). De geselecteerde batches kunnen teruggevonden worden in Bijlage 6. Voor het uitvoeren van statistische procescontrole zullen volgende **doelfuncties** dienen als prestatieparameters: maximum lateness, makespan, mean flow time, mean tardiness en proportion of tardy jobs.

5.3 Simulatietool

De simulatietool ontwikkeld tijdens onderzoek 1 wordt **aangepast**. Het principe van de simulatietool zal wel behouden blijven. Het zal namelijk nog steeds de originele data inlezen, variabiliteit toevoegen en vervolgens de nieuwe data wegschrijven. Deze data worden dan gebruikt als input voor verdere analyse.

5.3.1 De variërende parameter

Uit onderzoek 1 blijkt dat een verandering in **Rt** een effect heeft op alle vijf de doelfuncties. Er wordt dan ook enkel nog variabiliteit aan deze parameter toegevoegd en de waarde voor Pt en Dd zal steeds gelijkgesteld worden aan de originele data.

5.3.2 Toevoegen van variabiliteit: pRt en Rdev

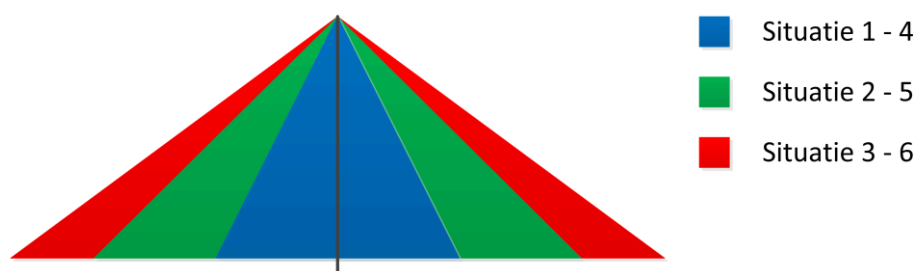
Variabiliteit wordt aangebracht in de basisdata door middel van het gebruik van twee variabelen, namelijk **pRt** en **Rdev**. De eerste variabele wordt gebruikt om de kans op een verandering in Rt vast te leggen en wordt gegenereerd volgens voorgaande methode (supra, p. 26). De tweede variabele weerspiegelt de grootte van de mogelijke afwijkingen in Rt. Indien een release time wijzigt, dan wordt de variabiliteit toegevoegd door de originele waarde te veranderen volgens een **triangulaire functie** waarbij het gemiddelde gelijkgesteld wordt aan de originele waarde. De verdeling heeft $(1 + Rdev) * \mu$ als maximum en $(1 - Rdev) * \mu$ als minimum. De exacte uitwerking is reeds beschreven in onderzoek 1 (supra, p. 26). Er wordt niet met een normale verdeling gewerkt aangezien het daarbij niet mogelijk is een begrensde interval te bepalen waarbinnen alle getallen horende bij de distributie zich zullen bevinden. Deze eigenschap kan tot problemen leiden bij het bepalen

van CV en AV (infra, p. 66). Naast het voordeel van een bepaalbaar gelimiteerd interval, kan de triangulaire verdeling gebruikt worden als een benadering van een normale verdeling. Hierdoor zal er bij de testafnames alsnog voldaan kunnen worden aan de voorwaarde dat de observaties normaal, onafhankelijk en identiek verdeeld moeten zijn. Alsook zullen alle observaties van R_t éénzelfde vast gemiddelde bezitten en dezelfde standaardafwijking. Bij de observaties van de doelfunctiewaarden wordt er opgemerkt dat deze niet altijd normaal verdeeld zijn. Er werd reeds aangegeven dat dit geen probleem zal geven aangezien de testafnames steeds 5 observaties omvatten en dus voldoende robuust zullen zijn voor het toepassen van de normaliteitsvoorwaarde (supra, p. 59).

De mogelijke waarden die pR_t en R_{dev} kunnen aannemen worden weergegeven in tabel 3 met een overzicht van de 6 verschillende **situaties**, bekomen door alle mogelijke waarde van R_{dev} en pR_t te combineren. De drie verschillende triangulaire verdelingen waaraan R_t zal worden onderworpen, worden gevisualiseerd in figuur 16.

pR_t	R_{dev}	Situatie
10	30	1
10	60	2
10	80	3
20	30	4
20	60	5
20	80	6

Tabel 3: Mogelijke waarden variabelen onderzoek 2 uitgedrukt in percentages



Figuur 16: Situaties onderzoek 2

5.4 Simulatie

Alle batches worden onderworpen aan alle verschillende **situaties**. Per situatie worden 100 verschillende uitvoeringen gesimuleerd met als doel een gebalanceerd resultaat te bekomen.

5.5 Verwerking van de nieuwe data en methode van analyse

De literatuur stelt dat de oorzaak van variabiliteit reeds onderzocht moet worden tijdens het uitvoeren van de **retrospectieve testen** (supra, p. 59) en vervolgens geëlimineerd moet worden om een stabiel proces te bekomen. Deze methode wordt in dit onderzoek echter niet gevolgd. Dit theoretisch onderzoek maakt het niet mogelijk om de redenen van variabiliteit te onderzoeken en vervolgens te elimineren. De variabiliteit zal dan ook geaccumuleerd worden naarmate men het proces doorloopt en een effect hebben op de procescontrole. Zo zal de geaccumuleerde variabiliteit leiden tot wijdere controlelimieten, die op hun beurt dan weer een effect hebben op de typefouten.

Aan de hand van de nieuwe data worden er **controlelimieten** berekend per situatie en batch. Per situatie worden de limieten niet alleen bepaald als alle jobs verwerkt zijn, maar ook indien 25, 50 en 75 procent van de jobs verwerkt zijn. Op deze manier kan de evolutie van de prestatieparameters opgevolgd worden. Om de UCL en LCL te berekenen, worden eerst per situatie alle data van de 100 simulaties ingelezen en worden vervolgens per simulatie voor alle 100 jobs de vijf doelfunctiewaarden berekend. Hieruit worden dan de waarden gefilterd die horen bij de 25^{ste}, 50^{ste}, 75^{ste} en de laatste job. Voor elke doelfunctie worden de gemiddelde waarde en de standaardafwijking berekend per 5 opeenvolgende simulaties. In werkelijkheid zou er eerder een individuele control chart gebruikt moeten worden maar aangezien deze minder krachtig is dan een $\bar{X}$ -chart (supra, p. 49) worden opeenvolgende simulaties samen gebruikt om een $\bar{X}$ -chart te kunnen opstellen. Er wordt geopteerd voor 5 observaties omdat dan aan de normaliteitsvoorwaarde voldaan is en dit aantal in staat zal zijn om middelgrote tot grote veranderingen op te merken (supra, p. 58). Over alle 100 simulaties wordt dan $\bar{\bar{x}}$ en $\bar{s}$ berekend op basis van de $\bar{x}$ en s van de 20 subgroepen.

Aan de hand van $\bar{\bar{x}}$ en $\bar{s}$ worden de controlelimieten berekend voor de $\bar{X}$ -chart waarbij A_3 de waarde 1,427 aanneemt, aangezien de grootte van de testafname 5 is (Bijlage 5). Eenmaal de limieten gekend zijn, wordt de afwijking van de doelfunctie ten overstaan van de verwachte waarde opgevolgd door het relatieve verschil te berekenen. Op deze manier kan de evolutie van de doelfunctiewaarde nagegaan worden.

$$\text{Relatief verschil}_{\text{doelfunctie}_i \text{ controlemoment}_j} = \frac{\text{waarde}_{i,j} - \text{originele waarde}_{i,j}}{\text{originele waarde}_{i,j}}$$

Vergelijking 4: Onderzoek 2 – Relatief verschil

Alsook wordt het **absolute en het relatieve verschil** berekend tussen de UCL en de LCL op de vier controlemomenten (Vergelijking 5). Om het moment van de controle weer te geven zal later de variabele Perc gebruikt worden, die het percentage aan afgewerkte jobs weerspiegelt. Aangezien op de verschillende controlemomenten de waarden voor de controlelimieten zullen toenemen is het belangrijk om zowel met het absolute als het relatieve verschil te werken. Op deze manier kan men de invloed van een variabele namelijk afwegen ten overstaan van de trend die de doelfunctiewaarde zelf doorloopt onafhankelijk van die variabele. Zo wordt er nagegaan of de invloed van een variabele wel genoeg doorweegt of niet. Als een variabele namelijk bij het absolute verschil wel een significante invloed heeft, maar bij het relatieve verschil niet, kan men daaruit besluiten dat de invloed van deze variabele eigenlijk ondergeschikt is aan de gewone evolutie van de doelfunctiewaarden in het productieproces.

$$\text{Relatief verschil}_{\text{doelfunctie}_i \text{ controlemoment}_j} = \frac{UCL_{i,j} - LCL_{i,j}}{UCL_{i,j}}$$

$$\text{Absoluut verschil}_{\text{doelfunctie}_i \text{ controlemoment}_j} = UCL_{i,j} - LCL_{i,j}$$

Vergelijking 5: Onderzoek 2 – Verschil tussen controlelimieten

Finaal worden de limieten ook gebruikt om de type I en type II fout te berekenen. Bij het berekenen van de **type I fout**, wordt er gekeken hoeveel van de 100 simulaties een doelfunctiewaarde bezitten die buiten de controlelimieten van die specifieke situatie ligt. Een type I fout wordt in dit onderzoek gedefinieerd als het aangeven van een out of control waarde, hoewel geen enkele Rt-waarde van alle reeds verwerkte jobs een waarde buiten het aanvaardbare interval vertoont. Hierbij wordt het aanvaardbare interval gegeven door het interval van de triangulaire verdeling bepaald door Rdev. Er wordt rekening gehouden met

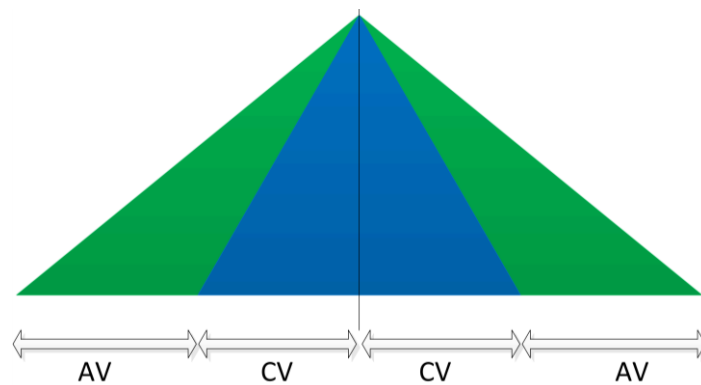
alle reeds verwerkte jobs aangezien het aantal jobs afhankelijk is van het moment waarop de doelfunctiewaarde berekend wordt. Standaard wordt de kans α op een type I fout gelijkgesteld aan het significantieniveau, i.e. 5 procent in dit onderzoek. Er zal dan ook nagegaan worden of de kans op een type I fout deze waarde benadert.

Bij het berekenen van de type I fout, wordt er gebruik gemaakt van de limieten eigen aan de situatie. Dit is niet het geval bij de berekening van de **type II fout**. Bij een type II fout wordt de extreme waarde niet opgemerkt, hoewel ze er wel is. Om dit weer te geven worden de UCL en LCL van situaties met een kleinere Rdev, maar met dezelfde pRt gebruikt (Tabel 4).

Limieten	Data	CV	AV
Sit. 1	Sit. 2	0,30	0,30
Sit. 1	Sit. 3	0,30	0,50
Sit. 4	Sit. 5	0,30	0,30
Sit. 4	Sit. 6	0,30	0,50
Sit. 2	Sit. 3	0,60	0,20
Sit. 5	Sit. 4	0,60	0,20

Tabel 4: Overzicht CV en AV

Deze methode zorgt ervoor dat de common cause en assignable cause **variabiliteit** duidelijk worden. De common cause variabiliteit (CV) kan namelijk gelijk gesteld worden aan de Rdev van de situatie waarop men de limieten berekend heeft en die dan gebruikt worden als controle. Deze waarde weerspiegelt dus de normale variabiliteit in Rt. De assignable cause variabiliteit (AV) wordt veroorzaakt door special causes die zouden moeten leiden tot out of control signalen en kan berekend worden door het verschil te nemen tussen de twee Rdev – waarden horende bij de twee situaties. Deze variabiliteit komt dus zowaar bovenop de variabiliteit die reeds toegestaan wordt door de gebruikte limieten (Figuur 17).



Figuur 17: Voorstelling relatie CV – AV en overzicht per situatie

Voor het bepalen van de type II fout wordt er eerst nagegaan hoeveel van de 100 simulaties er jobs bevatten met een R_t groter dan het aanvaardbare interval gecreëerd door CV, aangezien niet alle simulaties zo'n jobs vanzelfsprekend bevatten. Bij de toepassing van de limieten met 0,30 als CV moeten er gemiddeld vijf simulaties **geschrap**t worden. Deze simulaties komen niet in aanmerking voor de bepaling van de type II fout aangezien ze geen aanleiding geven tot extreme variabiliteit. Bij de toepassing van de limieten met 0,60 als CV op situaties met een Rdev-waarde 0,80 moeten er gemiddeld 48 simulaties geschrap't worden voor dezelfde reden.

Bij alle overgebleven simulaties wordt er gecontroleerd per doelfunctie of de extreme waarde resulteert in een out of control signaal. Het is vooral van belang dat de extreme waarde opgemerkt wordt en het niet altijd dezelfde job is die de extreme waarde veroorzaakt. Om die reden wordt er enkel gemeten of er minstens één out of control signaal gegeven wordt tijdens de vier controlemomenten. Op deze manier wordt de power van de doelfunctie bepaald. De **power** toont dus hoeveel simulaties met een extreme waarden er echt opgemerkt worden door het statistische controleproces. Hoe hoger de power, hoe nauwkeuriger de werking van het controlesysteem. Hieraan gerelateerd vindt men dan de kans op het optreden van een type II fout.

Vervolgens wordt er bij alle geschrapte simulaties gecontroleerd of deze geen foutieve melding geven van out of control. De benaming **valse meldingen** wordt gebruikt om te refereren naar deze controle. De kans op een valse melding staat gelijk aan het percentage van gewone variabiliteit dat toch opgemerkt wordt als extreme variabiliteit. Deze kans kan dus gelijkgesteld worden aan de kans op een type I fout bij het toepassen van de controlelimieten van situaties met een kleine Rdev op situaties met een grote Rdev. Zo kan men mede op basis van deze controle nagaan of de doelfunctie effectief meer extreme waarden signaleert of enkel algemeen meer out of control signalen geeft. Indien de procescontrole over zowel een hoge power als een hoog aantal valse meldingen beschikt dan kan dit aangeven dat het enkel meer out of control signalen weergeeft. Om de algemene prestatie van de procescontrole op zich na te gaan moet men zowel kijken naar de power als naar $1 - \alpha$. Uiteindelijk zal er doordat de controles uitgevoerd worden op verschillende batches ook nagegaan worden wat de invloed is van **l**, **k** en **q** op de controlelimieten en de typefouten.

5.6 Verwachtingen

5.6.1 Evolutie doelfunctiewaarden

Er wordt verwacht dat hoe verder men het productieplan reeds uitgevoerd heeft, i.e. **hoe meer jobs** men reeds verwerkt heeft, hoe **beter** men kan **inschatten** wat de verwachte **eindwaarde** zal zijn van de nagestreefde doelfunctie. Wanneer er nog maar 25 jobs verwerkt zijn, is het moeilijk om een voorspelling te doen over wat er in de komende 75 jobs zal gebeuren en wat de daaruit resulterende eindwaarde zal zijn. Bovendien zou men kunnen aannemen dat de variabiliteit die zich voordoet na de 75ste job zich relatief rechtlijnig zal doorzetten naar de eindwaarde. Er zal namelijk maar een beperkte mogelijkheid zijn om de variabiliteit bij te sturen of te reduceren. Deze assumptie kan men echter niet stellen voor de variabiliteit in de eerste 25 jobs. De variabiliteit die dan aangetroffen wordt, kan namelijk nog tegengewerkt worden door de variabiliteit die optreedt in de 75 daarna volgende jobs.

Ten tweede kan men verwachten dat indien er meer variabiliteit wordt toegevoegd, i.e. een **grotere Rdev en pRt**, de eindwaarde van de doelfunctie sterker aan variabiliteit onderhevig zal zijn. Hoewel men, gebaseerd op de opmerking bij hyothese 3 van onderzoek 1, zou kunnen verwachten dat pRt ook hier een omgekeerd effect heeft op de doelfuncties M, MFT en MT.

Als laatste zou men ook kunnen verwachten dat het verloop van **ML** een ander patroon vertoont dan de andere doelfuncties doordat ML zoals reeds aangetoond wordt in onderzoek 1, minder bestand is tegen variabiliteit. Hoewel, er moet opgemerkt worden dat uit onderzoek 1 blijkt dat ML vooral minder robuust is tegen de variabiliteit in de due dates. De release times hebben evenwel ook een impact, maar deze is minder uitgesproken dan de impact van de due dates. Er zal dus bestudeerd moeten worden hoe de doelfunctie ML zal reageren op de variabiliteit die specifiek veroorzaakt wordt door Rt.

5.6.2 Controlelimieten

Er wordt verwacht dat **het aantal jobs** waarop de berekening van de controlelimieten gebaseerd is een invloed zal hebben op de waarden die UCL en LCL aannemen. Specifiek wordt er een effect verwacht op de mate waarin de twee limieten van elkaar verwijderd liggen. Algemeen genomen is de kans op het voorkomen van variabiliteit verder in het

productieproces groter dan wanneer men nog maar net begonnen is met het verwerken van jobs, aangezien de kans op variabiliteit afhankelijk is van het aantal jobs. Hoe meer jobs er dus verwerkt zijn, hoe meer kans er bestaat dat er een aangepaste R_t waarde tussenzit. Door de toename aan mogelijke variabiliteit kunnen er zich twee gevolgen voordoen.

Een eerste gevolg zou kunnen zijn dat de toename aan variabiliteit leidt tot een **groter verschil** tussen de limieten. Dit doet zich voor wanneer per simulatie alle veranderingen in eenzelfde richting plaatsvinden, ofwel enkel een kleinere R_t ofwel enkel een grotere R_t . Bij het berekenen van een gemiddelde over verschillende simulaties zal dit tot grote standaardafwijkingen leiden en zullen de controlelimieten zich verder bevinden van de centerlijn. Een tweede gevolg is dat de toename aan variabiliteit aanleiding kan geven tot een **kleiner verschil** tussen de limieten. Dit zou het geval zijn indien in alle simulaties variabiliteit toegevoegd wordt in beide richtingen, namelijk de ene R_t zal een kleinere waarde aannemen dan verwacht en de andere R_t een grotere waarde. Deze veranderingen zullen elkaar dan kunnen opheffen, waardoor de simulaties gelijklopend zullen zijn aan de originele verwachtingen en de standaardafwijking bijgevolg klein is.

Uit **onderzoek 1** blijkt dat de veranderingen van de release time tot een hogere waarde leiden voor de doelfunctie, waardoor een latere release time blijkbaar meer invloed heeft op het hele productieproces dan een vroegere release time. Dit inzicht creëert de verwachting dat het eerste gevolg eerder bevestigd zal worden in de resultaten dan het tweede gevolg.

Een tweede punt dat gecontroleerd wordt is het effect van de **grootte van de variabiliteit** in R_t op de controlelimieten. Vergelijkbaar met hypothese 3 in onderzoek 1, wordt er verwacht dat hoe groter R_{dev} , hoe verder de controlelimieten zich zullen bevinden van de centerlijn.

Een derde controlepunt is het vergelijken van de controlelimieten van de **verschillende doelfuncties**. Aangezien onderzoek 1 aantoont dat maximum lateness minder bestand is tegen variabiliteit dan de andere doelfuncties, wordt er verwacht dat deze controlelimieten verder zullen liggen van de centerlijn ten overstaan van de controlelimieten van de andere vier doelfuncties. Hier geldt echter dezelfde opmerking als voordien. ML is voornamelijk gevoelig voor de variabiliteit in de due dates en in mindere mate voor de variabiliteit in R_t . Het mogelijk afwijkende gedrag van de doelfunctie ML onder variabiliteit in R_t zal dus bekeken moeten worden.

5.6.3 Type I fout en type II fout

Aangezien standaard de kans op een type I fout, α gelijk zal zijn aan het **significantieniveau** en deze in dit onderzoek vijf procent is, wordt er verwacht dat de kans op een type I fout zal schommelen rond deze waarde. Bij een vergelijking van de type I fout bij de verschillende controlemomenten wordt ervan uitgegaan dat het **controlemoment** zelf geen invloed zal hebben. Bij een vergelijking van beide typefouten over de verschillende doelfuncties wordt verwacht dat de waarden van de **maximum lateness** een ander patroon zou kunnen vertonen dan de andere doelfuncties door het afwijkende gedrag dat reeds opgemerkt is in onderzoek 1. Er wordt ook verwacht dat **pRt** en **Rdev** een invloed zullen hebben op zowel α als β , aangezien de variabiliteit een invloed zou kunnen hebben op de betrouwbaarheid van de procescontrole. Voor de type II fout wordt verwacht dat de invloed van Rdev zich via CV en AV zal manifesteren.

Door de **onderlinge relatie** tussen type I en type II fout, gerelateerd aan de ligging van de controlelimieten (supra, p. 56), wordt er verwacht dat indien één variabele een positief effect heeft op één van de twee typefouten, het een negatief effect zal hebben op de andere typefout.

5.7 Hypothesen

Evolutie doelfunctiewaarden

1. $\gamma_8 > \gamma_7 > \gamma_6$ bij $DF_{100} = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot DF_{25} + \gamma_7 \cdot DF_{50} + \gamma_8 \cdot DF_{75}$
2. $\gamma_5 > 0$ en $\gamma_4 > 0$ bij ML_{100} en PTJ_{100} met $DF_{100} = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot DF_{25} + \gamma_7 \cdot DF_{50} + \gamma_8 \cdot DF_{75}$
3. $\gamma_5 > 0$ en $\gamma_4 < 0$ bij M_{100} , MFT_{100} en MT_{100} met $DF_{100} = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot DF_{25} + \gamma_7 \cdot DF_{50} + \gamma_8 \cdot DF_{75}$
4. De lineaire regressie DF_{100ML} vertoont afwijkend gedrag ten overstaan van de regressies voor de andere doelfuncties

Controlelimieten

1. $Perc > 0$ bij Absoluut verschil $= \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$
2. $\gamma_4 > 0$ en $\gamma_5 > 0$ bij Absoluut verschil $= \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$ evenals $\gamma_4 > 0$ en $\gamma_5 > 0$ bij Relatief verschil $= \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$
3. Absoluut verschil_{ML} en Relatief verschil_{ML} zal groter zijn dan de verschillen bij de andere doelfuncties

Type I fout en Type II fout

1. $T1F \approx 0,05 \forall DF$
2. $T1F_{ML}$ en $T2F_{ML}$ vertoont afwijkend gedrag ten overstaan van de typefouten van de andere doelfuncties
3. $T1F_{25} = T1F_{50} = T1F_{75} = T1F_{100}$
4. $\gamma_4 > 0$ en $\gamma_5 > 0$ bij $T1F = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$
5. $\gamma_4 > 0$, $\gamma_5 > 0$ en $\beta_6 > 0$ bij $T2F = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot CV + \gamma_6 \cdot AV$
6. $|\gamma_{variabele_i}|$ bij $T1F = (-1) \cdot |\gamma_{variabele_i}|$ bij $T2F \forall DF$

5.8 Resultaten

5.8.1 Evolutie doelfunctiewaarden

Om de impact van de verschillende variabelen op de evolutie van de doelfunctiewaarden na te gaan wordt de volgende **lineaire regressie** uitgevoerd (Vergelijking 6), waarvan de resultaten geconsulteerd kunnen worden in bijlage 7.

$$DF_{100} = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot DF_{25} + \gamma_7 \cdot DF_{50} + \gamma_8 \cdot DF_{75}$$

Vergelijking 6: Lineaire regressie doelfunctiewaarden

De resultaten tonen aan dat hoe verder men in de uitwerking van het productieplan zit, hoe meer de tussentijdse waarde die de doelfunctie aanneemt een invloed zal hebben op de eindwaarde. Zo zal wanneer men de verschillende controlemomenten met elkaar afweegt, de verkregen waarde bij het derde controlemoment, **DF₇₅**, de **grootste impact** hebben op de eindwaarde, **DF₁₀₀**. Bovendien zal **DF₇₅** ook een grotere invloed hebben op **DF₁₀₀** dan **Rdev** of **pRt**. Dit kan echter niet altijd opgemerkt worden voor **DF₂₅** en **DF₅₀**. Zo zal bij **M₂₅**, **M₅₀** en **MFT₂₅**, **Rdev** een grotere invloed hebben op **DF₁₀₀**. Dit wil zeggen dat wanneer men nog maar 25 à 50 procent van de productie heeft afgewerkt, het niet de reeds doorlopen productie is die het grootste effect heeft op de eindwaarde, maar net de variabiliteit in de gehele productie. Uit deze vaststellingen kan er ook afgeleid worden dat variabiliteit in het begin van het proces nog tegengewerkt kan worden door variabiliteit in het verdere verloop van de productie.

Verder tonen de resultaten ook aan dat ongeacht welke doelfunctie men gebruikt **Rdev** altijd een **positieve invloed** heeft op **DF₁₀₀**. Analoog aan hypothese 3 van onderzoek 1 kan men ook hier stellen dat hoe meer variabiliteit er aan het proces wordt toegevoegd, hoe verder de eindwaarde van de doelfunctie zal afwijken van de vooropgestelde waarde.

Echter, gedeeltelijk volgens de verwachtingen heeft **pRt** een **negatieve invloed** op **DF₁₀₀**, ongeacht de gebruikte doelfunctie. De opmerking bij hypothese 3 van onderzoek 1 gaat hier dus niet enkel op voor **M**, **MFT** en **MT**, maar kan veralgemeend worden naar alle doelfuncties. Dit effect kan zoals voordien verklaard worden doordat, wanneer er meer kans is op een job met variabiliteit, er ook meer kans is dat de variabiliteit in die ene job wordt tegengewerkt door de variabiliteit in een andere job.

Daarnaast wordt ook aangetoond dat de spreiding in Rt 's, I , telkens een **positief effect** heeft op de eindwaarde die de doelfunctie aanneemt. Zo zal dus wanneer de waarden van Rt verder uit elkaar kunnen liggen, DF_{100} een grotere eindwaarde aannemen.

De resultaten maken verder ook duidelijk dat de slack in het productieproces, q , een **divers effect** heeft op DF_{100} , afhankelijk van welke doelfunctie men gebruikt. Zo heeft q een negatief effect op M en MFT , de twee niet due date gebaseerde doelfuncties en een positief effect op MT en PTJ , die wel due date gebaseerd zijn. De variabele q zou echter theoretisch gezien geen invloed mogen hebben op niet due date gebaseerde doelfuncties en het effect dat q heeft op de due date gebaseerde doelfuncties MT en PTJ , zou men net omgekeerd verwachten. Het lijkt aannemelijk dat het introduceren van meer slack een buffer kan vormen die de variabiliteit opvangt. De bekomen resultaten spreken dit echter tegen en geven aan dat het toevoegen van slack er net toe zal leiden dat de eindwaarde van de doelfunctie verder zal afwijken van de vooropgestelde waarde. Opmerkelijk is verder dat q bij ML zowel een negatief als een positief effect kan hebben.

De parameter k , die de nauwheid van de due dates weerspiegelt heeft algemeen genomen een positief effect op DF_{100} . Eerst en vooral zou k theoretisch gezien geen invloed mogen hebben op de niet due date gebaseerde doelfuncties. Daarnaast, wordt er ook een negatief effect verwacht. Wanneer de due dates later vallen, zou dit een buffer kunnen vormen om de variabiliteit op te vangen. Hierdoor zal de eindwaarde van de doelfunctie net minder sterk afwijken van de vooropgestelde waarde. De resultaten voor zowel q als k nemen echter kleine standaardcoëfficiënten aan. Als gevolg zullen deze onverklaarbare observaties geen beduidend effect hebben op de totale regressie en worden dan ook niet verder geanalyseerd.

Uiteindelijk wordt er ook nog aangetoond dat de doelfunctie **ML** onder invloed van variabiliteit in Rt geen afwijkend gedrag vertoont van de andere doelfuncties. Hieruit blijkt dat het afwijkende gedrag van ML dat vastgesteld wordt in onderzoek 1 vooral te wijten is aan de variabiliteit in de due dates en veel minder aan de variabiliteit in de release times.

5.8.2 Controlelimieten

De invloed die de verschillende variabelen hebben op de ligging van de controlelimieten wordt ook hier door middel van een **lineaire regressie** bestudeerd (Vergelijking 7). De resultaten kunnen tevens geconsulteerd worden in bijlage 8.

$$\text{Absoluut verschil} = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$$

$$\text{Relatief verschil} = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$$

Vergelijking 7: Lineaire regressie controlelimieten

Als eerste kan er opgemerkt worden dat **ML** voor de controlelimieten geen afwijkend gedrag vertoont ten overstaan van de andere doelfuncties. Hierbij kan voorgaande redenering doorgetrokken worden. De doelfunctie **PTJ** zal daarentegen wel afwijkend gedrag vertonen. De regressies voor PTJ resulteren echter niet betrouwbaar te zijn aangezien een verklaringskracht kleiner dan 0,5 wordt opgemeten. Deze doelfunctie zal dan ook uitgesloten worden in de verdere bespreking van de controlelimieten.

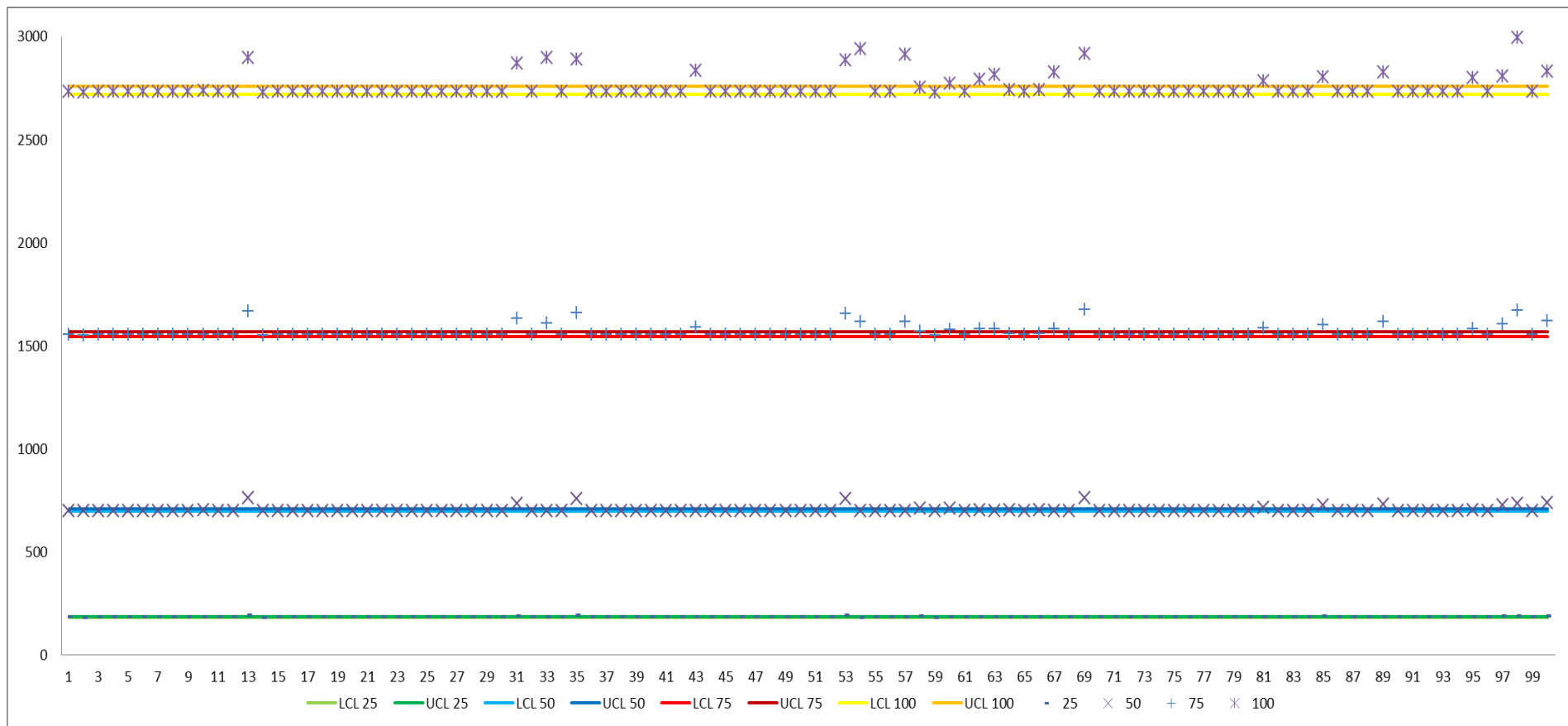
Zoals verwacht heeft het aantal jobs dat reeds verwerkt is, weergegeven door **Perc**, een **positief effect** op het verschil tussen LCL en UCL. Dit kan echter enkel gesteld worden voor het absolute verschil, aangezien de variabele Perc niet significant is voor de regressies met het relatieve verschil. Hoe verder men dus staat in de productie, hoe groter het absolute verschil tussen de limieten zal zijn. Dit kan verklaard worden door de opstapeling of accumulatie van variabiliteit die niet verwijderd wordt tijdens opstelling van de procescontrole (infra, p. 58). Dit effect wordt ook visueel weergegeven in figuur 18, 19 en 20. Naarmate dat men 25, 50, 75 of alle jobs heeft verwerkt liggen de controlelimieten verder van elkaar. Echter, doordat de waarden waarop de controlelimieten gebaseerd zijn zelf ook toenemen is dit effect relatief gezien niet meer significant.

Daarnaast zal de variabiliteit in het proces, **Rdev**, steeds een **positief effect** hebben op het verschil, ongeacht de doelfunctie waarmee men werkt en ongeacht of het verschil relatief of absoluut genomen wordt. Dit kan logisch verklaard worden doordat wanneer er meer variabiliteit in het proces zit, de waarden waarop de limieten gebaseerd zijn ook meer onderhevig zullen zijn aan variabiliteit. Dit alles zal resulteren in een groter verschil tussen UCL en LCL, aangezien dat deze berekend worden op basis van de standaardafwijking van de

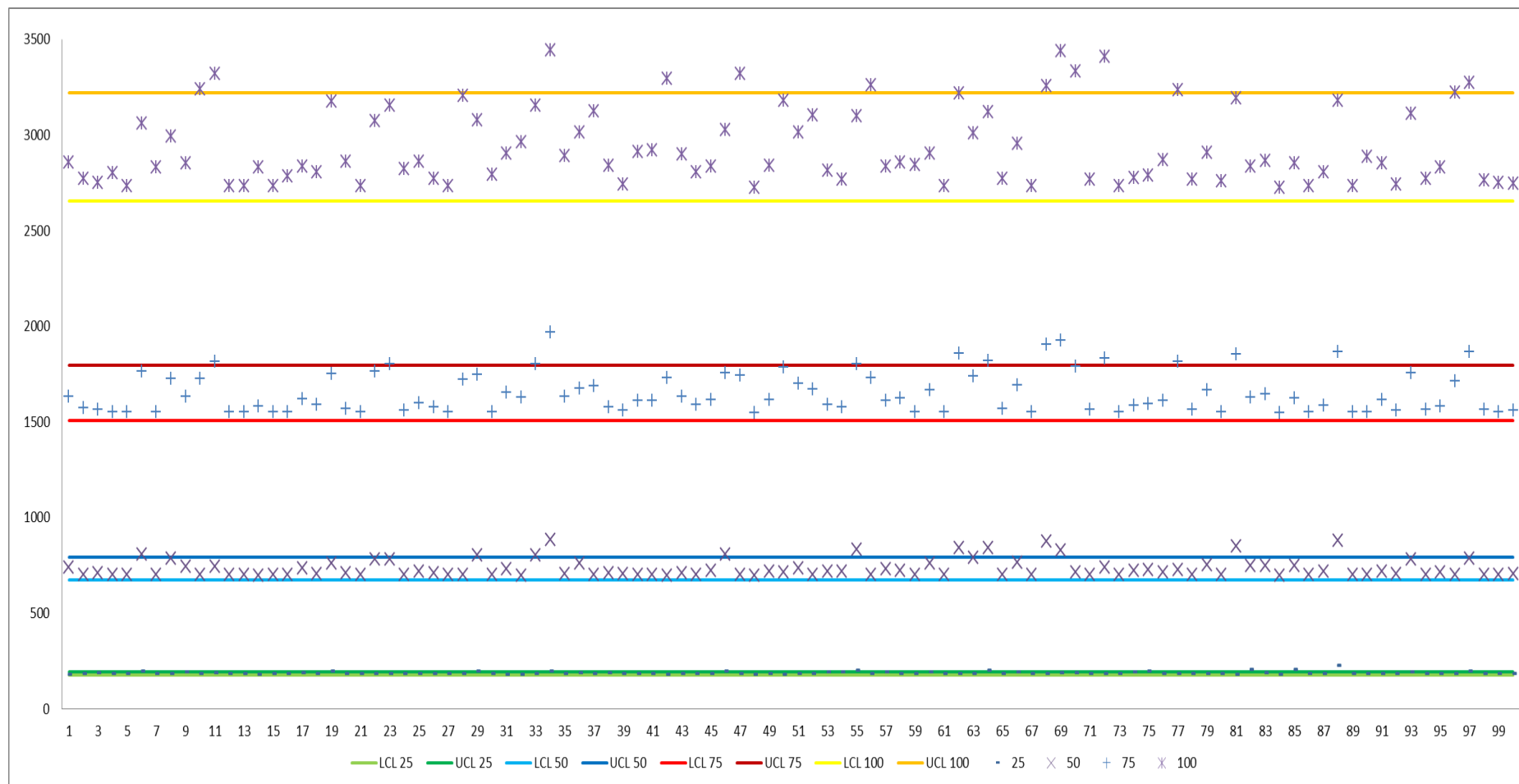
testafnames. Dit effect wordt ook visueel duidelijk wanneer men figuur 18 en 19 met elkaar vergelijkt. Deze twee figuren geven de controlelimieten weer voor MFT van batch 1025, voor respectievelijk situatie 1 en situatie 6. Zo zullen, volledig volgens de verwachtingen, de controlelimieten in figuur 19 meer gespreid liggen dan in figuur 18. Bijkomend vindt men dat de kans op het introduceren van variabiliteit, pRt , enkel significant is voor het absolute verschil tussen de limieten en bovendien een **negatief effect** heeft. Dit kan zoals in hypothese 3 van onderzoek 1 verklaard worden doordat de variabiliteit die optreedt in een bepaalde job opgeheven kan worden door de variabiliteit in een andere job.

De spreiding van de Rt 's, die weergegeven wordt door I , zal steeds een **positief effect** hebben op zowel het absolute als het relatieve verschil tussen de limieten. Hoe meer de release times gespreid liggen, hoe verder dat ook de daarop gebaseerde controlelimieten uit elkaar zullen liggen.

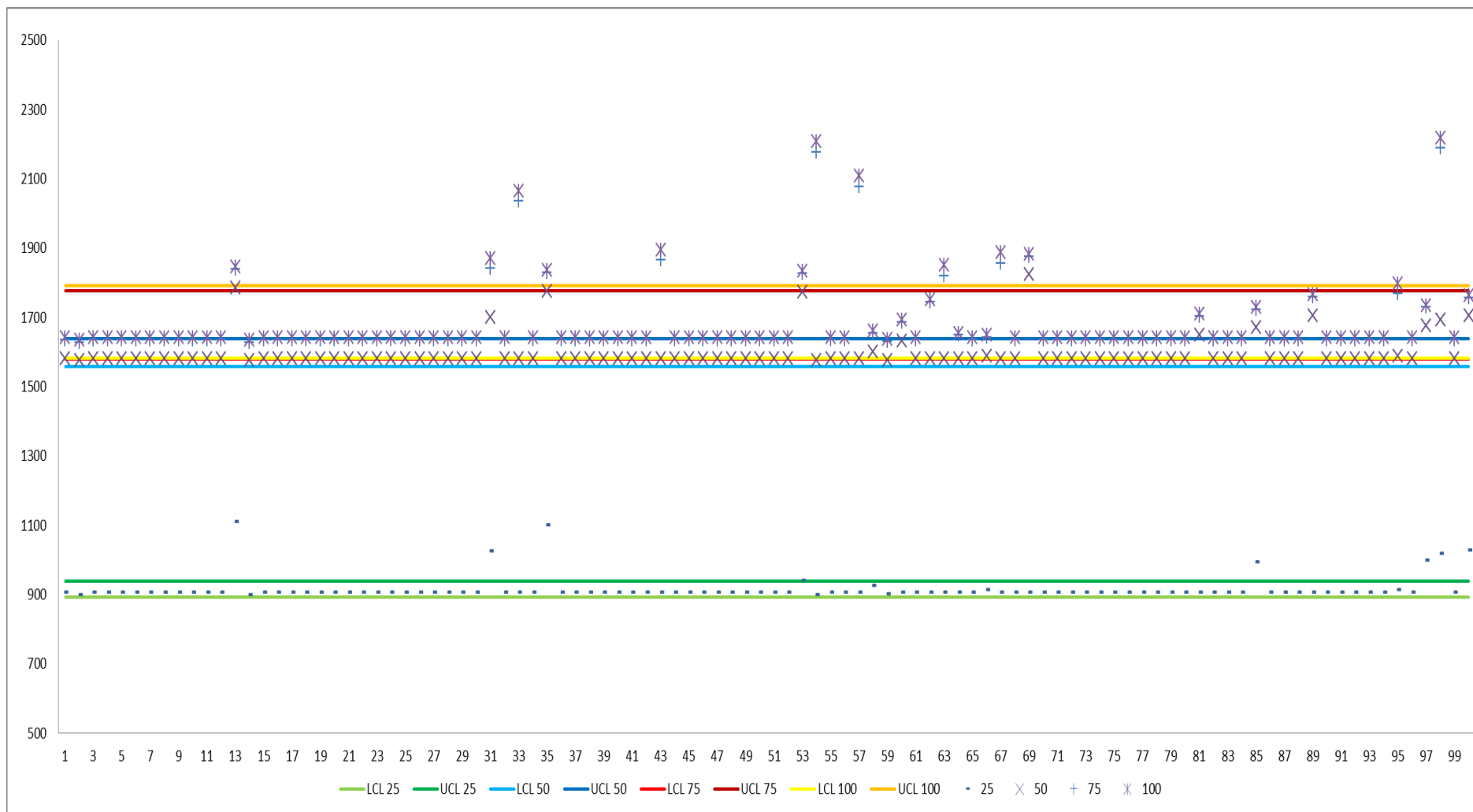
De ligging van de due dates, k en de aanvaardbare speling van de jobs, q zullen beiden een **negatief effect** hebben op het verschil tussen de limieten. Zo zal wanneer de due dates later vallen, i. e. een grotere k , het verschil tussen de limieten verkleinen. Dit kan verklaard worden doordat wanneer de due dates later vallen, i.e. grote k , de variabiliteit beter kan worden opgevangen, wat aanleiding geeft tot nauwer liggende controlelimieten. Opmerkelijk is dat dit verband geldt voor zowel de due date gebaseerde als voor de niet due date gebaseerde doelfuncties, terwijl dit zoals reeds gesteld theoretisch niet mogelijk is. Het negatieve effect van q op het verschil tussen LCL en UCL kan analoog verklaard worden. Wanneer er meer aanvaardbare speling is, kan dat een buffer vormen voor de variabiliteitsschommelingen in Rt waardoor de doelfunctiewaarden minder zullen variëren en de limieten dichter bij elkaar zullen komen te liggen.



Figuur 18: Batch 1025 - MFT - Situatie 1



Figuur 19: Batch 1025 - MFT - Situatie 6

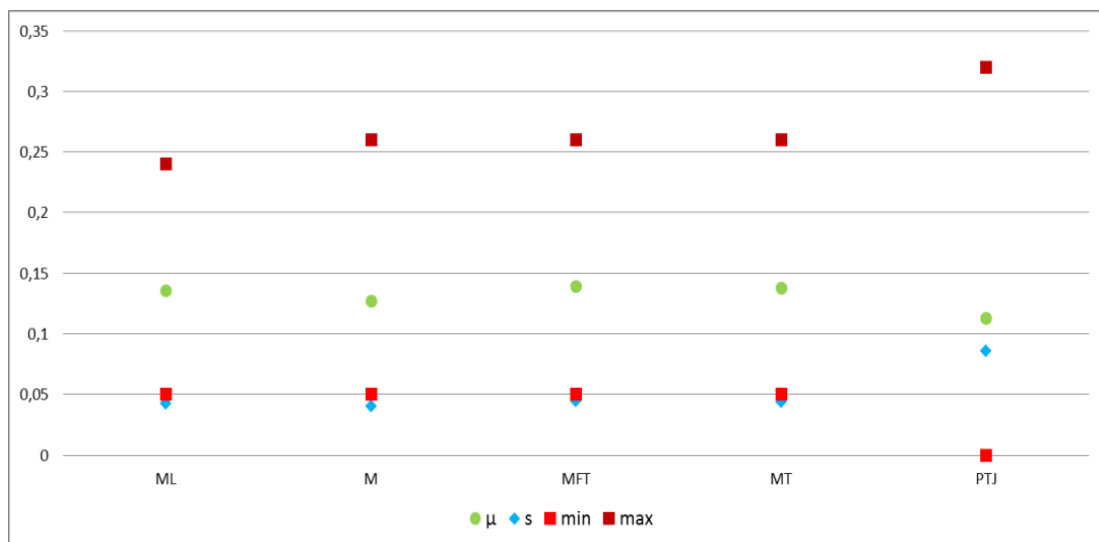


Figuur 20: Batch 1025 - ML - Situatie 1

5.8.3 Type I fout

Algemeen genomen blijkt dat de **gemiddelde** type I fout bij alle doelfuncties steeds veel groter is dan de theoretisch voorspelde 0,05. De gemiddelde type 1 fout van alle 5 varieert namelijk binnen het interval [0,11 ; 0,14] (Figuur 21). Wel is de minimale type I fout voor ML, M, MFT en MT gelijk aan 0,05 en voor PTJ 0,0. Dit toont aan dat er wel situaties voorkomen waarbij de theoretisch voorspelde waarde correct is, maar door de toegevoegde variabiliteit is dit slechts een minimum. De **standaardafwijking** van de type I fout voor alle vijf doelfuncties schommelt tussen [0,04 ; 0,09] (Figuur 21). Wanneer men naar beide parameters, μ en s , kijkt, kan men opmerken dat PTJ het meest afwijkend reageert ten overstaan van de andere doelfuncties. De doelfunctie PTJ bekommt namelijk een kleinere gemiddelde α maar beschrijft wel een groter interval door een grotere s .

Visuele analyse duidt ook aan dat ML, M, MFT en MT een gelijkaardig resultaat hebben voor μ en s van de type I fout en dus een gelijkaardig interval beschrijven. Dit toont dat qua type I fout het niet echt uitmaakt of men werkt met ML, M, MFT of MT. Het gebruik van PTJ bij procescontrole zal daarentegen gemiddeld tot lagere type I fouten leiden, maar kan wel meer variëren en zodus een grotere kans op type I fouten bekomen dan bij de andere vier doelfuncties.



Figuur 21: Type I fout - descriptieve analyse

Aangezien de kans op een type I fout gemiddeld genomen hoger ligt dan de theoretisch verwachte waarde wordt er door middel van een **lineaire regressie** (Vergelijking 8) nagegaan welke variabelen hiervan de oorzaak zijn.

$$T1F = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$$

Vergelijking 8: Lineaire regressie type I fout

De resultaten van de lineaire regressie voor de type I fout kan teruggevonden worden in bijlage 9. Voor vier van de vijf doelfuncties, namelijk ML, M, MFT en MT, wordt er een lineair regressiemodel bekomen met een hoge verklaringskracht, i.e. adjusted R^2 groter dan 0,9. Het lineaire regressiemodel horende bij doelfunctie PTJ heeft een adjusted R^2 van 0,723, hetgeen toch nog aanvaardbaar is qua verklaringskracht.

Het afwijkend gedrag van **PTJ** wordt bevestigd in de regressieresultaten. Dit is namelijk de enige doelfunctie waarbij l de grootste invloed uitoefent op de kans op type I fouten en niet pRt . Ook heeft bij deze doelfunctie naast l enkel pRt een invloed. Bij de andere doelfuncties hebben ook $Rdev$, $Perc$ en q een invloed (Bijlage 9). Wat wel bij alle doelfuncties hetzelfde resultaat heeft, is de richting van de invloed van de significante variabelen. Een grotere l , pRt , $Rdev$ of $Perc$ zal steeds leiden tot een grotere type I fout, evenals een kleinere q .

Uit de resultaten blijkt dus vooraleerst dat indien er meer **variabiliteit** in het productieproces komt door middel van een grotere pRt of $Rdev$, er meer typefouten zullen optreden bij de procescontrole. Doordat pRt bij vier doelfuncties de meeste invloed heeft - steeds een standaardcoëfficiënt groter dan het dubbele van de standaardcoëfficiënt van $Rdev$ - kan men concluderen dat de hoeveelheid van veranderingen zelf een grotere invloed heeft dan de grootte van de toegevoegde variabiliteit. Om α dus te reduceren is het niet alleen belangrijk om de variabiliteit in het proces te reduceren, maar zou men zelfs de kans op het optreden van een beperkte mate van variabiliteit moeten kunnen uitsluiten.

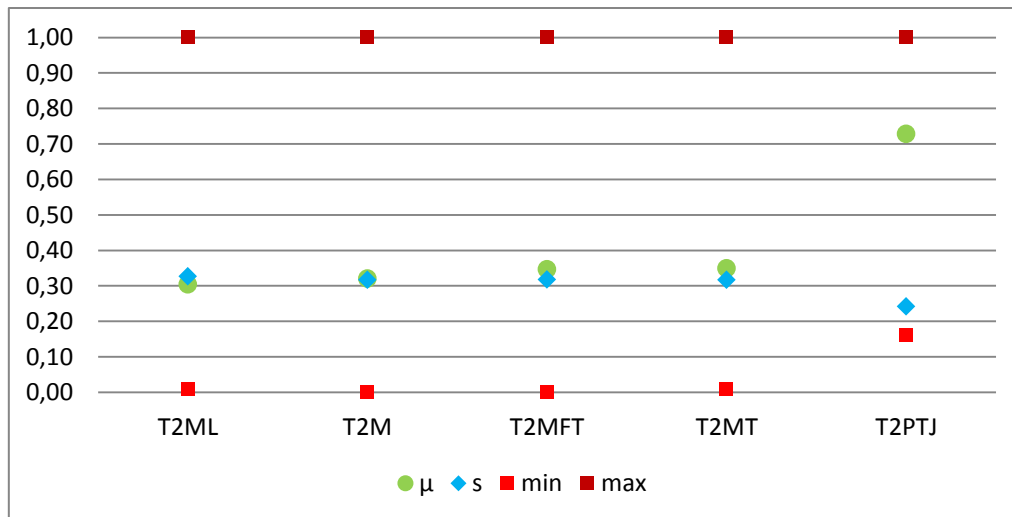
Als tweede wordt er aangetoond dat de procescontrole onbetrouwbaarder wordt naarmate men meer jobs verwerkt heeft, i.e. als men een later **controlemoment** bereikt en dus een hogere **Perc** heeft. Dit kan opnieuw verklaard worden door de accumulatie van variabiliteit gedurende het proces, veroorzaakt door de opstelling van de procescontrole (supra, p. 59). Uit de analyse van het verschil tussen de controlelimieten blijkt dat het absolute verschil wel toeneemt maar het relatieve verschil niet. Wanneer men dit samenneemt met dit

regressieresultaat voor de type I fout, kan men besluiten dat hoewel de controlelimieten verder zullen liggen van de centerlijn naarmate men meer jobs verwerkt heeft, dit interval tussen de controlelimieten toch niet voldoende vergroot om de toenemende mate van variabiliteit correct te omvatten.

De regressies tonen ook dat een grotere spreiding in R_t , weerspiegeld in de variabele I , tot een grotere kans op type I fouten leidt, maar hier zal later dieper op ingegaan worden. Indien er meer slack toegelaten wordt in het productieproces, i.e. als q vergroot, zal dit bij het gebruik van MFT en MT in de procescontrole leiden tot een lager aantal type I fouten. Bij de due date gebaseerde doelfunctie MT kan dit verklaard worden doordat de veranderingen in R_t beter opgevangen kunnen worden door de aanwezige slack, waardoor de waarden van de doelfunctie zelf minder variabiliteit zullen vertonen. Een reden waarom de variabele q een invloed heeft op de type I fout van MFT lijkt theoretisch onbestaande, aangezien MFT geen due date gebaseerde doelfunctie is. Eveneens is het opmerkelijk dat q geen invloed uitoefent op de α van ML en PTJ, de andere due date gebaseerde doelfuncties. Indien q een significante invloed heeft op het aantal type I fouten, blijkt deze invloed wel beperkt te zijn. Wanneer men alle significante variabelen vergelijkt qua impact dan moet er om α te drukken ofwel heel veel slack toegelaten worden ofwel de variabiliteit in R_t verminderd worden ofwel de kans op variabiliteit in R_t minimaal verminderd worden.

5.8.4 Type II fout

Het afwijkend gedrag van PTJ wordt ook bij de type II fout opgemerkt. Wanneer het **gemiddelde en de standaardafwijking** van de type II fout grafisch weergegeven wordt (Figuur 22), ziet men duidelijk dat de gemiddelde type II fout bij PTJ veel hoger ligt dan bij de andere doelfuncties. Ook valt het op dat bij M en MFT er mogelijk geen type II fout gemaakt wordt. Bij ML en MT is de minimale kans 0,01. De minimum β bij PTJ is 0,16, hetgeen veel groter is dan bij de andere. Algemeen kan men hieruit weer besluiten dat qua type II fout het niet meteen uitmaakt of je ML, M, MFT of MT gebruikt als prestatieparameter bij de procescontrole, maar dat het gebruik van PTJ af te raden is, aangezien deze tot slechtere resultaten zal leiden.



Figuur 22: Type II fout descriptieve analyse

Ook al zit er een verschil in de resultaten van de vijf doelfuncties, het feit dat het bij alle vijf mogelijk is om een β te hebben gelijk aan één is verontrustend. Dit zou namelijk inhouden dat alle extreme waarden niet opgemerkt worden bij het gebruik van de controlelimieten. Om na te gaan wat de oorzaak is van deze zeer hoge β -waarden, wordt er opnieuw een **lineaire regressie** uitgevoerd.

$$T2F = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot CV + \gamma_6 \cdot AV$$

Vergelijking 9: Lineaire regressie type II fout

De resultaten van de regressie zijn gelijklopend voor alle vijf doelfuncties (Bijlage 10). Een licht afwijkend resultaat wordt opnieuw bekomen voor **PTJ**, waarbij q geen significante invloed heeft en de invloed van l veel kleiner is dan bij de andere doelfuncties. Algemeen kan men opmerken dat CV steeds de grootste invloed heeft op β . Er blijkt ook dat een grotere CV , AV en q leiden tot een grotere type II fout. Voor de variabele l blijkt dat een stijging ervan een kleinere β tot gevolg heeft.

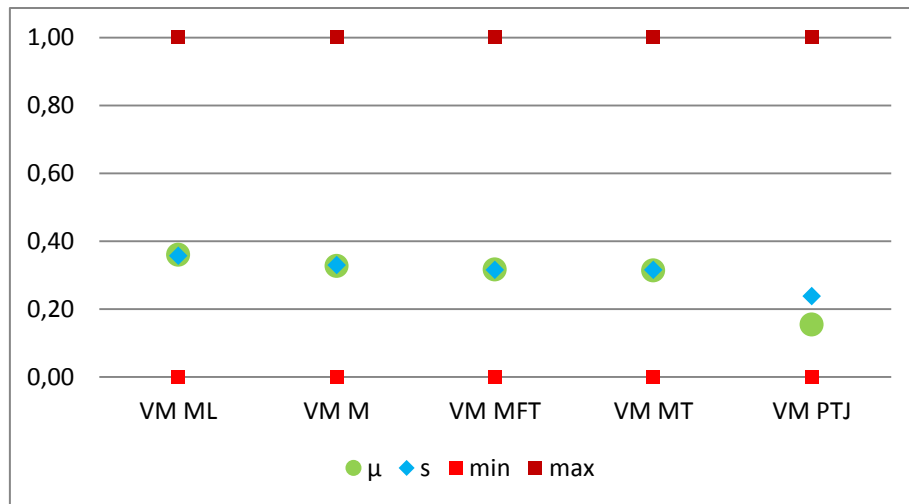
Aangezien CV en AV de toegevoegde **variabiliteit** weerspiegelen, duidt de regressie opnieuw aan dat meer variabiliteit, een grotere $Rdev$, tot meer onbetrouwbare resultaten leidt. Een mogelijke reden voor de grote invloed van CV is dat de controlelimieten opgesteld om de variabiliteit van CV te vatten al redelijk ver verwijderd moeten liggen van de centerlijn. Dit blijkt ook uit de resultaten van het verschil tussen de controlelimieten waar een grotere $Rdev$ leidt tot een groter relatief verschil (supra, p. 74). Door de reeds door CV gecreëerde afstand tussen de controlelimieten, wordt de extra variabiliteit van AV moeilijk

waarneembaar en zullen er dus meer type II fouten gemaakt worden. Opmerkelijk is dat pRt , tevens een indicator voor variabiliteit, geen significante invloed heeft op β . Hoewel dus bij type I de mogelijkheid tot variabiliteit de grootste impact heeft op een typefout, is voor de type II fout de grootte van de variabiliteit veel belangrijker.

De impact van de spreiding van Rt , namelijk I , op de type II fout is negatief. Dit duidt aan dat hoe groter de spreiding van Rt is, hoe kleiner de kans op een type II fout en dus hoe meer extreme waarden er correct zullen opgemerkt worden. Verdere analyse betreffende I kan teruggevonden worden in Impact variabele I (infra, p. 84).

Als laatste heeft de variabele q ook een effect op de type II fout van ML, M, MFT en MT. Dit resultaat duidt aan dat indien er meer slack toegelaten wordt in het productieproces, i.e. als q vergroot, dit aanleiding geeft tot meer extreme veranderingen in Rt die niet opgemerkt worden. Dit lijkt logisch bij de due date gebaseerde doelfuncties waarvoor dezelfde logica wordt gevolgd als bij de type I fout. De veranderingen in Rt kunnen beter opgevangen worden door de aanwezige slack waardoor de verandering in Rt niet per se een verandering in de doelfunctie zal leiden en de doelfunctie dus zelf minder variabiliteit kan vertonen. Men zal dan ook minder snel een extreme verandering in Rt opmerken via de doelfunctiewaarde. De resultaten tonen aan dat q niet alleen effect heeft op de due date gebaseerde doelfuncties maar ook op M en MFT, hetgeen theoretisch niet verklaard kan worden door bovenstaande redenering.

Om de doelfuncties als prestatieparameters verder te evalueren, worden ook het aantal **valse meldingen** geanalyseerd (Figuur 23). Hierin wordt weer duidelijk dat de kans op valse meldingen een relatief zelfde gedrag heeft bij ML, M, MFT en MT maar PTJ een afwijkend gedrag vertoont door een lagere μ en s . Alsook valt op dat bij alle doelfuncties de kans op valse meldingen het volledige interval tussen 0 en 1 beschrijft.



Figuur 23: Valse meldingen - descriptieve analyse

Om de oorzaken voor de kans op valse meldingen te analyseren, wordt er nogmaals een **lineaire regressie** uitgevoerd:

$$VM = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot CV + \gamma_6 \cdot AV$$

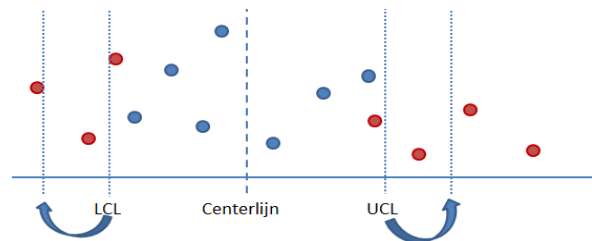
Vergelijking 10: Lineaire regressie valse meldingen

De resultaten kunnen teruggevonden worden in bijlage 11. De variabele *l* blijkt steeds een positieve invloed te hebben en heeft bij ML en PTJ zelfs de grootste invloed. Bij ML, M, MFT en MT heeft CV steeds een positieve standaardcoëfficiënt en is bij M, MFT en MT tevens de belangrijkste verklarende variabele. De extra variabiliteit weerspiegeld in AV heeft enkel een negatieve impact op de kans van valse meldingen bij doelfunctie M.

Wanneer men deze **resultaten samenlegt** met de resultaten van de type II fout, kan men besluiten dat CV niet enkel leidt tot een grotere β maar ook op een grotere kans op valse meldingen, hetgeen weer bevestigt dat meer variabiliteit leidt tot algemeen slechtere resultaten bij het gebruik van procescontrole. Opmerkelijk is dat dit niet geldt voor AV. Bij AV is er namelijk een afweging mogelijk. Een groter verschil tussen de gewone intrinsieke variabiliteit en de extra toegevoegde variabiliteit, i. e. een grotere AV, leidt tot minder type II fouten maar ook tot een lager aantal valse meldingen. Het omgekeerde geldt voor de variabele *l*. Een grotere spreiding in *Rt*'s leidt tot een lagere β en dus tot minder kans op type II fouten, maar wel tot een groter aantal valse meldingen.

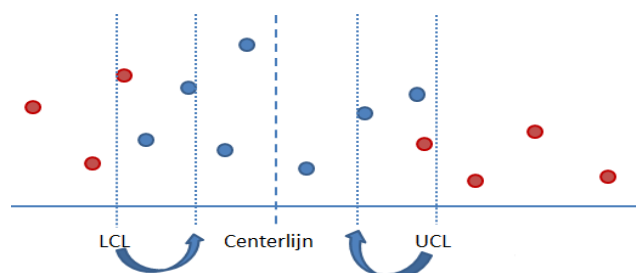
5.8.5 Impact variabele I

Wanneer men de regressieresultaten die betrekking hebben op de variabele I samenneemt, valt het op dat de resultaten **inconsistent** zijn. Uit de regressie van het verschil tussen de **controlelimieten** blijkt dat de spreiding in de release times een positief effect heeft op het absolute en het relatieve verschil. Een grotere spreiding in de release times leidt dus tot controlelimieten die verder van de centerlijn zullen liggen (Figuur 24), dan wanneer men een kleine spreiding zou hebben.



Figuur 24: Impact van I volgens verschil tussen UCL en LCL

Dit is echter tegenstrijdig aan de regressieresultaten van **de typefouten**. Het resultaat van de regressie voor de type I fout toont aan dat variabele I ook een positief effect heeft op de kans op een type I fout. Bij een grote spreiding in Rt's zouden dus meer valse out of control signalen gegeven worden dan wanneer er een kleine spreiding zou zijn. Er zouden dus meer signalen zijn die simulaties zouden aanduiden die enkel common cause variabiliteit ondergaan. Qua type II fout, geeft het regressieresultaat aan dat I een negatieve invloed heeft op de kans om een type II fout te maken en er dus meer extreme waarden zullen opgemerkt worden indien de spreiding in release times zal toenemen. Dit lijkt positief, echter het regressieresultaat van de valse meldingen duidt aan dat indien I toeneemt, de kans op valse meldingen ook toeneemt. Er zullen dus in het algemeen, en al dan niet terecht, veel meer out of control signalen gegeven worden. Indien men deze afweging bestudeert, ziet men dat deze resultaten juist duiden op het vernauwende effect dat I heeft op de controlelimieten (Figuur 25).



Figuur 25: Impact van I volgens typefouten

5.9 Controleren van de hypothesen

Evolutie doelfunctiewaarden

1. $\gamma_8 > \gamma_7 > \gamma_6$ bij $DF_{100} = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot DF_{25} + \gamma_7 \cdot DF_{50} + \gamma_8 \cdot DF_{75}$

Studie: Deze hypothese wordt bevestigd voor alle coëfficiënten over alle doelfuncties.

2. $\gamma_5 > 0$ en $\gamma_4 > 0$ bij ML_{100} en PTJ_{100} met $DF_{100} = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot DF_{25} + \gamma_7 \cdot DF_{50} + \gamma_8 \cdot DF_{75}$

Studie: Deze hypothese wordt maar gedeeltelijk bevestigd. Zo zal er enkel voor Rdev een positieve coëfficiënt gevonden worden, voor pRt daarentegen zal die negatief zijn.

3. $\gamma_5 > 0$ en $\gamma_4 < 0$ bij M_{100} , MFT_{100} en MT_{100} met $DF_{100} = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot DF_{25} + \gamma_7 \cdot DF_{50} + \gamma_8 \cdot DF_{75}$

Studie: Deze hypothese wordt volledig bevestigd door de regressieresultaten.

4. De lineaire regressie DF_{100ML} vertoont afwijkend gedrag ten overstaan van de regressies voor de andere doelfuncties

Studie: Het afwijkend gedrag van de doelfunctie ML wordt niet volledig bevestigd in de resultaten. Enkel wanneer men kijkt naar het effect dat de parameter k heeft op het verloop van de doelfunctie zal men afwijkende resultaten terugvinden. De regressies bevestigen met andere woorden de resultaten uit onderzoek 1, namelijk dat ML vooral gevoelig is voor variabiliteit in de due dates en in mindere mate voor variabiliteit in Rt.

Controlelimieten

1. $Perc > 0$ bij $Absoluut\ verschil = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$

Studie: Deze hypothese wordt enkel bevestigd voor het absolute verschil. Het relatieve verschil geeft hiervoor geen significante waarden aan.

2. $\gamma_4 > 0$ en $\gamma_5 > 0$ bij *Absoluut verschil* $= \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$ evenals $\gamma_4 > 0$ en $\gamma_5 > 0$ bij *Relatief verschil* $= \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$

Studie: De standaardcoëfficiënt van Rdev is inderdaad positief, zowel voor het absolute als voor het relatieve verschil. Voor het effect van pRt vindt men enkel bij het absolute verschil significante waarden die bovendien duiden op een negatief verband.

3. *Absoluut verschil_{ML}* en *Relatief verschil_{ML}* zal groter zijn dan de verschillen bij de andere doelfuncties

Studie: Deze hypothese wordt ontkracht, aangezien ML gelijkaardige resultaten vertoont aan de ander doelfuncties. Ook hier wordt duidelijk dat ML vooral minder bestand is tegen de variabiliteit in de due dates en in mindere mate voor variabiliteit in Rt. De doelfunctie PTJ wijkt echter wel af wanneer men kijkt naar de resultaten, maar geeft geen significante waarden waardoor geen betrouwbare conclusies getrokken kunnen worden.

Type I fout en Type II fout

1. $T1F \approx 0,05 \forall DF$

Studie: Deze hypothese wordt niet bevestigd. Door de toegevoegde variabiliteit geven de vooropgestelde limieten veel meer type I fouten aan dan verwacht. De opgestelde procescontrole om een productieplan met variabiliteit in Rt op te volgen is dus af te raden aangezien het onbetrouwbare resultaten geeft.

2. $T1F_{ML}$ en $T2F_{ML}$ vertoont afwijkend gedrag ten overstaan van de typefouten van de andere doelfuncties.

Studie: Zowel bij de analyse van type I fout als bij de analyse van type II fout, wordt dit niet bevestigd. Wel valt op dat de doelfunctie PTJ een afwijkend gedrag vertoont.

$$3. T1F_{25} = T1F_{50} = T1F_{75} = T1F_{100}$$

Studie: Uit de lineaire regressie blijkt dat voor ML, M, MFT en MT de type I fout afhankelijk is van het aantal afgewerkte jobs. Voor die doelfuncties bestaat volgende relatie: $T1F_{25} < T1F_{50} < T1F_{75} < T1F_{100}$. Voor PTJ wordt er geen significant resultaat bekomen.

$$4. \gamma_4 > 0 \text{ en } \gamma_5 > 0 \text{ bij } T1F = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot Rdev + \gamma_6 \cdot Perc$$

Studie: Uit de lineaire regressieresultaten blijkt dat deze standaardcoëfficiënten steeds positief waren. Enkel voor PTJ had Rdev geen significante invloed en kan deze hypothese dus niet volledig gestaafd worden.

$$5. \gamma_4 > 0, \gamma_5 > 0 \text{ en } \beta_6 > 0 \text{ bij } T2F = \gamma_1 \cdot l + \gamma_2 \cdot k + \gamma_3 \cdot q + \gamma_4 \cdot pRt + \gamma_5 \cdot CV + \gamma_6 \cdot AV$$

Studie: Voor CV en AV wordt dit bevestigd voor alle doelfuncties. Uit de lineaire regressie worden geen significante resultaten gevonden voor γ_4 , waardoor dit deel van de hypothese dan ook niet bevestigd kan worden.

$$6. |\gamma_{variabele_i}| \text{ bij } T1F = (-1) \cdot |\gamma_{variabele_i}| \text{ bij } T2F \forall DF$$

Studie: Dit kan opgemerkt worden in de resultaten van de lineaire regressie voor de variabelen l en q. Voor de andere variabelen wordt dit echter niet opgemerkt.

5.10 Algemene conclusie onderzoek 2

Na het vergelijken van de resultaten met de theoretisch vooropgestelde verwachtingen kunnen er een aantal algemene conclusies getrokken worden. Eerst kan men vooral opmerken dat de procescontrole zoals hier opgesteld, niet geheel overeenkomt met hoe deze beschreven wordt in **de literatuur**. Zo zal er bij de retrospectieve testen niet gezocht worden naar de reden van variabiliteit en zal deze dan ook niet gereduceerd kunnen worden. Doordat de variabiliteit niet geëlimineerd wordt, zullen de controlelimieten die gebaseerd zijn op een proces met gecumuleerde variabiliteit hier een impact van ondervinden. De opgestelde procescontrole is dus niet volkomen realistisch, maar kan wel als geschikt bevonden worden om de hier aangenomen situatie te analyseren.

Wanneer men de **evolutie van de doelfunctiewaarden** bekijkt onder invloed van variabiliteit dan kan men constateren dat hoe meer variabiliteit er aan het proces wordt toegevoegd, hoe verder de eindwaarde zich zal bevinden van de vooropgestelde waarde. Bovendien tonen de resultaten aan dat hoe verder men in de uitwerking van het productieplan zit, hoe meer de tussentijdse waarde die de doelfunctie aanneemt een invloed zal hebben op de eindwaarde. Uit deze vaststellingen kan men ook afleiden dat variabiliteit in het begin van het proces nog tegengewerkt kan worden door variabiliteit in het verdere verloop van de productie. Het zal dus moeilijk zijn om op basis van de reeds verwerkte jobs een correcte inschatting te maken van de uiteindelijke eindwaarde. Verder merkt men ook op dat wanneer er meer kans is op een job met variabiliteit, er ook een grotere kans is op dit tegenwerkende effect, en dit voor alle doelfuncties. In onderzoek 1 daarentegen kon dit enkel vastgesteld worden voor de doelfuncties M, MFT en MT. Vervolgens merkt men ook dat wanneer de waarden van R_t verder uit elkaar kunnen liggen DF_{100} een grotere waarde zal aannemen. Uiteindelijk blijkt ook dat de doelfunctie ML onder invloed van variabiliteit in R_t geen afwijkend gedrag vertoont. Het afwijkende gedrag van ML in onderzoek 1 is dus vooral te wijten aan de variabiliteit in de due dates.

De resultaten betreffende de **ligging van de controlelimieten** geven aan dat naarmate er meer variabiliteit in het proces zit, ongeacht de bestudeerde doelfunctie en het soort van verschil tussen de controlelimieten, de limieten verder uit elkaar zullen liggen. Bovendien kan men ook opmerken dat naarmate men meer jobs verwerkt heeft, de controlelimieten

verder uit elkaar zullen liggen. Dit kan gelinkt worden aan de eerder aangehaalde beperking, namelijk dat de variabiliteit in het proces niet wordt geëlimineerd tijdens de retrospectieve testen. Dit geeft aanleiding tot een opeenstapeling van variabiliteit naarmate dat men zich verder in het proces bevindt. Dit zal op zijn beurt ervoor zorgen dat de controlelimieten, die gebaseerd zijn op waarden die cumulatief meer variabiliteit bevatten, verder uit elkaar liggen. Echter, dit effect blijkt relatief gezien niet meer significant te zijn. Analoog aan de resultaten uit onderzoek 1 merkt men ook hier dat wanneer de kans op het optreden van variabiliteit verhoogt, de totale variabiliteit zal verminderen. De controlelimieten zullen dan ook nauwer liggen. Uiteindelijk kan men ook afleiden dat het introduceren van buffers in het systeem ervoor kan zorgen dat de variabiliteitsschommelingen in R_t opgevangen worden. Zo zullen wanneer de due dates meer gespreid liggen of wanneer er meer slack in de productieplanning opgenomen wordt, de doelfunctiewaarden minder gaan variëren en zullen de controlelimieten dichter bij elkaar komen te liggen.

Als laatste kan men ook uit de resultaten van de **typefouten** een aantal algemene conclusies halen. Zo zal toevoeging van variabiliteit leiden tot meer typefouten, zowel voor type I als voor type II fout. Uit de analyse van de type I fouten blijkt verder dat toevoegen van beperkte variabiliteit op verschillende momenten een grotere impact heeft dan gewoon 1 keer een grote verandering. Dit is opmerkelijk aangezien onderzoek 1 aanduidt dat door meer kans op variabiliteit toe te laten de variabiliteit van een doelfunctie beperkt kan worden. De analyse van de typefouten daartegen toont aan dat men hierdoor meer typefouten bekommt en dat de procescontrole dus onbetrouwbaarder wordt. Om dit tegen te gaan is het dan ook niet alleen belangrijk om de variabiliteit in het proces te reduceren, maar zou men zelfs de kans op het optreden van een beperkte mate van variabiliteit moeten kunnen uitsluiten. De resultaten tonen tevens aan dat de doelfuncties niet zo geschikt zijn als prestatieparameters aangezien de typefouten vaak te hoog liggen.

Een mogelijke manier om de type I fout te reduceren is het toelaten van veel slack in de productieplanning. Aangezien er met **buffers** gewerkt wordt bij proactief plannen en de redundancy-based technieken bij het robuust plannen (supra, p. 15), zou procescontrole bij deze technieken dus qua type I fout tot goede resultaten kunnen leiden. Echter, door de introductie van deze buffers zullen de extreme wijzigingen minder goed opgemerkt worden waardoor het aantal type II fouten zal toenemen. Opmerkelijk is verder dat wanneer men

een vergelijking maakt tussen de resultaten voor de evolutie van de doelfuncties, de controlelimieten en die voor type I fouten, men vaststelt dat als er meer jobs afgewerkt worden, er een beter inschatting gemaakt kan worden van de eindwaarde van de doelfunctie, maar dat de procescontrole onbetrouwbaarder wordt.

De analyse van de **type II fouten** toont ook een opmerkelijk resultaat, namelijk dat bij alle vijf de doelfuncties er situaties mogelijk zijn waarbij geen enkele extreme waarde opgemerkt wordt tijdens de procescontrole. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de cumulatie aan variabiliteit. Doordat deze niet geëlimineerd wordt gedurende het proces zal dit aanleiding geven tot een groot verschil tussen de limieten en de kans op het optreden van type II fouten beduidend vergroten. De resultaten duiden ook op het afwijkende gedrag van PTJ. Dit kan verklaard worden doordat PTJ enkel het percentage aangeeft van de jobs die laattijdig afgeleverd worden, maar nooit de mate van laattijdigheid toont. Bij de andere doelfuncties is er echter wel een mate van afwijking die opgevolgd kan worden, waardoor men daar de impact van variabiliteit meer in detail kan bestuderen. Wanneer de resultaten voor beide typefouten naast elkaar gelegd worden, merkt men de trade-off tussen type I en II fout op, zoals besproken wordt in de literatuurstudie omtrent de ligging van de controlelimieten (supra, p. 56). Zo zullen de parameters l en q een verschillend teken aannemen, naargelang men type I of II fout bekijkt.

Uiteindelijk wordt ook het eigenaardig gedrag van l opgemerkt, dat inconsistent is met de verwachtingen en voor zover niet verklaard kan worden. Er wordt dan ook aangeraden om verder onderzoek te realiseren naar de oorzaak van dit voorlopig onverklaarbare gedrag.

6 Algemeen besluit

In navolging van de Earned Value Managementtechniek bij project management, wordt er getracht een gelijkaardige techniek op te bouwen voor productieplanning. Tot nu toe lag de focus bij productieplanning op het bekomen van één uiteindelijke geoptimaliseerde eindwaarde voor een doelfunctie, die de prestatie van het productieproces weergeeft. Echter, deze eindwaarde kan in werkelijkheid veranderen door onvoorziene gebeurtenissen en hierdoor kunnen toekomstige afspraken in gedrang komen. In een geglobaliseerde economie, waar de druk van concurrenten nooit ver weg is, lijkt het wel zeer belangrijk om afspraken na te komen. De opvolging van het productieplan kan hierbij dan ook een grote meerwaarde verschaffen. Om deze techniek uit te bouwen is het dan ook vereist grondig te begrijpen waarom men niet in staat is de toekomst correct te voorspellen en na te gaan welke oorzaken juist leiden tot veranderingen in de uitvoering van het productieplan.

Eerst wordt getracht de variabiliteit en de impact op de doelfuncties te kwantificeren in een single machine structuur. Eenmaal de impact op de prestatie van het productieplan gekwantificeerd is, wordt ook getest of het echt mogelijk is om tijdens de uitvoering van het productieproces meer accurate voorspellingen te bekomen. Hoewel die voorspellingen de werkelijkheid nooit accuraat weergeven, lijken de inzichten behaald via dit onderzoek belangrijk en kan het helpen bij het uitwerken van een Earned Value Managementtechniek in productieplanning. In het eerste onderzoek wordt de impact van variabiliteit op de eindwaarde van een doelfunctie bestudeerd. In het tweede onderzoek wordt door middel van procescontrole de impact van variabiliteit geanalyseerd gedurende de uitvoering van het productieproces.

In het eerste onderzoek worden de verschillende vormen van variabiliteit weergegeven door veranderingen toe te voegen aan de release times, de processing times en de due dates. De bestudeerde doelfuncties bevatten zowel due date gebaseerde doelfuncties, namelijk maximum lateness, mean tardiness en proportion of tardy jobs, als niet due date gebaseerde doelfuncties, namelijk mean flow time en makespan. Eerst wordt de impact van variabiliteit bestudeerd. Er wordt vastgesteld dat variabiliteit, ongeacht de vorm, altijd een impact zal hebben op de eindwaarde van de doelfuncties. Hoewel de impact zelf afhankelijk blijkt te zijn van de soort van toegevoegde variabiliteit en de doelfunctie, blijken de gevolgen van

variabiliteit tot extreme verschillen te kunnen leiden met de vooropgestelde doelfunctiewaarde. De impact kan bovendien veel groter zijn dan de grootte van de initiële verandering. Specifiek blijkt dat de variabiliteit in de release times een invloed heeft op zowel due date als niet due date gebaseerde doelfuncties. Als gevolg van variabiliteit in de release times wordt tevens in de originele planning de werkelijke doelfunctiewaarde continu onderschat. Een goede verstandhouding met leveranciers, net als een b-plan om veranderingen in de beschikbaarheid van middelen tegen te gaan, is dan ook aangewezen. Uit de resultaten blijkt ook dat een planning opstellen met als streefdoel het optimaliseren van een bepaalde doelfunctie er juist toe kan leiden dat de waarde in werkelijkheid verder afwijkt van de geoptimaliseerde doelfunctiewaarde. Naast de analyse van de impact van deze variabiliteit, wordt er ook onderzocht of een productieplan tot een goede schatting van de doelfunctiewaarde kan leiden als het rekening zou houden met de variabiliteit. Het onderzoek toont aan dat het correct voorspellen van het relatieve verschil tussen de werkelijke en de vooropgestelde doelfunctiewaarde mogelijk is indien men beschikt over een gekende, constante en normaal verdeelde variabiliteit in de processing times, de release times en de due dates.

In het tweede onderzoek wordt de impact van variabiliteit tijdens de uitvoering van het productieplan bestudeerd. Tijdens dit onderzoek wordt er enkel variabiliteit toegevoegd via veranderingen in de release times. De opvolging van het productieplan gebeurt op basis van een zelf opgestelde procescontrole waarbij de doelfuncties gebruikt worden als prestatieparameters en de observaties weergegeven worden in Shewart control charts. De resultaten tonen aan dat naarmate er meer variabiliteit in het proces zit, de controlelimieten verder uit elkaar zullen liggen en de kans op typefouten zal toenemen. Meer variabiliteit zal er dus voor zorgen dat de procescontrole onbetrouwbaarder wordt. De resultaten geven ook aan dat de doelfuncties niet geschikt zijn als prestatieparameters aangezien de typefouten vaak te hoog liggen. Het tweede onderzoek toont bovendien dat hoe verder men in de uitwerking van het productieplan zit, hoe meer de tussentijdse doelfunctiewaarde tot een betere inschatting zal leiden van de eindwaarde. Echter, zal gedurende de uitwerking van het productieplan, de procescontrole op zich onbetrouwbaarder worden. Bij alle doelfuncties wordt ook opgemerkt dat wanneer de kans op variabiliteit toeneemt, er ook meer kans is dat de variabiliteit in één job wordt tegengewerkt door de variabiliteit in een

andere job. Dit zal ervoor zorgen dat de eindwaarde minder schommelt en dat de controlelimieten nauwer zullen liggen. Om een betrouwbare procescontrole te bekomen is het dan ook belangrijk om de variabiliteit in het proces zoveel mogelijk te reduceren.

Aangezien dat variabiliteit onvermijdelijk is en uit resultaten van onderzoek 1 blijkt dat dit tot extreme gevolgen kan leiden, is de continue opvolging van de uitvoering van de productieplanning noodzakelijk. Een poging hiertoe werd uitgevoerd in onderzoek 2 door middel van een eigen procescontrole met de doelfunctiewaarden als prestatieparameters. De opgestelde procescontrole bleek echter niet geheel betrouwbaar. De doelfuncties zijn dan ook niet de meest geschikte prestatieparameters. De opgestelde procescontrole kan echter wel een beginpunt zijn voor het opstellen van een gelijkaardige Earned Value Managementmethode bij productieplanning en de hierbij verkregen inzichten zullen zeker een bijdrage kunnen leveren. Verder verschaft dit eindwerk het inzicht dat het mogelijk is om in een single machine structuur de eindwaarde van een doelfunctie correct in te schatten rekening houdend met variabiliteit. Dit onderzoek kan een aanzet geven tot verder en uitgebreider onderzoek, in aanmerking genomen de hierna vermelde beperkingen.

7 Beperkingen van het onderzoek

Hoewel de onderzoeken zo generiek mogelijk zijn gehouden, zijn er toch enige beperkingen.

- Aangezien één van de kernconcepten van dit eindwerk productieplanning betreft, wordt er aandacht geschonken aan bedrijven die een productieplan opstellen met behulp van een doelfunctie. Hierdoor kunnen de inzichten niet zomaar toegepast worden bij bedrijven die gebruik maken van een **productiebeleid**, waarbij er geen doelfunctie geoptimaliseerd wordt.
- Er worden vijf **doelfuncties** bestudeerd, namelijk maximum lateness, mean flow time, makespan, mean tardiness en proportion of tardy jobs. Hoewel dit aantal al een verscheidenheid aan mogelijkheden weergeeft, is dit tevens een beperking. Er zal verder onderzoek nodig zijn indien een bedrijf gebruik maakt van een andere doelfunctie.
- Ook op het vlak van de **verwerkingskenmerken** zijn er keuzes gemaakt. Bij het eerste onderzoek worden enkel aan drie verwerkingskenmerken wijzigingen aangebracht, namelijk de release time, de processing time en de due date. De gebruikte variabelen weerspiegelen een hele groep aan oorzaken die kunnen leiden tot veranderingen in een productieplan. De resultaten kunnen dus als basis dienen om de impact in te schatten van één van deze oorzaken. Echter, er zou verder onderzoek moeten uitgevoerd worden indien een bedrijf ervaart dat de variabiliteit op een andere manier veroorzaakt wordt. Bij het tweede onderzoek wordt het aantal variabelen zelfs verder beperkt door maar aan één verwerkingskenmerk veranderingen aan te brengen.
- De toegevoegde variabiliteit is niet enkel afhankelijk van de keuze aan variabelen maar ook van de **statistische verdeling** van de variabelen. Er wordt in dit eindwerk enkel gebruik gemaakt van een normale en een triangulaire verdeling.
- Het onderzoek baseert zich ook op een productieplanning die geoptimaliseerd is volgens de doelfunctie **maximum lateness**, waardoor de impact op de andere doelfuncties vertekend kan zijn. Hier moet ook rekening mee gehouden worden als men gebruik zou maken van de resultaten van de andere doelfuncties.
- Alsook zijn alle onderzoeken gebaseerd op een **single machine structuur**. Hoewel dit beschouwd kan worden als een basissituatie om andere machinestructuren te analyseren,

zal er toch verder onderzoek nodig zijn om de inzichten te kunnen gebruiken in andere machinestructuren.

- Ook wordt er tijdens de onderzoeken steeds gesteld dat het bedrijf de **veranderingen ondergaat** en geen acties onderneemt om de veranderingen tegen te gaan. Op deze manier kan de werkelijke impact van de wijzigingen bestudeerd worden.
- Een volgende intrinsieke beperking is dat dit gehele werkstuk enkel gebaseerd is op **theoretisch onderzoek** en dat de resultaten niet gestaafd zijn door een business case.
- Wanneer men specifiek kijkt naar de procescontrole kan men nog een bijkomende beperking opmerken. Er wordt namelijk in het realiseren van de **retrospectieve testen** geen onderzoek gedaan naar de reden van variabiliteit. Men zal de variabiliteit dan ook niet reduceren en het proces niet stabiel kunnen maken. Doordat de variabiliteit niet geëlimineerd wordt, zullen ook de controlelimieten die gebaseerd zijn op het proces met gecumuleerde variabiliteit hier een impact van ondervinden. De opgestelde procescontrole is dus niet volkomen realistisch, maar kan wel als geschikt bevonden worden om de hier aangenomen situatie te analyseren.

8 Mogelijkheden voor verder onderzoek

Zoals reeds vermeld, situeren de twee onderzoeken zich in een single **machine structuur**. Dit kan beschouwd worden als een basissituatie om verdere structuren mee uit te bouwen. De single machine structuur kan ook gebruikt worden op een andere structuur waarbij men zich dan vooral focust op de bottleneck machine als de belangrijkste machine. Verder onderzoek naar andere machinestructuren is echter aangewezen. Bijvoorbeeld in een parallel machine structuur wordt er verwacht dat de effecten van variabiliteit zullen afnemen doordat bij parallelle capaciteit men gebruik kan maken van variability pooling. De variabiliteit ervaren door de ene machine zal namelijk afgezwakt worden door de andere machine waardoor de totale variabiliteit lager zal zijn dan bij de single machine structuur. In een flow shop machinestructuur wordt dan weer verwacht dat de impact van variabiliteit zal toenemen. Vorig onderzoek duidt aan dat de variabiliteit in het begin van het productieproces zich zal voortplanten door het gehele proces en geaccumuleerd zal worden naarmate men meer productiestappen zal doorlopen (Hopp en Spearman, 2001).

Behalve een andere machinestructuur, kan men in toekomstig onderzoek ook andere **verwerkingskenmerken** bestuderen. Zo zou men kunnen controleren of de variabiliteit in set-up times toch tot andere inzichten zou leiden dan degene die we nu verkregen hebben door de processing times te bestuderen. Ook tijdens het tweede onderzoek wordt er enkel gelet op wijzigingen in de release times. Echter, is gebleken uit onderzoek 1 dat veranderingen in de due dates toch ook een grote impact hebben op bepaalde doelfuncties en dus kan het interessant zijn om onderzoek 2 opnieuw uit te voeren maar nu enkel de due dates te laten variëren.

Verder onderzoek lijkt ook geschikt voor de tot nu toe **onverklaarbare resultaten**. Bijvoorbeeld het relatieve verschil van mean tardiness beschrijft een onverklaarbaar patroon. Misschien kunnen andere niet-lineaire regressies wel tot een verklaring leiden en het verband tussen de variabiliteit in de processing time en het relatieve verschil van de mean tardiness kwantificeren. Ook tijdens het tweede onderzoek worden inconsistente resultaten bekomen voor variabele I waardoor verder onderzoek zich dan ook opdringt.

Finaal lijkt het ook nodig om een onderzoek uit te voeren die de **theoretische variabelen, l , k en q** , linkt aan een specifieke bedrijfssituatie. Het is bijvoorbeeld mogelijk om bij verschillende bedrijven de spreiding van de release times en de due dates te kwantificeren en na te gaan of de waarden voor l , k en q wel realistisch zijn. Alsook zou men kunnen onderzoeken of één combinatie van l , k en q hoort bij één specifieke bedrijfssector. Hierdoor zou men de resultaten van dit eindwerk kunnen opdelen per combinatie en kunnen verbinden met een hele sector. Indien men daartoe in staat is, kan men dan ook de verkregen inzichten toetsen aan de werkelijkheid.

Lijst van de geraadpleegde werken

- Aissi, H., Aloulou, M.A. en Kovalyov, M.Y., 2011, Minimizing the number of late jobs on a single machine under due date uncertainty, *Journal of Scheduling*, jg. 14, nr. 4, augustus 2011, p. 351-360.
- Bean, J.C., Birge, J.R., Mittenthal, J. en Noon, C.E., 1991, Matchup scheduling with multiple resources, release dates, and disruptions, *Operations Research*, jg. 39, nr. 3, mei-juni 1991, p. 470-483.
- Bersimis, S., Psarakis, S. en Panaretos, J., 2007, Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview, *Quality And Reliability Engineering International*, jg. 23, nr. 5, 517-543.
- Blackburn, J.D., Kropp, D.H. en Millen, R.A., 1986, A Comparison of Strategies to Dampen Nervousness in MRP Systems, *Management Science*, jg. 32, nr.4, april 1986, p. 413-429.
- Burr, I.W., 1967, The effect of non-normality on constants for X and R charts, *Indus. Quality control*, jg. 23, nr. 11, p. 563-9.
- Cai, X., Wu, X. en Zhou, X., Scheduling deteriorating jobs on a single machine subject to breakdowns, *Journal of Scheduling*, jg. 14, nr. 2, april 2011, p. 173-186.
- Cao, Q., Patterson, J.W. en Bai, X., 2005, Reexamination of processing time uncertainty, *European Journal of Operational Research*, jg. 164, nr. 1, juli 2005 ,p. 185-194.
- Champ, C.W. en Woodall, W.H., 1987, Exact Results for Shewhart Control Charts with Supplementary RunsRules, *Technometrics*, jg. 29, nr. 4 , oktober 1987, p. 393-399
- Church, L.K. en Uzsoy, R., 1992, Analysis of periodic and event-driven rescheduling policies in dynamic shops, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, jg. 5, nr. 3, mei 1992, p. 153-163.
- Colledani, M. en Tolio, T., 2009, Performance Evaluation of Production Systems Monitored by Statistical Process Control and Off-Line Inspections, *International Journal of Production Economics*, jg. 120, nr. 2, 348-367.
- European Organization for Nuclear Research, 1999, Colt package, [URL <:http://acs.lbl.gov/software/colt>](http://acs.lbl.gov/software/colt). (15/07/2011)
- Cowling, P. en Johansson, M, 2002, Using real time information for effective dynamic scheduling, *European Journal of Operational Research*, jg. 139, nr. 2, juni 2002, p. 230-244.

- Daniels, R.L. en Carrillo, J.E., 1997, beta-Robust scheduling for single-machine systems with uncertain processing times, IIE Transactions, jg. 29, nr. 11, januari 1997, p. 977-985.
- Davenport, A.J. en Beck, J.C., 2000, A survey of techniques for scheduling with uncertainty, ongepubliceerd manuscript.
- Evans, J. R., 2007, Statistics, Data Analysis, & Decision Modeling (ed.3), Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Grubbstrom, R.W. en Tang, O., 2000, Modelling rescheduling activities in a multi-period production-inventory system, International Journal of Production Economics, jg. 68, nr. 2, november 2000 ,p. 123-135.
- Hall, N.G. en Potts, C.N., 2004, Rescheduling for new orders, Operations Research, jg. 52, nr. 3, mei-juni 2004, p. 440-453.
- Haridy, S. en Wu, Z., 2009, Univariate and multivariate control charts for monitoring dynamic-behavior processes: a case study, Journal of Industrial Engineering and Management, jg. 2, nr. 3, 464-498.
- Herrmann, J. W., 1997, A Genetic Algorithm for Minimax Optimization Problems., Proc. 1999 Congress on Evolutionary Computation, p. 1099-1103.
- Ho, C., 1989, Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness. International Journal of Production Research, jg. 27, nr. 1, januari 1989, p.1115-1135.
- Hopp, W.J. en Spearman, M.L., 2001, Factory physics : foundations of manufacturing management (ed.2), McGraw-Hill/Irwin, Boston(Mass.).
- Institute of Quality and Reliability, 2005, Tables of Constants for Control charts, URL: <http://world-class-quality.com/images/download/20081104091341_Control%20Chart%20Constants%20and%20Formulae.pdf>
- Jiju, A. en Tolga, T., 2003, A conceptual framework for the effective implementation of statistical process control, Business Process Management Journal, jg. 9, nr. 4, 473 – 489.
- Kopanos, G.M., Capón-García, E. en Espuña, A., 2008, Costs for Rescheduling Actions: A Critical Issue for Reducing the Gap between Scheduling Theory and Practice, Industrial & Engineering Chemistry Research, jg. 47, nr. 22, oktober 2008, p. 8785-8795

- Kouvelis, P. en Yu, G., 1997, Robust Discrete Optimization and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- Leimi, T. en Sabuncuoglu, I., 2002, Effect of load, processing time and due date variation on the effectiveness of scheduling rules, International Journal of Production Research, jg. 40, nr. 4, april 2002, p. 945-974.
- Leus, R. en Herroelen, W., 2007, Scheduling for stability in single-machine production systems, Journal of Scheduling, jg. 10, nr.3, mei 2007, p. 223-225.
- Levinson, W. A., 2010, Statistical process control for real-world applications, CRC Press: Taylor and Francis.
- McKay, K. N., Buzacott, J.A. en Safayeni, F.R., 1989, The scheduler's knowledge of uncertainty: The missing link, Knowledge Based Production Management Systems, p. 171-189, North-Holland, Amsterdam
- Mehta, S.V. en Uzsoy, R.M., 1998, Predictable scheduling of a job shop subject to breakdowns, Robotics and Automation, jg. 14, nr. 3, p. 365-378.
- Montgomery, D.C., 2005, Introduction to statistical quality control (ed.5), John Wiley, Hoboken.
- Muhlemann, A.P., Lockett, A.G. en Farn, C.K., 1982, Job shop scheduling heuristics and frequency of scheduling, International Journal of Production Research, jg. 20, nr. 2, april 1982, p.227-241.
- Mula, J., Poler, R., Garcia-Sabater, J.P. en Lario, F.C., 2006, Models for production planning under uncertainty: A review, International Journal of Production Economics, jg. 103, nr. 1, September 2006, p. 271-285.
- Ou, Y., Wu, Z. en Tsung, F., 2012, A comparison study of effectiveness and robustness of control charts for monitoring process mean, International Journal of Production Economics, jg. 135, nr. 1, 479-490.
- Ouelhadj, D. en Petrovic, S., 2004, A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems , Journal of Scheduling, jg. 12, nr.4, augustus 2004, p. 417-431.
- Pinedo, M., 2002, Scheduling: theory, algorithms, and systems (ed.2), Prentice-Hall, Upper Saddle River.

- Sarin, S.C., Nagarajan, B., Jain, S. en Liao, L., 2009, Analytic evaluation of the expectation and variance of different performance measures of a schedule on a single machine under processing time variability, *Journal of Combinatorial Optimization*, jg. 17, nr. 4, mei 2009, p. 400-416.
- Schilling, E.G. en Nelson, P.R., 1976, The Effect of Non-Normality on the Control Limits of Charts, *Journal of Quality technology*, jg. 8, nr. 4, oktober 1976, p. 183-188.
- Schumacher, J., 2000, A framework for batch-operation analysis within the context of disturbance management, *Computers and Chemical Engineering*, jg. 24, nr. 2-7, juli 2000, p. 1175-1180.
- Sels, V. en Vanhoucke, M., 2012, A hybrid genetic algorithm for the single machine maximum lateness problem with release times and family set-ups, URL: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2011.12.014>>. (3/01/2012)
- Sevaux, M. en Sorensen, K., 2004, A genetic algorithm for robust schedules in a one-machine environment with ready times and due dates, *Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies*, jg. 2, nr. 2, juli 2004, p. 129-147.
- Shewhart, W.A., 1931, *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, D. van Nostrand Company, Inc., Toronto.
- Silver, E.A., Pyke, D.F. en Peterson, R., 1998, *Inventory management and production planning and scheduling*, Wiley, Hoboken.
- Spieksma, F.C.R., 2003, Over versnijden, volgordes en veilingen: combinatorisch optimaliseren in de praktijk, *Tijdschrift voor Economie en Management*, jg. 48, nr. 1, p. 97-118.
- Swaminathan, R., Pfund, M.E., Fowler, J.W., Mason, S.J. en Keha, A., 2007, Impact of permutation enforcement when minimizing total weighted tardiness in dynamic flow shops with uncertain processing times, *Computers and Operations Research*, jg. 34, nr. 10, oktober 2007, p.3055-3068.
- Thompson, J.R. en Koronacki, J., 1993, *Statistical process control for quality improvement*, Chapman & Hall, New York.
- Vieira, G.E., Herrmann, J.W. en Lin, E., 2003, Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies, and methods, *Journal of Scheduling*, jg. 6, nr. 1, januari 2003 p. 39-62.
- Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L. en Ye, K., 2007, *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*(ed.8), Pearson, Prentice Hall.

- Wan, Y., 1995, Which is better, off-line or real-time scheduling?, International Journal of Production Research, jg. 33, nr. 7, juli 1995, p. 2053-9.
- Wu, C.W., Brown, K.N. en Beck, J.C., 2009, Scheduling with uncertain durations: Modeling β - robust scheduling with constraints, Computers & Operations Research, jg. 36, nr. 8, augustus 2009, p. 2348-2356.
- Zhou, M. en Venkatesh, K., 1999, Modeling, simulation and control of flexible manufacturing systems: a Petri net approach, World Scientific Publishing Co., Singapore.

Bijlage

1. Overzicht analysewaarden simulatie batch1676_0

Situatie	Max lateness		Makespan		Mean flow time		Mean tardiness		Prop. of tardy jobs	
	Rel. verschil	Stand.Afw.	Rel. verschil	Stand.Afw.	Rel. verschil	Stand.Afw.	Rel. verschil	Stand.Afw.	Rel. verschil	Stand.Afw.
1	1,934	359,283	0,075	324,932	0,048	87,755	1,170	86,541	0,024	0,012
2	1,800	392,857	0,078	359,855	0,044	83,117	1,083	82,532	0,019	0,015
3	1,828	387,804	0,077	331,720	0,046	76,190	1,136	76,131	0,016	0,017
4	2,268	363,888	0,102	293,288	0,071	79,820	1,738	80,212	0,029	0,012
5	2,133	343,735	0,101	291,915	0,070	76,818	1,720	76,675	0,026	0,013
6	2,219	278,466	0,104	302,844	0,067	91,314	1,654	90,508	0,024	0,015
7	2,457	526,166	0,102	508,576	0,070	146,540	1,735	146,502	0,025	0,011
8	2,612	474,581	0,117	494,090	0,079	128,067	1,943	127,514	0,023	0,012
9	2,592	492,445	0,116	534,438	0,075	143,304	1,842	142,497	0,020	0,016
10	3,396	425,824	0,166	414,345	0,118	123,374	2,889	123,742	0,033	0,011
11	3,330	516,364	0,159	458,607	0,112	124,232	-0,971	124,168	0,030	0,012
12	3,318	400,112	0,166	411,732	0,119	125,213	2,927	125,595	0,030	0,012
13	1,911	323,889	0,070	338,195	0,043	85,080	1,068	82,384	0,012	0,017
14	2,244	376,697	0,076	310,914	0,048	86,183	-0,971	84,285	0,011	0,018
15	2,225	420,287	0,075	348,600	0,048	94,565	1,193	94,267	0,007	0,020
16	2,451	331,612	0,100	270,725	0,073	78,121	1,795	77,250	0,022	0,014
17	2,757	397,956	0,106	246,915	0,071	75,766	-0,971	74,384	0,019	0,013
18	2,432	402,893	0,099	334,444	0,069	86,328	1,708	84,853	0,022	0,017
19	3,041	463,813	0,127	480,250	0,085	128,837	2,111	126,261	0,020	0,014
20	3,048	519,238	0,128	493,330	0,082	133,435	-0,971	132,725	0,016	0,016
21	2,688	422,808	0,117	478,292	0,070	133,174	1,741	130,067	0,013	0,018
22	3,545	411,634	0,162	416,804	0,110	127,147	2,702	125,357	0,028	0,013
23	3,492	391,624	0,154	395,522	0,118	132,112	-0,971	131,710	0,027	0,015
24	3,397	414,717	0,153	416,089	0,119	114,274	2,936	114,540	0,026	0,017
25	3,293	825,963	0,074	332,717	0,044	85,978	1,150	85,001	0,016	0,015
26	2,954	724,647	0,070	360,630	0,045	89,323	-0,971	89,447	0,013	0,014
27	3,421	734,528	0,087	315,133	0,053	78,310	1,355	78,170	0,012	0,014
28	3,811	831,111	0,105	264,430	0,073	64,541	1,846	65,797	0,021	0,015
29	3,898	762,499	0,113	292,786	0,076	77,934	-0,971	75,262	0,019	0,013
30	3,990	931,086	0,103	295,564	0,070	78,977	1,784	79,451	0,015	0,017
31	4,232	868,917	0,138	512,871	0,085	143,973	2,151	142,798	0,018	0,014
32	4,124	997,276	0,128	544,535	0,078	147,466	-0,971	147,166	0,013	0,017
33	3,996	884,073	0,106	531,050	0,078	140,154	1,966	140,956	0,016	0,019
34	4,743	961,553	0,165	402,275	0,123	118,739	3,056	114,439	0,025	0,013
35	4,498	890,415	0,165	410,503	0,113	117,490	-0,971	117,199	0,023	0,014
36	4,548	870,713	0,166	411,194	0,119	112,069	2,953	112,028	0,021	0,015
37	4,253	799,796	0,074	348,189	0,045	85,313	1,237	84,940	-0,001	0,018
38	4,120	888,321	0,075	344,734	0,044	80,216	-0,971	79,661	-0,003	0,019
39	4,540	917,186	0,077	361,809	0,048	88,327	1,336	88,978	-0,004	0,020
40	4,865	849,308	0,100	282,819	0,069	86,538	1,802	87,278	0,003	0,019
41	4,459	828,914	0,100	340,612	0,066	91,357	-0,971	89,567	0,003	0,017
42	5,122	1109,973	0,103	266,513	0,072	81,564	1,903	86,753	0,003	0,019
43	5,112	855,090	0,118	440,310	0,083	131,324	2,175	128,196	0,003	0,018
44	5,011	842,913	0,122	485,165	0,075	123,540	-0,971	122,913	0,000	0,019
45	4,986	1014,127	0,121	539,144	0,081	149,178	2,110	147,629	-0,001	0,023
46	5,552	840,764	0,172	408,193	0,119	112,358	3,020	113,033	0,012	0,017
47	6,114	1045,211	0,163	444,750	0,119	130,983	-0,971	128,460	0,013	0,017
48	6,072	1083,972	0,169	426,530	0,122	111,844	3,100	112,238	0,009	0,018
49	4,838	1298,013	0,076	341,702	0,047	86,971	1,287	90,991	0,011	0,015
50	5,136	1357,033	0,069	327,645	0,048	89,050	-0,971	85,292	0,011	0,016
51	5,029	1423,291	0,068	346,628	0,045	89,778	1,259	92,462	0,007	0,019
52	4,303	1055,999	0,100	298,290	0,069	89,606	1,799	93,994	0,015	0,015
53	5,158	1246,793	0,104	281,081	0,070	83,883	-0,971	85,382	0,013	0,015
54	5,620	1345,577	0,109	270,213	0,075	71,800	1,969	77,523	0,014	0,015
55	5,495	1258,381	0,119	499,753	0,080	142,500	2,084	141,772	0,016	0,015
56	5,282	1476,235	0,111	476,015	0,082	135,568	-0,971	137,136	0,016	0,015
57	5,455	1392,872	0,124	484,392	0,077	130,734	2,002	132,316	0,011	0,017
58	6,075	1366,580	0,164	406,592	0,116	135,924	2,951	133,537	0,019	0,013
59	6,222	1368,290	0,162	444,872	0,122	108,485	-0,971	106,776	0,022	0,012
60	5,942	1348,524	0,161	378,688	0,115	118,484	2,927	118,686	0,018	0,016
61	6,705	1433,167	0,081	328,411	0,048	88,005	1,462	87,076	-0,006	0,016
62	6,589	1347,405	0,079	319,520	0,049	87,671	-0,971	90,116	-0,007	0,019
63	7,100	1408,803	0,082	360,543	0,045	76,441	1,409	85,383	-0,011	0,025
64	7,195	1530,952	0,102	304,512	0,069	80,996	1,967	83,169	-0,003	0,021
65	7,288	1411,244	0,098	290,645	0,066	81,969	-0,971	81,567	-0,005	0,019
66	6,823	1325,356	0,105	266,885	0,071	83,910	1,971	87,211	-0,005	0,022
67	7,699	1600,938	0,119	510,036	0,073	137,658	2,053	136,017	-0,006	0,019
68	6,808	1224,450	0,119	515,104	0,070	133,666	-0,971	132,404	-0,006	0,019
69	7,595	1489,620	0,113	495,183	0,076	129,406	2,118	129,096	-0,006	0,021
70	7,795	1431,535	0,168	350,905	0,119	116,388	3,121	117,190	0,004	0,018
71	7,752	1459,144	0,166	442,278	0,114	125,703	-0,971	126,673	0,002	0,020
72	8,013	1349,659	0,162	424,035	0,118	117,290	3,123	110,889	0,004	0,021

2. Resultaten simulatie batch1676_0

	Maximum lateness		Makespan		Mean flow time		Mean tardiness		PTJ	
	Rel. V	St. Afw.	Rel. V	St. Afw	Rel. V	St. Afw	Rel. V	St. Afw	Rel. V	St. Afw
Pdev										
P			0,014	0,004	0,015					0
Stand.Coef			-0,075	0,067	-0,097					0,249
pRT										
P			0	0	0	0	0	0	0	
Stand.Coef			0,373	-0,218	0,469	-0,129	-0,124	0,964		
Rdev										
P	0,024	0,015	0	0	0	0	0	0	0,005	
Stand.Coef	0,128	0,098	0,835	1,082	0,833	1,11	1,084	1,486	0,148	
pDd										
P	0		0,005		0,001				0	0
Stand.Coef	0,242		-0,1		-0,155				-0,97	0,454
Ddev										
P	0	0							0	0
Stand.Coef	0,66	0,897							-0,78	0,218

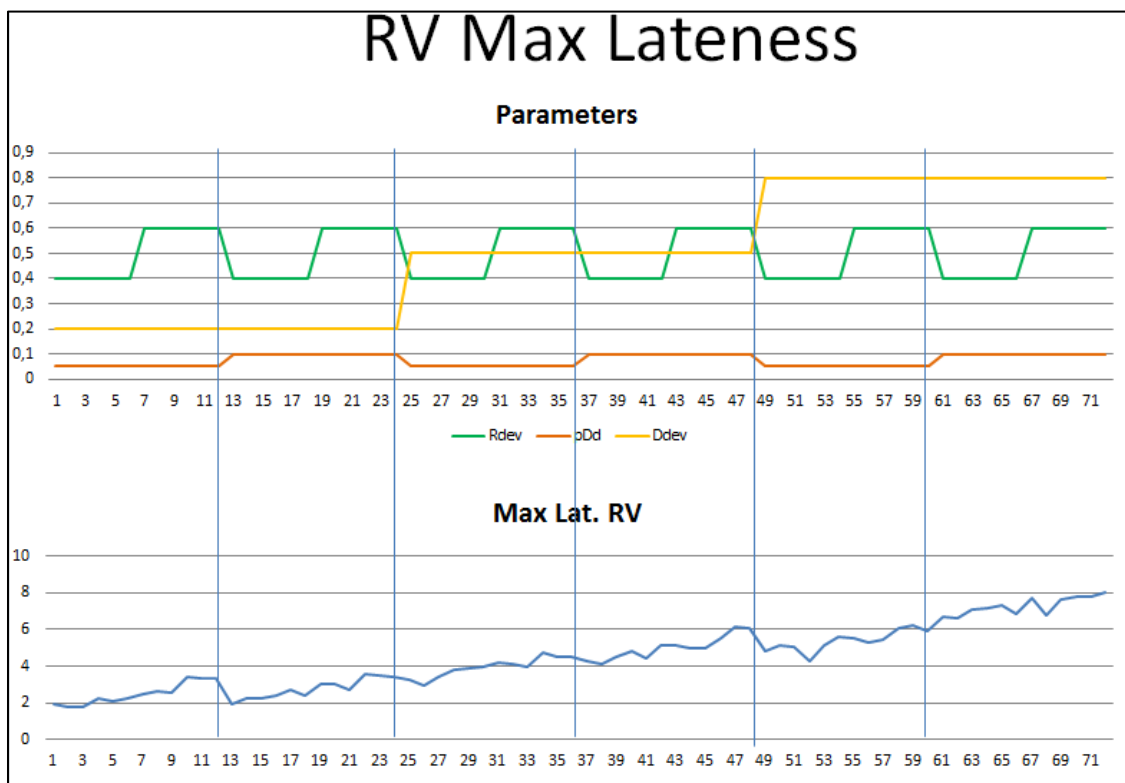
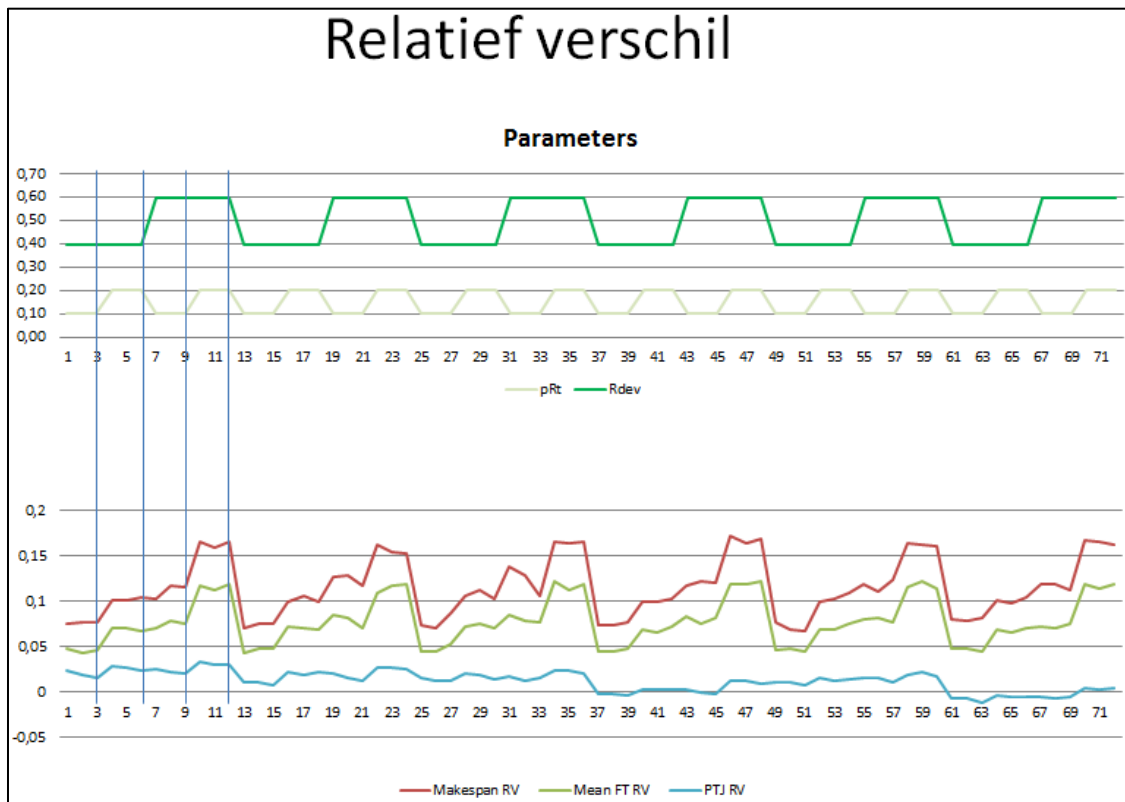
VERKLARING										
adj R ²	0,984	0,992	0,99	0,994	0,982	0,995	0,377	0,995	0,908	0,987

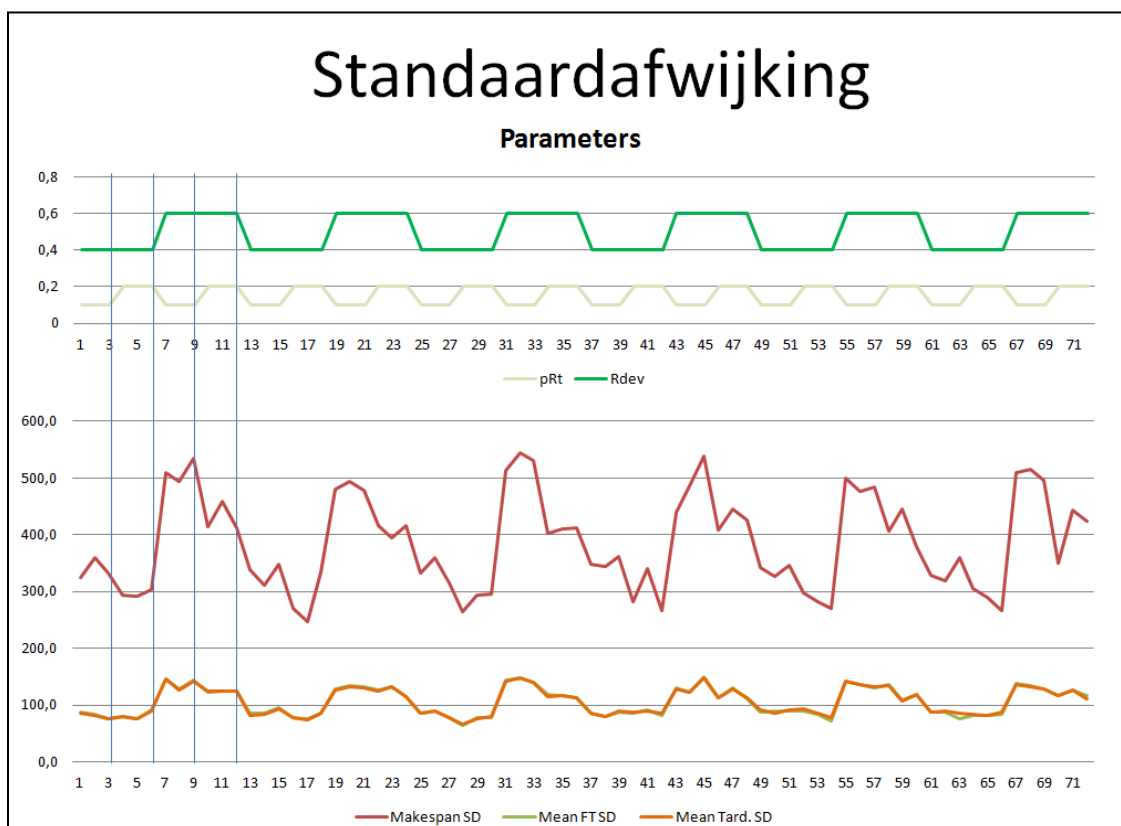
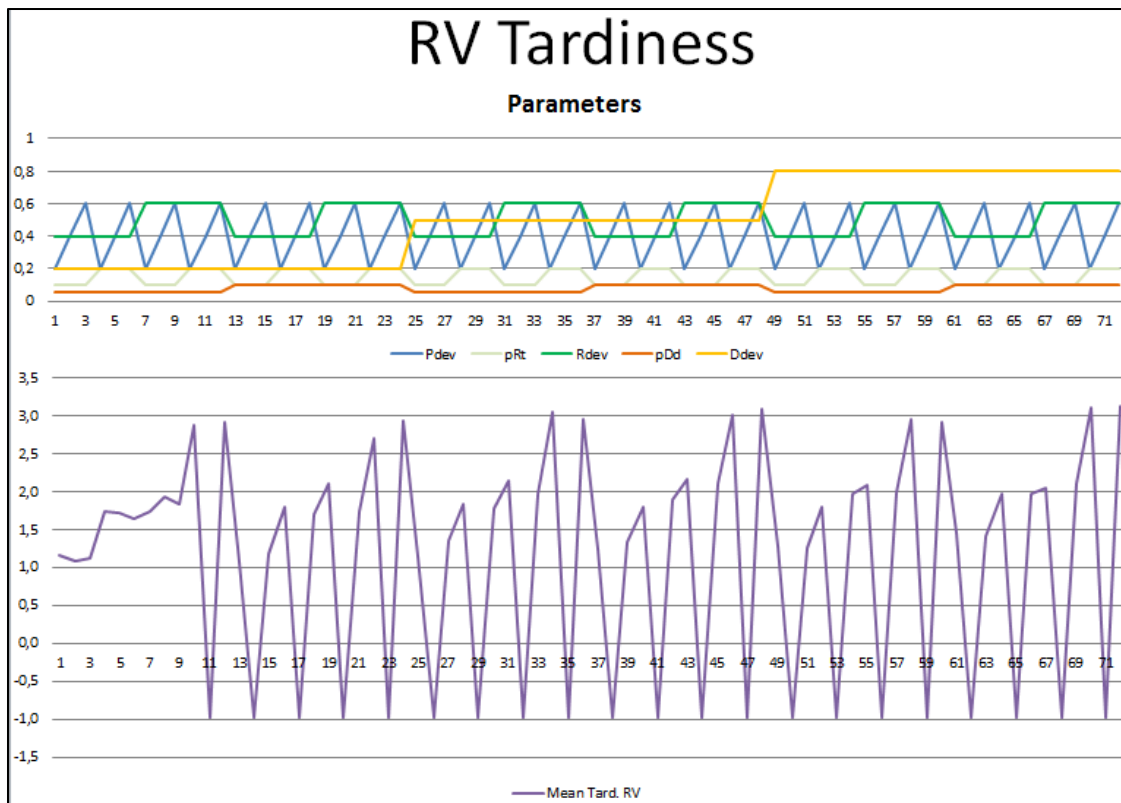
3. Resultaten simulatie batch1676_0 zonder pDd en Pdev

	Makespan	Mean flow time
	Rel. V.	Rel. V.
Pdev		
P	0,003	0,003
Stand.Coef	-0,096	-0,13
pRT		
P	0	0
Stand.Coef	0,343	0,421
Rdev		
P	0	0
Stand.Coef	0,754	0,704

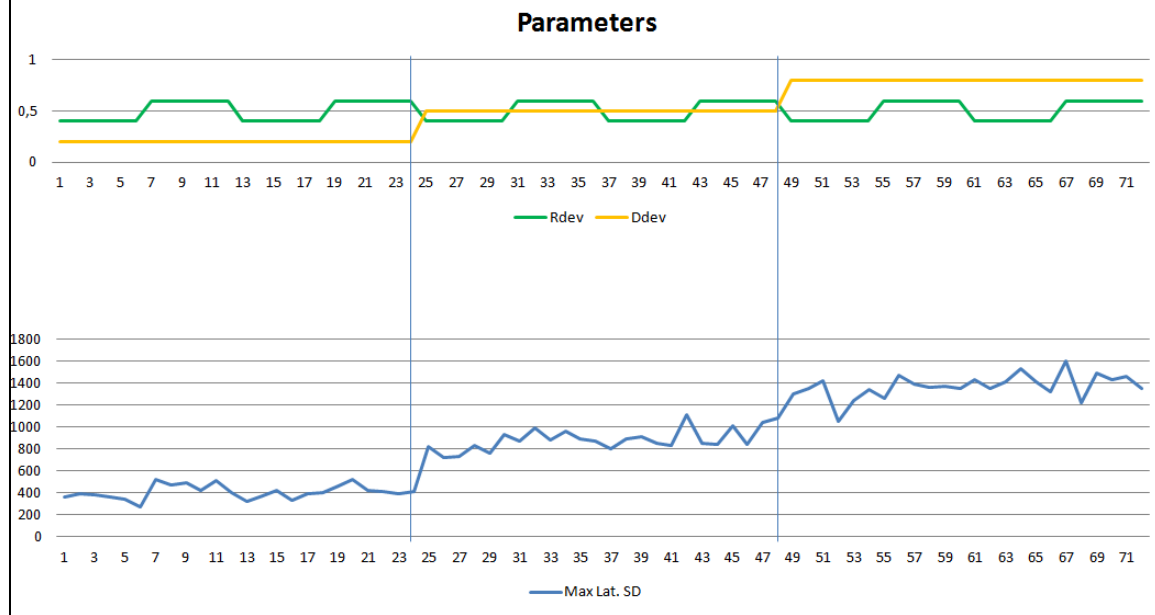
VERKLARING		
adj R ²	0,988	0,978

4. Visualisaties gevonden statische verbanden onderzoek 1

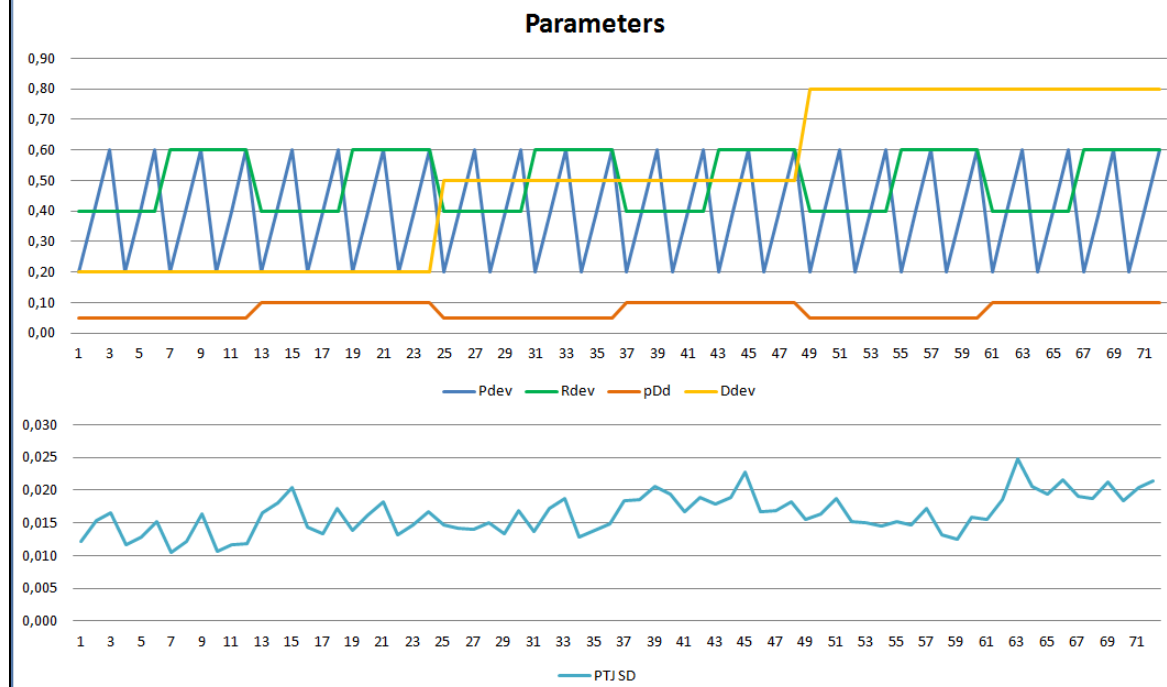




Standaardafwijking MaxLat.



Standaardafwijking PTJ



5. Control charts constanten



Tables of Constants for Control charts								
Table 8A - Variable Data					ref : AIAG manual for SPC			
X bar and R Charts					X bar and s charts			
Chart for Averages	Chart for Ranges (R)				Chart for Averages	Chart for Standard Deviation (s)		
Control Limits Factor	Divisors to Estimate σ_x	Factors for Control Limits			Control Limits Factor	Divisors to estimate σ_x	Factors for Control Limits	
Subgroup size (n)	A_2	d_2	D_3	D_4	A_3	c_4	B_3	B_4
2	1.880	1.128	-	3.267	2.659	0.7979	-	3.267
3	1.023	1.693	-	2.574	1.954	0.8862	-	2.568
4	0.729	2.059	-	2.282	1.628	0.9213	-	2.266
5	0.577	2.326	-	2.114	1.427	0.9400	-	2.089
6	0.483	2.534	-	2.004	1.287	0.9515	0.030	1.970
7	0.419	2.704	0.076	1.924	1.182	0.9594	0.118	1.882
8	0.373	2.847	0.136	1.864	1.099	0.9650	0.185	1.815
9	0.337	2.970	0.184	1.816	1.032	0.9693	0.239	1.761
10	0.308	3.078	0.223	1.777	0.975	0.9727	0.284	1.716
15	0.223	3.472	0.347	1.653	0.789	0.9823	0.428	1.572
25	0.153	3.931	0.459	1.541	0.606	0.9896	0.565	1.435

	Centerline	Control Limits		σ_x
X bar and R Charts	$CL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}}$	$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$	$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$	$\frac{\bar{R}}{d_2}$
	$CL_R = \bar{R}$	$UCL_R = D_4 \bar{R}$	$LCL_R = D_3 \bar{R}$	
X bar and s Charts	$CL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}}$	$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_3 \bar{s}$	$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_3 \bar{s}$	$\frac{\bar{s}}{c_4}$
	$CL_s = \bar{s}$	$UCL_s = B_4 \bar{s}$	$LCL_s = B_3 \bar{s}$	

6. Geselecteerde batches onderzoek 2

Instances	Release time		Due date		Family	Setup time
	I	range	K	q		
Batch0317	0,25	$[0, 0.25 \sum pt]$	-1	10	10	[1,20]
Batch0442	0,25	$[0, 0.25 \sum pt]$	1	1	5	[1,20]
Batch1025	1	$[0, \sum pt]$	-1	1	10	[1,200]
Batch1275	1,25	$[0, 1.25 \sum pt]$	-1	10	2	[1,200]
Batch1952	2	$[0, 2 \sum pt]$	-1	0	2	[1,200]
Batch2185	2	$[0, 2 \sum pt]$	1	10	10	[1,200]
Batch2285	0,25	$[0, 0.25 \sum pt]$	-1	1	10	[1,200]
Batch2305	0,25	$[0, 0.25 \sum pt]$	0	1	2	[1,100]
Batch2769	1,75	$[0, 1.75 \sum pt]$	-1	1	10	[1,20]
Batch2856	2	$[0, 2 \sum pt]$	-1	10	5	[1,20]

7. Relatief verschil doelfunctiewaarden – lineaire regressie

		ML					M					MFT				
l	P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	stand coeff.	0,315	0,257	0,186	0,248	0,182	0,394	0,363	0,26	0,353	0,253	0,297	0,189	0,084	0,189	0,082
k	P	0	0	0	0	0	0,004	0	0	0	0			0,003		0
	stand coeff.	0,091	0,099	0,114	0,107	0,119	0,029	0,04	0,035	0,036	0,035			0,012		0,017
q	P	0	0,001	0,016	0,045	0,001	0	0	0,005	0	0,04	0	0	0,004	0	
	stand coeff.	0,077	0,036	-0,021	0,022	-0,029	-0,147	-0,096	-0,031	-0,094	-0,023	-0,186	-0,126	-0,015	-0,126	
pRt	P	0	0		0,001		0,014	0,004	0,001	0,001	0			0		0
	stand coeff.	-0,1	-0,066		-0,059		-0,049	-0,057	-0,056	-0,066	-0,067			-0,029		-0,032
Rdev	P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	stand coeff.	0,282	0,261	0,239	0,268	0,244	0,449	0,391	0,229	0,361	0,201	0,476	0,299	0,114	0,299	0,11
25 50 75	P	0			0	0	0			0	0	0			0,004	0
	stand coeff.	0,454			0,19	0,076	0,201			0,142	0,089	0,313			-0,025	0,04
	P		0		0	0		0		0	0		0		0	0
50 75	stand coeff.		0,561		0,436	0,058		0,269		0,222	0,056		0,589		0,608	-0,189
	P			0		0			0		0			0		0
	stand coeff.			0,712		0,619			0,516		0,457			0,853		1,003
adj. R2		0,586	0,658	0,789	0,677	0,794	0,577	0,59	0,672	0,604	0,68	0,687	0,803	0,932	0,803	0,936

		MT					PTJ				
L	P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	stand coeff.	0,214	0,153	0,093	0,149	0,093	0,217	0,108	0,053	0,108	0,051
K	P	0,019		0		0	0		0		0
	stand coeff.	-0,025		0,025		0,025	-0,036		0,021		0,021
Q	P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	stand coeff.	0,178	0,112	0,047	0,107	0,047	0,195	0,098	0,045	0,099	0,044
pRt	P	0	0	0	0	0	0	0	0,008	0	0,017
	stand coeff.	-0,129	-0,092	-0,042	-0,087	-0,041	-0,088	-0,043	-0,011	-0,043	-0,009
Rdev	P	0,015	0,001	0	0,001	0	0	0,001	0,003	0,001	0,004
	stand coeff.	0,052	0,059	0,056	0,058	0,056	-0,079	-0,035	-0,011	-0,035	-0,011
25 50 75	P	0			0	0	0				0
	stand coeff.	0,537			0,122	0,042	0,646				0,016
	P		0		0	0		0		0	0
50 75	stand coeff.		0,714		0,629	-0,095		0,865		0,877	-0,116
	P			0		0			0		0
	stand coeff.			0,881		0,936			0,959		1,058
adj. R2		0,497	0,673	0,879	0,681	0,881	0,65	0,879	0,983	0,879	0,984

8. Verschil controlelimieten – lineaire regressie

		Absoluut verschil				
		ML	M	MFT	MT	PTJ
L	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Stand.Coeff	0,468	0,443	0,365	0,367	0,557
K	p	0,034		0,022	0,022	0,038
	Stand.Coeff	-0,130		-0,153	-0,154	0,177
Q	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
	Stand.Coeff	-0,330	-0,327	-0,352	-0,362	0,304
pRt	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032
	Stand.Coeff	-0,439	-0,394	-0,531	-0,532	-0,256
Rdev	p	0,000	0,000	0,001	0,001	
	Stand.Coeff	0,481	0,429	0,307	0,308	
%	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003
	Stand.Coeff	0,537	0,566	0,834	0,837	0,309
adj R ²		0,723	0,699	0,675	0,673	0,469

		Relatief verschil				
		ML	M	MFT	MT	PTJ
L	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Stand.Coeff	0,555	0,440	0,404	0,579	0,585
K	p	0,016	0,000	0,000	0,045	
	Stand.Coeff	-0,131	-0,195	-0,245	-0,107	
Q	p	0,005	0,000	0,000		0,000
	Stand.Coeff	-0,163	-0,286	-0,308		0,387
pRt	p					
	Stand.Coeff					
Rdev	p	0,000	0,000	0,000	0,000	
	Stand.Coeff	0,391	0,685	0,751	0,386	
%	p					0,004
	Stand.Coeff					-0,298
adj R ²		0,784	0,831	0,851	0,791	0,466

9. Type I fout – lineaire regressie

		MaxLat.	Makespan	MeanFT	Mean Tard	PTJ
L	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Stand.Coef	0,229	0,184	0,204	0,202	0,568
K	p					
	Stand.Coef					
Q	p			0,007	0,002	
	Stand.Coef			-0,068	-0,079	
pRt	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002
	Stand.Coef	0,383	0,461	0,447	0,445	0,272
Rdev	p	0,000	0,000	0,001	0,000	
	Stand.Coef	0,182	0,220	0,146	0,156	
Percentage	p	0,000	0,000	0,000	0,000	
	Stand.Coef	0,264	0,180	0,267	0,272	
adj R ²		0,924	0,916	0,931	0,930	0,723

10. Type II fout – lineaire regressie

		Type II fout				
		ML	M	MFT	MT	PTJ
L	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006
	Stand.Coef	-0,727	-0,688	-0,653	-0,646	-0,206
K	p					
	Stand.Coef					
Q	p	0,005	0,003	0,008	0,007	
	Stand.Coef	0,337	0,339	0,294	0,298	
pRt	p					
	Stand.Coef					
CV	p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Stand.Coef	0,799	0,809	0,913	0,907	0,647
AV	p	0,025	0,017	0,014	0,012	0,000
	Stand.Coef	0,415	0,428	0,424	0,430	0,421
adj R ²		0,628	0,657	0,685	0,686	0,905

11. Valse meldingen – lineaire regressie

		Valse meldingen				
		ML	M	MFT	MT	PTJ
L	p	0,000	0,000	0,002	0,003	0,023
	Stand.Coeff	0,623	0,588	0,493	0,494	0,455
K	p					
	Stand.Coeff					
Q	p					
	Stand.Coeff					
pRt	p					
	Stand.Coeff					
CV	p	0,001	0,000	0,003	0,003	
	Stand.Coeff	0,612	0,730	0,627	0,627	
AV	p		0,046			
	Stand.Coeff		-0,348			
adj R ²		0,651	0,669	0,570	0,560	0,323