



HET ONTWERP VAN EEN
HOOG-AUTOMATISCHE PRODUCTIELIJN

Student:

Leo van Zadelhoff, s1460609

L.d.vanZadelhoff@student.utwente.nl

Bachelor Technische Bedrijfskunde

Begeleiders:

Universiteit Twente:

Dr. ir. M.R.K. Mes,

Faculty of Behavioral Management
and Social Sciences

Dr. ir. J.M.J. Schutten

Faculty of Behavioural Management and
Social Sciences

Ergo Design:

Menno Hoeksema

Voorwoord

Dit verslag is het resultaat van mijn bacheloropdracht bij Ergo Design B.V., waarmee ik mijn bacheloropleiding Technische bedrijfskunde aan de University of Twente afsluit. Gedurende deze opdracht heb ik geholpen een nieuwe productielijn te ontwerpen en heb ik de logistieke impact van deze lijn geanalyseerd. Verder heb ik gekeken naar de theoretische impact van interventies.

Vanuit Ergo Design ben ik uitstekend begeleid door Menno Hoeksema, die mij zowel programma-inhoudelijk als project technisch goed wist bij te sturen indien nodig. Ik wil Menno dan ook graag bedanken voor alle tijd en moeite die hij in de totstandkoming van mijn eindresultaat heeft gestopt. Verder wil ik graag de rest van mijn tijdelijke collega's bij Ergo Design bedanken voor de plezierige tijd die ik daar heb gehad.

Daarnaast wil ik graag Martijn Mes, mijn eerste begeleider vanuit University of Twente, bedanken voor het actief meedenken over hoe ik meer uit mijn opdracht zou kunnen halen, en Marco Schutten voor het meeziën en deelnemen aan de beoordelingscommissie.

Leo van Zadelhoff,

Maart 2018

Managementsamenvatting

Ergo Design is een Enschedese adviespraktijk die zich voornamelijk bezig houdt in de productie en logistiek. Machinebouwer heeft een opdracht gekregen van Producent om een hoog-automatische productielijn te ontwerpen die bepaalde producten gemiddeld binnen 70 seconden kan samenstellen. Omdat dit niet binnen de expertise van Machinebouwer ligt heeft ze Ergo Design ingeschakeld om de impact van verschillende systeemindelingen te toetsen.

Het doel van dit project is om een flexibele productielijn van relatief lage kosten te ontwerpen die voldoet aan de eisen van Producent. Dit resulteert in onze hoofdonderzoeksvraag: *“Hoe moet de nieuwe productielijn van Producent samengesteld worden?”*

We beginnen ons onderzoek met het vergaren van zo veel mogelijk informatie. We kijken wat de productielijn precies moet doen en we kijken wat voor een machinale mogelijkheden Machinebouwer voor ogen heeft voor dit project.

Vervolgens verkennen wij de literatuur om te onderzoeken wat er allemaal komt kijken bij de invulling van de productielijn. De focus ligt hier op bottlenecks, de daardoor benodigde bufferplekken en hoe we componenten toewijzen aan stations en op welke volgorde deze vervolgens verwerkt moeten worden. We schetsen hier ook een raamwerk om de doorlooptijden van het systeem analytisch te benaderen op basis hiervan beredeneren we de minimale aantallen van de benodigde stations. Dit zijn 2 Part Supply stations en 3 Part Placement stations.

Daarna gaan we door op de theorie van het opzetten van een simulatiemodel, om vervolgens ook dit simulatiemodel te bouwen. We valideren het simulatiemodel ondermeer aan de hand van het eerder genoemde analytische model. Nadat we met het simulatie een nulmeting hebben gedaan met de minimale vereisten, testen we de impact van bepaalde bufferplekken. Sommige bufferplaatsen vereist en blijken andere bufferplaatsen een positieve impact te hebben op de cyclustijd.

We hebben ook drie soorten interventies geformuleerd om te testen:

1. Het toevoegen van een extra Part Placement station.
2. Het mogelijk maken om de downtime van het éne Part Supply station in te zetten om de lasten van het andere Part Supply station te verlagen.
3. Het variëren van plaatsingslocaties van componenten om zo de bezettingsgraden van de Part Placement stations te nivelleren.

We testen daarnaast de combinatie van interventie 1 & 3 en we testen de combinatie van interventie 2 & 3.

Op basis van de interventies beredeneren we nieuwe toewijzingen voor de producten aan de stations en kunnen we de ook de verwachte gemiddelde cyclustijden van productie beredeneren. Hieruit stellen we een matrix van cyclustijden samen, op basis van productsamenstellingen en de

toegepaste interventies. Hierin kunnen we zien welke interventie voorkeur krijgt over andere interventies. Een klein deel van de resulterende tabel is te zien in tabel A.

Tabel A

		Niets Extra		Extra loopband?		Extra PartPlacer	
N	H	Geen interv.	Interv. 3	Interv. 2	Interv. 2 & 3	Interv. 1	Interv. 1 & 3
45	0	65.66	66.33	61.9	61.9	50.85	50.85
45	1	64.11	64.11	61.57	61.57	49.33	48.64
45	2	61.9	61.9	61.57	61.57	49.33	48.64
45	3	61.57	61.57	61.57	61.57	49.33	48.64
46	0	66.33	67.8	65.66	62.94	50.85	50.85
46	1	65.66	65.59	65.66	62.94	50.85	50.85
46	2	65.66	63.38	65.66	62.94	50.85	50.85
46	3	65.66	62.94	65.66	62.94	50.85	50.85

Na de simulatie en analytische benadering blijkt interventie 1 op basis van relatief benodigde investering in verhouding met de cyclustijdreductie de meest belovende interventie. In sommige gevallen heeft de toevoeging van interventie 3, die dan geen extra kosten met zich meebrengt, een verdere toegevoegde waarde.

We missen echter wel veel informatie om daadwerkelijk conclusies te trekken over het wel of niet moeten toevoegen van het extra Part Placement station, dus we doen dan ook de aanbeveling om hier verder onderzoek naar te doen.

Een andere belangrijke aanbeveling die we doen is het meten van de daadwerkelijke doorlooptijden en mispicks van stations. De waarden van deze parameters hebben namelijk invloed op de optimale systeeminvulling.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
Inhoudsopgave	5
Begrippen en definities	8
1 – Introductie en probleemopzet	9
1.1 – Bedrijfsbeschrijving	9
1.2 – Aanleiding onderzoek en verhouding stakeholders	9
1.3 – Probleemidentificatie	9
1.4 – Onderzoeksdoel.....	10
1.5 – Onderzoeksvragen.....	11
2 - Context Analyse	13
2.1 - Het systeem.....	13
2.2 – De huidige situatie	14
2.3 – Het ontwerp.....	14
2.3.1 - Part Supply	15
2.3.2 – Part Placement	16
2.3.3 – Componenten die met de hand worden verenkeld	17
2.4 – Parameters Stations	17
2.5 - Conclusie	19
3 – De theorie achter het ontwerp	20
3.1 – Drum, Buffer, Rope	20
3.2 – Bottlenecks in de praktijk	20
3.3 – Analytisch berekenen doorlooptijden	21
3.4 – Buffers.....	24
3.4.1 – Benodigde buffers in de Part Supply	24
3.4.2 – Benodigde buffers in de Part Placement	24
3.5 – Machine Planning	25
3.5.1 – Invulling planning	26
3.6 – Productievolgorde	26
3.6.1 – Online versus offline machine scheduling	27
3.6.2 – Theorie productievolgorde.....	27

3.6.3 - Toepassing productievolgorde.....	28
3.7 – Simulatie	29
3.7.1 – Wat is simulatie?.....	30
3.7.2 – Waarom gebruiken we simulatie?.....	30
3.7.3 – Discrete-Event Simulatie	30
3.7.4 – Het conceptueel model.....	31
3.7.5 – Validatie en verificatie	31
4 – Simulatie	33
4.1 – Conceptueel model.....	33
4.1.1 – Doel simulatiemodel	33
4.1.2 – Input en output van het model	34
4.1.3 – Proces flow.....	35
4.1.4 – Limitaties	37
4.2 – Het Simulatiemodel zelf	39
4.3 – Opwarmperiode, herhalingen en loopduur	43
4.4 – Validatie en verificatie van het simulatiemodel.....	44
4.4.1 – Verificatie	44
4.4.2 – Modelvalidatie	47
5 - Interventies	49
5.1 – Nulmetingen.....	49
5.2 – Opzet Interventies	51
5.2.1 – Interventie 1: Een extra Part Placement station	52
5.2.2 – Interventie 2: Flexibiliteit in Part Supply – Part Placement leveringen.....	53
5.2.3 – Interventie 3: Flexibiliteit in Part Placement plaatsingsstrategie.....	54
5.2.4 – Interventies 2 en 3 gecombineerd	56
5.2.5 – Interventies 1 en 3 gecombineerd	57
5.3 – Conclusie van Interventies	59
6 – Resultaten experimenten	63
6.1. – Experimenten Buffers	63
6.2 – Experimenten interventies	65
7 – Conclusies en aanbevelingen	73

7.1 – De minimaal benodigde systeemsamenstelling	73
7.2 – Conclusie simulatie	73
7.3 – Discussie Interventies	74
7.4 – Aanbevelingen	74
8 – Referenties	76
Appendix 1: Bepalen van de opwarmtijd.....	77
Appendix 2: Het aantal benodigde replicaties	79
Appendix 3: Productsamenstellingen van gangbare producten	80
Appendix 4: Uitgewerkt voorbeeld voor bepalen machineplanning	81
Appendix 5: Resultaten nulmetingen.....	83
Appendix 6: Berekening stationvulling bij interventies	85
Appendix 7: Voorkeuren interventies.....	89

Begrippen en definities

Component: Eén onderdeel van het eindproduct, bijvoorbeeld een dopje, een slangetje, etc.

SKU (Stock Keeping Unit): Een productcode dat naar één type component verwijst. Bijvoorbeeld blauwe dopjes met een specifieke diameter.

Bulk: een grote centrale voorraad van een SKU.

BOM (Bill of Materials): Een lijst die per eindproduct beschrijft uit welke SKU's deze is opgebouwd en hoeveel componenten er per SKU nodig zijn.

Tray: Een plateau waarop één type component geordend wordt geladen.

Carrier: Een plateau waarop alle componenten van de BOM geplaatst worden.

Cylcustijd: De tijd tussen de aflevering van twee opeenvolgende volle carriers.

AGV (Automated Guided Vehicle): Een zelfsturende robotkar die volle carriers naar het volgende station rijdt.

Picken: Het met de robot oppakken van een component en het vervolgens plaatsen op de daarvoor bestemde plek.

Pick-and-place robot: Een robot die het picken doet.

Mispick: Wanneer een robot probeert te picken maar hier niet in slaagt.

1 – Introductie en probleemopzet

In dit hoofdstuk gaan we eerst even kort in op het bedrijf, waarna we doorgaan op de aanleiding van het onderzoek, de verhoudingen van de stakeholders en de probleemidentificatie. Daarna zullen we dieper ingaan op het onderzoeksdoel en benoemen we onderzoeksvragen en in welk hoofdstuk deze beantwoord worden.

1.1 – Bedrijfsbeschrijving

Ergo Design is een relatief klein Enschedees bedrijf dat productie en logistiek gerelateerd advies levert, van cell-niveau tot site-niveau. Opdrachten variëren dus ook van het maken van productie/logistieke masterplannen tot werkplekindeling of zelfs de indeling van de complete werkvloer. Ergo Design kent een mix van Industrial Engineering & Management en Mechanical Engineering medewerkers.

1.2 – Aanleiding onderzoek en verhouding stakeholders

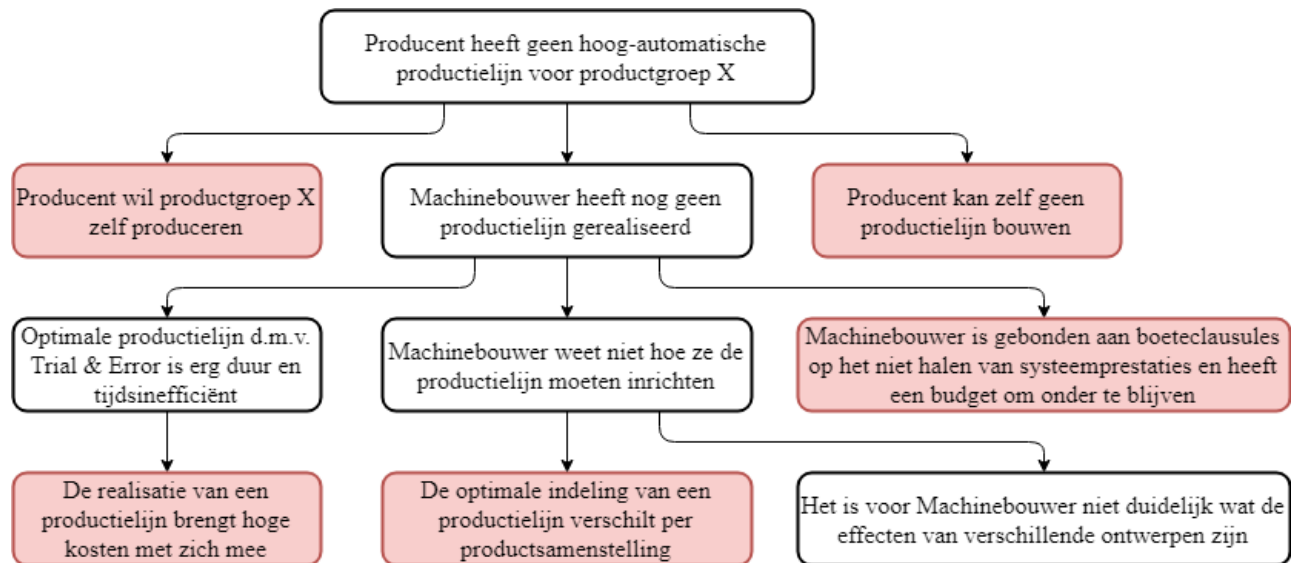
Deze opdracht komt voor uit een samenwerking van drie partijen: Producent, Machinebouwer en Ergo Design (adviespraktijk).

Producent, een grote speler in de sector, wil een nieuwe hoog-geautomatiseerde productielijn in haar fabriek. Daarvoor heeft Producent Machinebouwer benaderd, dat is een bedrijf die gespecialiseerd is in productielijn-gerelateerde machinebouw. Producent verwacht van Machinebouwer een offerte met daarin een lijn die aan enkele later te noemen eisen voldoet. In het hieruit resulterende contract zullen boeteclausules zitten voor het niet behalen van de eisen. Omdat Machinebouwer niet voldoende expertise heeft om de impact van bepaalde systeemconfiguraties te beredeneren hebben ze Ergo Design benaderd om dit voor ze te doen.

1.3 – Probleemidentificatie

Een handelingsprobleem bestaat wanneer er een discrepantie zit tussen de huidige situatie en de gewenste situatie. In dit geval is de gewenste situatie het hebben van een hoog-automatische productielijn om productgroep X te produceren. Omdat deze lijn er niet is, is er een discrepantie en is dit dus een handelingsprobleem.

Vanuit het handelingsprobleem willen we naar een kernprobleem komen. We kijken naar de oorzaken van het probleem (dit zijn vaak ook problemen, dus dit is een iteratief proces), en stellen zo een probleemkluwen op. De tot stand gekomen probleemkluwen staat in *figuur 1: probleemkluwen*.



Figuur 1: Probleemkluwen

Vervolgens stellen we het kernprobleem vast door middel van de vier vuistregels voor het kiezen van een kernprobleem (Heerkens, 2012). Eerst vallen alle problemen af die niet te beïnvloeden zijn door ons. Daaronder valt bijvoorbeeld het feit dat de optimale indeling van een productielijn afhangt van het maken van een product. Al deze problemen waar wij geen invloed op kunnen uitoefenen staan rood gemarkeerd.

Er blijft één probleem over, waarvan we zeker zijn dat het probleem zich voordoet, en zelf geen directe oorzaak heeft (want dan zouden we de kluwen verder moeten uitbreiden). Dat is het probleem dat het voor Machinebouwer niet duidelijk is wat de effecten van de verschillende ontwerpen zijn. Het probleem is te beïnvloeden en het oplossen van dit probleem zal resulteren in het oplossen van het handelingsprobleem. Dit probleem is dus een geschikt kernprobleem.

Om het kernprobleem meetbaar te maken zullen we steeds de KPI *Cyclustijd* gebruiken om de effecten van de ontwerpen te beoordelen. Dit komt voort uit de boeteclausules die door Producent zijn gelegd op het niet halen van een gemiddelde cyclustijd. Later (in paragraaf 4.1.2.2) zullen we hier meer KPI's aan toevoegen.

1.4 – Onderzoeksdoel

Het doel van het gezamenlijke project is om een flexibele productielijn van relatief lage kosten te ontwerpen die voldoet aan de eisen van Producent.

Ergo Design en Machinebouwer hebben samen gekeken naar de mogelijkheden op gebied van productielijn ontwerp. Op basis hiervan zijn de invullingen voor subonderdelen van het systeem, de stations, tot stand gekomen. Deze bouwstenen zullen we gebruiken om een theoretische

productielijn te bouwen. Wanneer we deze later omzetten naar een simulatiemodel en de door Machinebouwer aangeleverde data als input te gebruiken voor dit model, kunnen we de uiteindelijke impact van het ontwerp op de output berekenen.

Vervolgens gaan we kijken welke verbeteringslagen er nog gedaan kunnen worden in de toekomst en deze als advies meegeven aan Producent en Machinebouwer.

1.5 – Onderzoeksvragen

Om het onderzoeksdoel te bereiken moeten we antwoord geven op onze hoofdonderzoeksvraag: *“Hoe moet de nieuwe productielijn van Producent samengesteld worden?”*

Hiervoor moeten we eerst deelvragen beantwoorden. Deze vragen worden door de hoofdstukken heen beantwoord.

2 – Context Analyse

In dit hoofdstuk wordt ons operatiekader geschetst: we kijken wat het doel is van de lijn en welke middelen we tot onze beschikking hebben om het gestelde doel te bereiken. De vragen die in dit hoofdstuk beantwoord zullen worden zijn:

- Welk deel van de productielijn observeren wij?
- Wat is het doel van het deel van de productielijn die wij observeren?
- Welke bouwstenen kunnen we gebruiken om tot een oplossing te komen?
- Hoe ziet het initiële productieconcept eruit?

3 – De theorie achter het ontwerp

In dit hoofdstuk verkennen we verschillende theorieën met betrekking tot proces flow en laten deze los op het ontwerp, om daarmee de productielijn te vormen naar onze behoeften. Hiervoor beredeneren we, mede aan de hand van bottlenecks, benodigde bufferposities. Ook gebruiken we de theorie om de vereiste planning- en schedulingmethodes te bepalen, die we later zullen toepassen in ons theoretische model. Als laatste verkennen we de theorie achter simulatie, een tool waarin we de overige theorie zullen verwerken om uiteindelijk een antwoord te vinden op onze hoofdvraag.

Bijbehorende vragen zijn:

- Wat zijn bottlenecks en waar zitten ze in onze productielijn?
- Waarop baseren we welke bufferplaatsen benodigd zijn?
- Hoe bepalen we een goede machineplanning?
- Hoe bepalen we een goede productievolverde?
- Wat is simulatie en waarom gebruiken we het?

4 – Simulatie

In dit hoofdstuk doorlopen we het proces van het opzetten van het simulatiemodel, we gaan in op hoe we weten dat het model geschikt is voor gebruik en natuurlijk hoe we dit model daadwerkelijk kunnen gebruiken. Daarbij bepalen we ook de Key Performance Indicators, waarmee we de output kunnen beoordelen. Daaropvolgend zullen we een nulmeting doen met de vastgestelde input en kijken we naar de gevoeligheid van het model.

- Hoe ziet ons conceptueel model eruit?
- Welke Key Performance Indicators gebruiken we om de output te beoordelen?
- Hoe wordt het productieconcept gemodelleerd?
- Wat zijn de limitaties van ons model?
- Is ons model valide?

5 – Interventies

In dit hoofdstuk zullen we vooruitblikken op groei en het verder verbeteren van de productielijn. Beoogde verbeteringen die hier genoemd zijn, zijn niet direct ingevoerd omdat we met het huidige model kunnen voldoen aan de gestelde eisen en Machinebouwer de kosten in het initiële aanbod zo laag mogelijk wil houden. De hieronder genoemde interventies hebben als doel om met een relatief kleine investering relatief grote prestatieverbeteringen te realiseren.

- Welke interventies kunnen we invoeren ter verbetering van de prestaties van het systeem?
- Welke impact verwachten we van de invoering van de interventies op zowel de KPI's van het systeem als de impact van het systeem zelf?

6 – Resultaten

In dit hoofdstuk komen de resultaten van de simulatieruns aan bod.

- Welk effect hebben de buffers gehad?
- Wat is de impact van de voorgestelde interventies?

7 – Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden op basis van de experimenten de conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

- Welke conclusies kunnen we trekken uit de simulatieresultaten?
- Welke aanbevelingen doen we op basis van ons onderzoek?

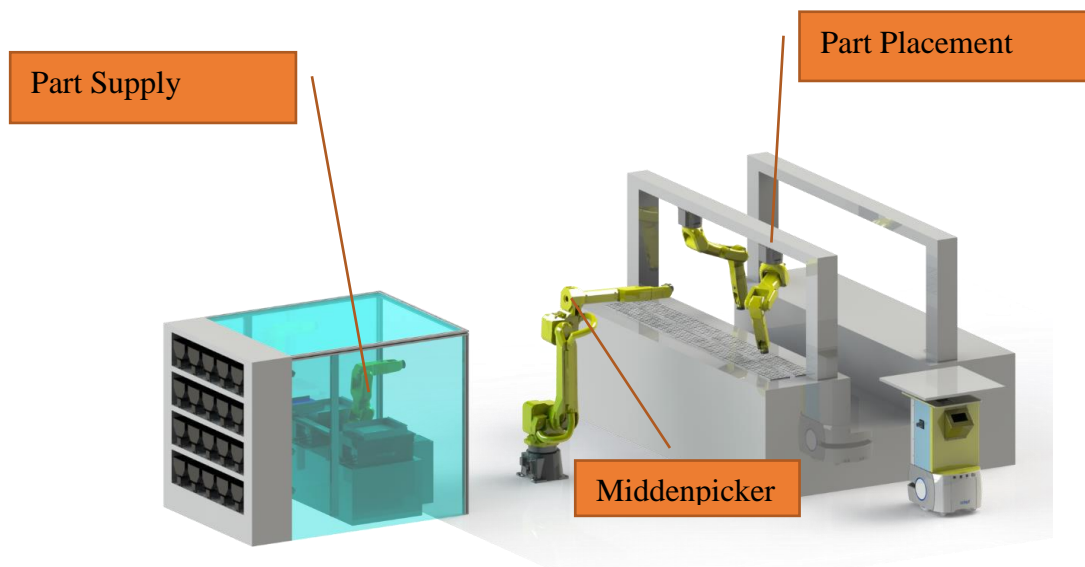
2 - Context Analyse

Dit hoofdstuk dient om een beeld te schetsen van de nieuwe productielijn bij Producent. Het deel van de productielijn waar wij naar zullen kijken loopt van gevulde bulkbakken tot het moment waar de gehele Bill Of Materials (BOM) van een product in een carrier op een Automatic Guided Vehicle (AGV) ligt, die deze naar de assemblage brengt. Na de globale opzet van het systeem, dat in paragraaf 2.1 besproken wordt, zullen we in 2.2 eerst kijken wat er bekend is over de huidige productie van de te ontwerpen automatische lijn. Daarna zullen we in 2.3 bekijken hoe de bouwstenen van de toekomstige lijn eruit zien. In paragraaf 2.4 gaan we verder kijken naar wat er reeds bekend is qua parameters voor deze stations en in paragraaf 2.5 zullen we conclusies trekken op basis van dit hoofdstuk.

2.1 - Het systeem

De fabriek krijgt zo'n 50 verschillende soorten componenten in grote zakken bulk aangeleverd. Van deze componenten worden verschillende eindproducten gemaakt. Het doel is om deze eindproducten met de nieuwe productielijn automatisch in elkaar te zetten. Daarvoor moet de assemblerobot de gehele BOM van het eindproduct klaar hebben liggen.

De componenten zullen twee stations doorlopen die we vanaf nu aanduiden met het *Part Supply* station en het *Part Placement* station.



Figuur 2: Een overzicht van hoe de bouwstenen van de productielijn zich tot elkaar verhouden

Tussen deze twee typen stations staat een robotarm, de zogenaamde *Middenpicker*, die zorgt dat de componenten van het ene naar het andere station worden gebracht. In figuur 2 staat een

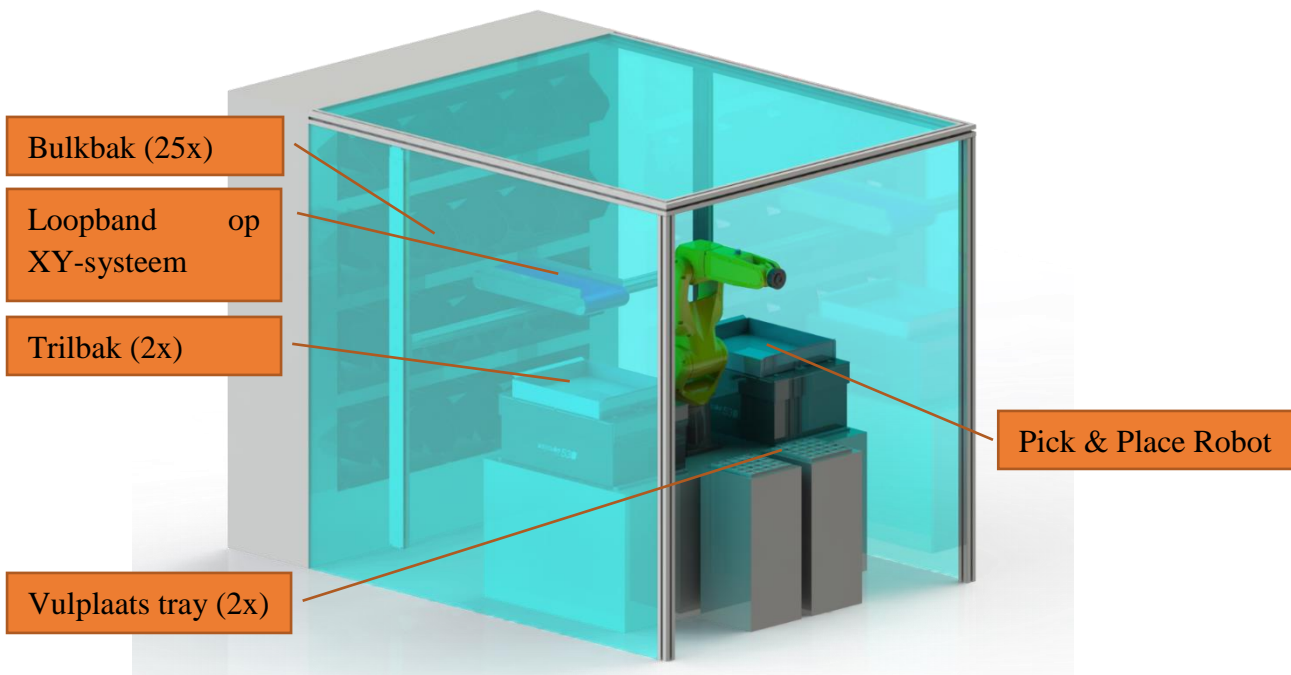
overzicht van een systeem met één Part Supply station, één Middenpicker, en twee Part Placement stations.

2.2 – De huidige situatie

Momenteel worden de componenten van de vereiste producten handmatig bij elkaar gepakt uit verschillende bakken, gevuld met elk een eigen soort bulkproduct. Deze worden per BOM bij elkaar gelegd en vervolgens ook handmatig geassembleerd. Omdat Producent de productie wil opschalen en om de variabele productiekosten te drukken wil Producent overschakelen naar automatische productiemethoden. Over de huidige situatie is aan Ergo Design verder niks bekend gemaakt qua procestijden of productieaantallen. Over het conceptontwerp is echter meer duidelijkheid, de invulling hiervan zal aan bod komen in paragraaf 2.3 en de procestijden komen aan bod in paragraaf 2.4.

2.3 – Het ontwerp

We zullen nu het ontwerp beschrijven dat tot stand gekomen is door overleg tussen Machinebouwer, Producent en Ergo Design. Producent was hierbij voornamelijk verantwoordelijk voor de informatie over de producten en afmetingen, Machinebouwer gaf de machinale mogelijkheden aan en Ergo Design gaf inzichten vanuit de technisch bedrijfskundige theorie. Hierbij kan men denken aan procesflow, bottlenecks en valkuilen bij het inrichten van een productielijn. Deze onderwerpen zullen aan bod komen in hoofdstuk 3. Nu zullen we eerst in 2.3.1. het Part Supply station bespreken en daarna in 2.3.2. het Part Placement station. In 2.3.3. Zullen we een uitzonderingssituatie bespreken die ervoor zorgt dat het Part Supply station wordt overgeslagen.



Figuur 3 – Het Part Supply systeem

2.3.1 - Part Supply

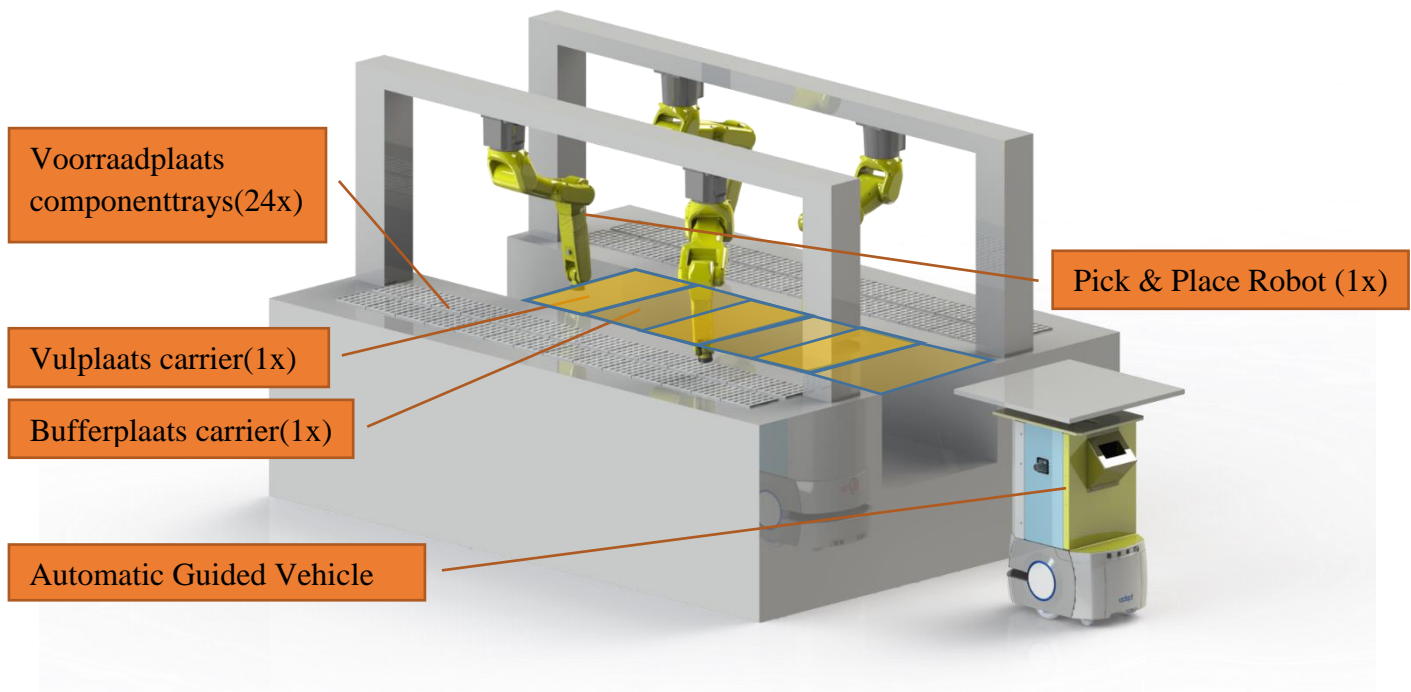
De eerder genoemde bakken met bulk blijven nog steeds bestaan en dienen nog steeds met de hand aangevuld te worden. Deze staan in figuur 3 vermeld onder “Bulkbakken”.

De taak van de Part Supply, die in figuur 3 te zien is, is om een Bulkbak vol met dezelfde ongeordende componenten geordend op een tray te plaatsen. De input van dit station zijn dus grote bakken bulk met in elke bak één componentsoort ofwel Stock Keeping Unit (SKU), en de output van dit station zijn trays met steeds 25x dezelfde SKU. Het proces van het ordenen van deze componenten zodat ze bruikbaar zijn voor het volgende station noemen we ook wel het verenkelen.

In het station worden de volgende stappen doorlopen:

1. Een planningsmethode (deze komt aan bod in paragraaf 3.5), bepaalt welke SKU als volgende benodigd is.
2. De loopband verplaatst zich op het XY systeem naar de Bulkbak waarin de benodigde SKU zit.
3. Een x aantal componenten ($x \geq 25$) van de SKU wordt vanuit de Bulkbak op de loopband gestort.
4. De loopband verplaatst zich naar een lege Trilbak en transporteert de componenten de lege trilbak in.
5. De Pick & Place robot kijkt of deze een individueel component kan herkennen op basis van vorm. Hiervoor moet het component dat in de trilbak is gestort vrij liggen van andere componenten.
6. Als er geen component vrij ligt dan trilt de trilbak, door vibraties trillen de componenten uit elkaar en komen componenten vrij te liggen van elkaar. Het trillen doet de trilbak steeds een vaste tijd en controleert dan of er een component vrij ligt, zo niet dan trilt de trilbak weer een vaste tijd. Dit gaat door tot een component los ligt van andere componenten.
7. De Pick & Place robot pakt een losliggend component en plaatst deze op de tray, die op de vulplaats ligt.
8. Ondertussen wordt de tweede trilbak gevuld met een nieuwe SKU.
9. Stap 5 t/m 7 herhaalt zich totdat de tray op de vulplaats vol is.
10. Als de tray op de vulplaats vol is dan worden de resterende componenten in de trilbak weer via de loopband teruggevoerd naar de bijbehorende Bulkbak.
11. Wanneer er bij het volgende station ruimte is voor de tray die gevuld is, dan verplaatst de Middenpicker die volle tray naar de vaste voorraadplaats van het part-placement gedeelte.
12. De Middenpicker plaatst een nieuwe lege tray op de lege vulplaats.

2.3.2 – Part Placement



Figuur 4: Vier Part Placement stations verwerkt tot één systeem

De Part Placement stations zijn verantwoordelijk voor het op een carrier plaatsen van de BOM van een vooraf bepaald eindproduct. Elk Part Placement station krijgt een apart deel van de BOM voor haar rekening. De carrier doorloopt elk Part Placement station door middel van een systeem van lopende banden en krijgt zo alle benodigde SKU's in de juiste benodigde hoeveelheid opgeladen.

Hiervoor moet elk Part Placement station weten welk deel van de BOM deze moet op de carriers moet plaatsen en op welke plekken in de voorraadplaats de bijbehorende SKU's liggen.

In elk station worden de volgende stappen doorlopen:

1. Een carrier komt het systeem binnen op de vulplaats van de robotarm.
2. Het station vult deze carrier aan de hand van een vaste vooraf bepaalde volgorde.
3. Als de benodigde component er is dan probeert de robotarm deze van diens tray te pakken, anders wacht de robotarm tot er weer een tray aangeleverd wordt van de benodigde component.
4. Als het pakken mislukt dan kan de specifieke component vervolgens niet nog een keer gepakt worden (de component ligt bijvoorbeeld te scheef om te pakken), de robot zal wel zijn handeling afmaken. Dit noemen wij een Mispick. De robot zal vervolgens, indien er

nog een nieuwe component van hetzelfde type in de voorraadplaats aanwezig is, opnieuw een poging doen.

5. Als de laatste component van een tray wordt gehaald dan wordt de lege tray opgehaald door de Middenpicker en wordt er gecontroleerd of er bij de Part Supply een volle tray met componenten van dezelfde SKU ligt.
6. Dit herhaalt zich totdat de carrier alle componenten bevat die door dit station geplaatst moeten worden.
7. De carrier schuift door naar de bufferplaats achter de vulplaats.
8. Als de volgende robotarm vrij is dan schuift de carrier hier naartoe, anders wacht deze tot de plek vrijkomt en schuift dan alsnog door.
9. Na de laatste robotarm schuift de carrier op een AGV, die de carrier naar de juiste locatie brengt. Dat is een assembleerlocatie die verder buiten het model valt.

2.3.3 – Componenten die met de hand worden verenkeld

De handeling in het Part Supply station kan in het geval van enkele SKU's niet worden uitgevoerd, dit komt door de afmetingen van de SKU. Deze grotere SKU's kunnen echter wel verwerkt worden in het Part Placement station. De SKU's worden dus niet machinaal verenkeld, maar worden met de hand geordend op trays geplaatst. Trays met deze componenten zullen aangeleverd worden naast het Part Supply station, zodat medewerkers niet tussen de machines door hoeven te lopen. Deze uitzonderings-componenten worden dus ook door de Middenpicker opgehaald.

2.4 – Parameters Stations

In samenwerking met de machinebouwer die een offerte zal aanbieden aan Producent en waarschijnlijk de lijn zal gaan realiseren, hebben we de parameters van de stations bepaald. De verwachte procestijden en kansen op mispicks en hertrillingen zijn gebaseerd op de expertise van Machinebouwer, die veel met dit soort machines werkt.

Het systeem:

- Het systeem bevat twee part supply stations, om te kunnen voldoen aan de benodigde hoeveelheid verschillende Bulkbakken. Deze Bulkbakken moeten handmatig worden bijgevuld met grote zakken bulk. Dit wordt gedaan door werknemers van Producent.
- Per Part Supply station is er één Middenpicker die de trays verplaatst. In verband met de beschikbare ruimte bij Producent moeten de Part Supply stations namelijk aan weerszijden van het systeem van Part Placement Stations staan.

- Het systeem bevat drie part placement stations. Dit moet naar verwachting genoeg zijn om de meest gangbare producten binnen de gewenste productietijd te kunnen leveren. Hierover meer in hoofdstuk 3.
- Trays hebben een capaciteit van 25 componenten. Dit in verband met de afmetingen van de machines en de componenten.

Part Supply:

- De Pick and Place tijd van de robot in de Part Supply is vastgesteld op 1.8333 seconde.
- De kans dat de componenten in de trillbak niet vergenoeg uit elkaar liggen om gepickt te worden is 25%. Dit opnieuw trillen biedt geen garantie dat de componenten daarna goed liggen.
- Indien de trillbak moet trillen dan zal dit 1 seconde duren.
- De gemiddelde Pick and Place tijd is dus:

$$P_s = \sum_{n=0}^{\infty} 0,25^n * 0,75 * (1,8333 + n) = 2,16667$$

Part Placement:

- De Pick and Place tijden van de robots in de Part Placement is vastgesteld op 4 seconden.
- Deze robot heeft een kans dat hij misgrijpt, deze kans is 2%.
- Wanneer de robot misgrijpt dan zal deze wel zijn handeling afmaken, en dus 4 seconden nodig hebben voordat hij een volgende pick doet. Het component waarop de pick wordt gedaan beschouwen we dan als verloren.
- De gemiddelde Pick and Place tijd is dus:

$$P_p = \sum_{n=0}^{\infty} 0,02^n * 0,98 * 4 * n = 4,0816$$

De gemiddelde Part Supply tijd per component is eerder vastgesteld op 2.16667 en de gemiddelde Part Placement tijd per component is nu dus vastgesteld op 4.0816, maar omdat onderdelen bij een mispick verloren gaan moet ook de Part Supply compenseren voor een mispick bij de Part Placement. De verwachte kans dat een onderdeel verloren gaat is 2%. Deze gemiddelde 2% component-verlies moet gecompenseerd worden door extra producten aan te maken. Daarom delen we de gemiddelde Part Supply tijd door 0,98.

De gemiddelde Part Supply tijd per component die dus uiteindelijk op een carrier belandt is $2,16667/0,98 = 2,2109$ seconden per onderdeel.

Om de bezettingsgraden te nivelleren zou je dus moeten streven naar een Part Supply – Part Placement ratio van ongeveer 2.21 op 4.08 of grofweg afgerond 1 op 2. Machinebouwer wil, met het oog op de vraag vanuit Producent, weten of het ook mogelijk is om een doorlooptijd van 70s voor bepaalde producten te behalen wanneer er twee Part Supply en drie Part Placement stations geïnstalleerd worden. Dit zou de kosten van een geheel Part Placement station besparen ten opzichte van het initiële ontwerp (zoals te zien in figuur 4) en Machinebouwer in staat stellen om dus een goedkopere offerte aan te bieden aan Producent. Daarom zullen we met deze samenstelling verder werken.

2.5 - Conclusie

Er is al een hoop duidelijk geworden over hoe het nieuwe systeem eruit moet komen te zien. Met de informatie uit dit hoofdstuk hebben we de benodigde informatie bij elkaar om verder te kunnen onderzoeken hoe het systeem zich ongeveer zal gedragen. In het volgende hoofdstuk gaan we in de literatuur op zoek naar relevante theorieën die de cyclustijden kunnen beïnvloeden.

3 – De theorie achter het ontwerp

In dit hoofdstuk verkennen we verschillende theorieën met betrekking tot proces flow en laten deze los op het ontwerp, om daarmee de productielijn te vormen naar onze behoeften. De theorie in dit hoofdstuk is de brug tussen beginpunt (twee stations met een globale invulling) en het ontwerp zoals het er nu ligt en hiervoor beschreven is.

In paragraaf 3.1 kijken we naar de theorie over bottlenecks. Op basis van deze theorie zullen we in paragraaf 3.2 deze theorie toepassen op onze gegevens. Daarna zullen we, in paragraaf 3.3, een analytische benadering doen van de doorlooptijden in ons model. In paragraaf 3.4 zullen we met de eerdere informatie in het hoofdstuk de verwachte benodigde bufferposities vaststellen. In paragraaf 3.5 kijken we naar de welke onderdelen op welke machines verwerkt moeten worden en in paragraaf 3.6 kijken we ook in welke volgorde dit moet gebeuren. Als laatste verkennen we de theorie achter simulatie, een tool waarin we de overige theorie zullen verwerken om uiteindelijk een antwoord te vinden op onze hoofdvraag.

3.1 – Drum, Buffer, Rope

De bottleneck in een proces is de activiteit of fase die het meest overbelast is. Vaak is het lastig of zelfs onmogelijk om de te volbrengen taken absoluut gelijk te verdelen, wanneer dit niet lukt dan heb je te maken met een bottleneck. De doorlooptijd van de Bottleneck is bepalend voor de cyclustijd van het gehele proces (Slack, 2016).

De bottleneck in een proces zou zich moeten gedragen als de zogenaamde beat, ofwel ‘drum’ van het proces. Omdat elke vorm van tijdverlies bij de bottleneck invloed heeft op de doorlooptijd van het gehele systeem is het belangrijk dat de bottleneck te allen tijde door kan werken. Om dit te realiseren is het gewenst om een buffer voor de bottleneck te plaatsen. Daarnaast is het nuttig om speling na de bottleneck te plaatsen, opdat de bottleneck altijd haar product direct kwijt kan wanneer deze klaar is.

De stations voorafgaand aan de bottleneck moeten niet op volle capaciteit draaien. Deze stations kunnen sneller produceren dan de bottleneck kan verwerken en dit zou dus ophopingen in het systeem veroorzaken. Daarom is er een vorm van communicatie nodig tussen de bottleneck en de voorgaande handelingen in het systeem, dit is de zogenaamde Rope.

3.2 – Bottlenecks in de praktijk

Ook in ons systeem is het niet mogelijk om de werklast eerlijk te verdelen. Wanneer we bijvoorbeeld drie identieke plaatsingsstations hebben en een benodigd aantal componenten dat niet deelbaar is door drie, dan kan de werklast op stationsschaal niet eerlijk verdeeld worden. Als we vervolgens kijken naar het gehele systeem dan treffen we verschillen aan in verwerkingstijden van het op de tray plaatsen van een product en het van de tray afhalen van een

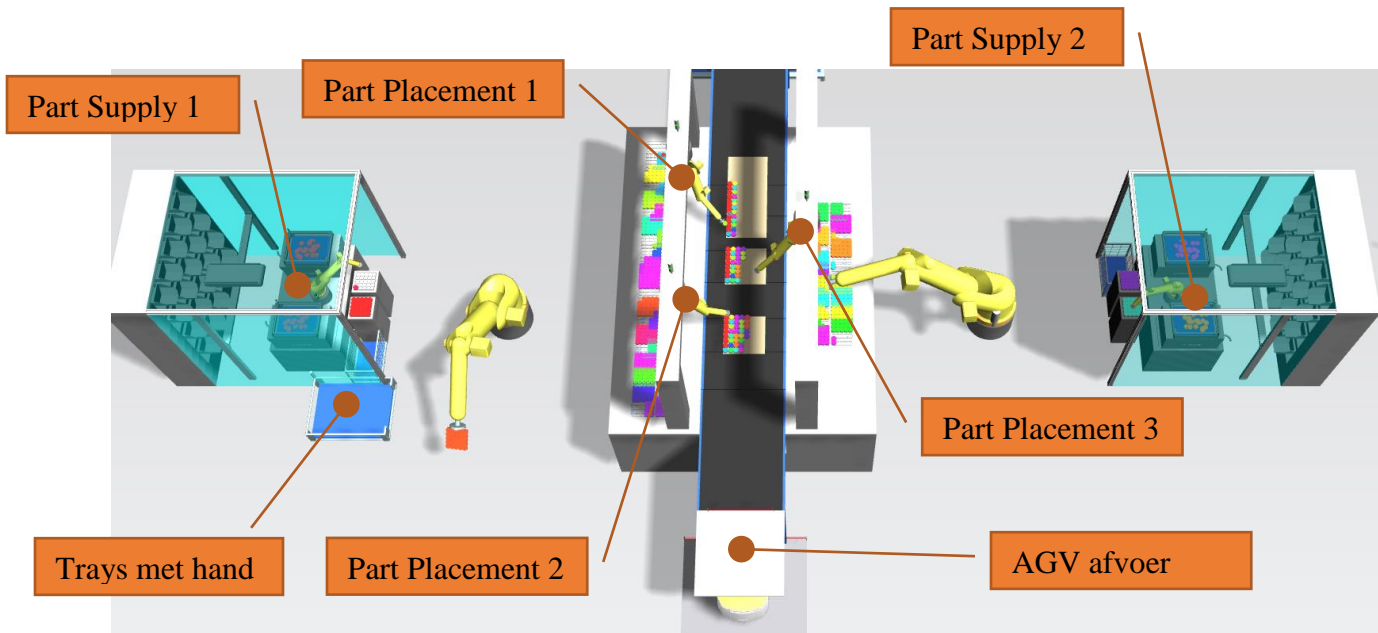
product die het ook onmogelijk maken om verschillende station typen van dezelfde werklust te voorzien. Er is dus altijd een bottleneck aanwezig.

We kunnen met de gemiddelde verwerkingstijden die we in paragraaf 2.4 hebben bepaald goed analytisch benaderen wat de doorlooptijd is van de stations in het systeem. Het systeem met de hoogste doorlooptijd is de bottleneck en zal als het goed is dus ook de gemiddelde outputtijd bepalen.

3.3 – Analytisch berekenen doorlooptijden

De tijd die een Pick-and-Place robot nodig heeft om de voor de carrier benodigde componenten te vullen of te legen, is gelijk aan het aantal componenten dat per carrier per station verwerkt wordt, maal de gemiddelde verwerkingstijd van één component die uiteindelijk op de carrier komt. De tijden zijn reeds bekend, dus we moeten enkel de componenten per station nog bepalen.

De componentaantallen in stations zijn allen uit te drukken in relatie tot het aantal componenten (dus niet SKU's) in het Part Supply station dat aan de twee Part Placement stations levert. Voor het gemak noemen we die Part Supply1. Verdere stationsaanduidingen staan in figuur 5.



Figuur 5: Part Supply en Part Placement aanduidingen

Het aantal componenten dat per station verwerkt wordt is als volgt:

- Part Placement 1 en Part Placement 2 delen de lasten van de door de Part Supply 1 geleverde componenten. Bij een even aantal plaatsen, plaatsen ze evenveel componenten op de carrier, bij een oneven aantal plaatst Part Placement 1 een component meer.

- Part Supply 2 verwerkt alle SKU's die niet door Part Supply 1 verwerkt worden en niet met de hand op een tray geplaatst worden.
- Part Placement 3 verwerkt vervolgens alle componenten die met de hand op trays worden geplaatst en die door Part Supply 2 aangeleverd worden.

We willen, gegeven het aantal componenten dat op de carrier wordt geplaatst en het aantal componenten dat met de hand op een tray geplaatst wordt, de cyclustijd van het systeem minimaliseren.

- $n_{station}$ staat voor het aantal onderdelen toegewezen aan een station,
- $t_{station}$ staat voor de gemiddelde verwerkingstijd van één onderdeel op het station
- N staat voor het totaal aantal toe te voegen onderdelen.
- V staat voor het aantal onderdelen dat handmatig verenkeld wordt naast het Part Supply station wordt aangeleverd, zoals uitgelegd in 2.3.3.

Verder komt er bij de part placement stations een geschatte standaardtijd van 0,35 seconden boven de vaste doorlooptijd op. Omdat het Part Placement station maar één carrier tegelijkertijd kan bedienen moet het systeem ook de transporttijd binnen het station, dat is ingeschat op 0,35 seconden, wachten.

De functie voor de verwachte doorlooptijd, die we later willen minimaliseren, is dus:

$$t = \max \begin{cases} t_{ps} * n_{ps1} & \text{part supply 1} \\ t_{ps} * n_{ps2} & \text{part supply 2} \\ t_{pp} * n_{pp1} + 0,35 & \text{partplacement 1} \\ t_{pp} * n_{pp2} + 0,35 & \text{partplacement 2} \\ t_{pp} * n_{pp3} + 0,35 & \text{partplacement 3} \end{cases}$$

$$\text{s.t. } n_{ps1} = x - V$$

$$n_{ps2} = N - n_{ps1}$$

$$n_{pp1} = \text{ceil}\left(\frac{n_{ps1} + V}{2}\right)$$

$$n_{pp2} = \text{floor}\left(\frac{n_{ps1} + V}{2}\right)$$

$$n_{pp3} = n_{ps2}$$

$$t_{ps} = 2.2109$$

$$t_{pp} = 4.0816$$

$$x, n_{station}, N, V \in \mathbb{Z}_+$$

$$x, V \leq N$$

Als we dit oplossen voor verschillende waarden van N zien we dat niet altijd hetzelfde type station de bottleneck is, zoals in tabel 1 is te zien. Omdat de BOMs die worden samengesteld variëren in componentaantallen en het aantal componenten dat in de buffer verenkeld wordt moeten we rekening houden met het feit dat de bottleneck in ons systeem varieert.

Tabel 1: Resultaten analytische benadering

N	Handmatig	Supply1	Supply2	Bottleneck	Tijd
44	0	29	15	PS1	64.11466
44	1	28	15	PS1	61.90381
44	2	27	15	PP3	61.57449
45	0	29	16	PP3	65.65612
45	1	29	15	PS1	64.11466
45	2	28	15	PS1	61.90381
46	0	30	16	PS1	66.32551
46	1	29	16	PP3	65.65612
46	2	28	16	PP3	65.65612

Daarnaast zien we in tabel 1 dat de Bottlenecks alleen Part Supply 1 (PS1) en Part Placement station 3 (PP3) zijn. Dat is logisch, want Part Placement station 1 en 2 kunnen sneller hun componenten kwijt dan Part Supply 1 produceren kan en Part Supply 2 kan altijd de benodigde componenten sneller verenkelen dan Part Placer 3 plaatsen kan.

Eigenlijk zijn we dus steeds de afweging aan het maken of we een component in Part Placement 3 willen plaatsen, of in Part Supply 1 willen verenkelen. Om snel tot de beste oplossing te komen voor x zoeken we de grenswaarde van de verhouding tussen deze twee stations op.

$$x = \frac{t_{ps}}{t_{ps} + t_{pp}} * N$$

In het geval van de tijden zoals besproken in 2.4 en met de correctie die gedaan is in 3.2 komen we uit op $x = 0.649N$.

Omdat dit geen geheel getal is ronden we deze af naar beneden en naar boven en vullen deze in bij de eerdere formules, om te kijken welke waarde van x de minimale maximale verwachte doorlooptijd voor de stations zal betekenen. Op basis van deze waarde zullen we later dus ook de stations optimaal kunnen indelen. Een uitgewerkt voorbeeld hiervan staat in appendix 4.

3.4 – Buffers

Omdat we met verschillende bottlenecks te maken krijgen en omdat procestijden van de stations dicht tegen elkaar liggen zullen in het systeem meerdere bufferposities moeten komen om de verwachte minimale gemiddelde doorlooptijden te kunnen halen voor alle productsamenstellingen. Eerst zullen we elke benodigde buffer bespreken in de volgorde van het verwerken van een component. Later, bij de resultaten, zullen we ook de impact van buffers naar cijfers vertalen.

3.4.1 – Benodigde buffers in de Part Supply

Allereerst doen we de aanname dat de bulkbakken die de bulkvoorraden bevatten altijd genoeg gevuld zijn. Deze aanname doen we omdat het vullen van deze bakken buiten de scope van ons onderzoek valt. Het gevolg van een niet (voldoende) gevulde bulk bak is het stil komen liggen van het daarbij behorende station op het moment dat het component nodig is, wat uiteindelijk resulteert in het stilliggen van het hele systeem.

Vervolgens gaan we uit van een systeem waarin de Part Supply de Bottleneck is en dus eventuele wachttijden niet worden opgevangen door de verwerkingstijd in een ander station, maar direct resulteren in een langere doorlooptijd.

De eerste plek waar een buffer nodig is, is bij de trilbak. Voorkomen moet worden dat de Pick and Place robot moet wachten op het vullen van de trilbak, dit zou per tray resulteren in veel tijdverlies. Door een tweede trilbak toe te voegen aan het systeem zal er altijd een gevulde trilbak beschikbaar zijn. Wanneer er ook een extra vulplaats bij komt zal ook altijd een lege vulplaats beschikbaar zijn. De omsteltijd van het station kunnen we op deze manier reduceren tot nul.

3.4.2 – Benodigde buffers in de Part Placement

In dit geval gaan we uit van een productsamenstelling waardoor een Part Placement station de bottleneck zal zijn.

Voor de leeg te halen componenttrays zijn er twee opties om de minimale doorlooptijd te realiseren.

1. Naast de tray die wordt leeggehaald plaats maken voor één extra tray per componenttype om te bufferen. Wanneer de aanvoer sneller is dan de afvoer zal deze buffer zich langzaam vullen zodat een Single Minute Exchange of Dye gerealiseerd kan worden. Wanneer de afvoer sneller is dan de aanvoer dan zorgt deze buffer ervoor dat de Part Supply altijd kan produceren. Anders zou je met een leeg systeem beginnen, elke tray één keer produceren en vervolgens de bottleneck laten wachten omdat het systeem vol is.

2. Werken met specifieke beginvoorraden en trays altijd vullen met een veelvoud van het aantal benodigde componenten per type zodat lege trays vervangen kunnen worden terwijl de Picker doorgaat.

De eerste optie vereist het dubbele van de ruimte voor componenttrays in het Part Placement station, maar zorgt ook voor meer flexibiliteit. Bij het omstellen van een nieuw product kunnen we de lijn helemaal leegdraaien door een veelvoud van 25, het aantal componenten op een tray, te produceren, om vervolgens weer leeg beginnen. We kunnen zelfs de buffer vast klaarzetten met de BOM van een ander product. Wanneer je met specifieke beginvoorraden werkt zal je bij een omstelling eerst de trays juist moeten afstellen.

Omdat alle benodigde componenten uiteindelijk op één carrier moeten komen, staan de Part Placement stations in serie geschakeld. Wanneer er geen buffers worden geplaatst in deze serie zullen eventuele mispicks bij een later station betekenen dat een eerder station niet door kan produceren, omdat deze de trays die ze vol hebben gepickt met de juiste SKU's nog niet kunnen afstaan, omdat er geen ruimte is bij het volgende station. Omdat stations steeds moeten wachten op de stations die later in de productielijn liggen wordt de doorlooptijd van een station de langste doorlooptijd van alle daaropvolgende stations. Als vervolgens een station een mispick doet dan rekent dit weer door in alle voorgaande stations. Dit effect wordt heftiger wanneer er meerdere stations op rij dezelfde doorlooptijd hebben.

Stel dat we twee stations op rij hebben die allebei evenveel producten moeten plaatsen. Als het laatste station in de productievolgorde een mispick op een willekeurig moment krijgt, dan moet het eerste station wachten voordat deze de carrier kan doorschuiven en krijgen we te maken met een tijdverlies van één mispick voor de eerste carrier en één mispick voor de tweede tray. Wanneer het eerste station even later een mispick doet dan moet het tweede station wachten op de aanvoer van een de carrier en hebben wederom beide stations tijdverlies door de mispick van één station. Echter, wanneer er een bufferpositie tussen beide stations zou zitten, dan zou in het eerste geval de gevulde carrier van het eerste station kunnen doorschuiven en daarmee de bufferpositie kunnen vullen. Later, het latere stations anders zou moeten wachten door de mispick van het eerste station, staat er reeds een tray in de buffer en kan dit wachten dus voorkomen worden. De bufferpositie zorgt er dan dus voor dat de mispicks maar één keer impact hebben op de doorlooptijd van het systeem.

Een laatste plek voor een buffer zou dus tussen de Part Placement stations zijn.

3.5 – Machine Planning

Planning en scheduling zijn beslissingsprocessen met het doel om beperkte middelen in te zetten om de benodigde taken uit te voeren op een dusdanige manier dat dat het bedrijf haar doelen bereikt en optimaliseert (Pinedo, 2005). Deze doelen zullen aan bod komen in paragraaf 4.1.2.2. De beperkte middelen zijn de Pick and Place robots en de benodigde taken zijn het ordenen en

het op de carrier plaatsen van de componenten. Planning refereert naar de uit te voeren taken, en scheduling legt focus op de tijd waarop geplande handelingen plaatsvinden. In ons geval is plannen dus het toewijzen van producten aan machines en is scheduling vervolgens het bepalen van de productievolgorde per machine. In paragraaf 3.5.1. zullen we kijken naar de invulling van de planning.

3.5.1 – Invulling planning

Het doel van planning is dus het optimaliseren van doelen. Het belangrijkste doel dat de planning dient is het verminderen van de gemiddelde cyclustijd. Als we alle producten op één Part Placement machine zouden plannen dan zou de cyclustijd erg hoog worden en worden onze middelen slecht benut. Als we het totale componentenaantal zo gelijk mogelijk verdelen over alle Part Placement stations dan zou het ene Part Supply station dubbel zoveel producten moeten verenkelen als het andere. Ergens tussen deze twee uitersten zit dus een optimum.

In paragraaf 3.3 werd reeds vastgesteld hoe we de optimale verdeling van machines konden realiseren. Om eenvoudig de beste invulling voor Part Supply 1 te benaderen kunnen we de verhouding tussen de gemiddelde verwerkingstijden (zoals berekend in paragraaf 2.4) van een Part Supply station en een Part Placement station vermenigvuldigen met het totaal aantal benodigde componenten. Door dit getal vervolgens naar boven en naar beneden af te ronden en in te vullen voor het aantal componenten in Part Supply1 in de eerdere berekeningen, berekenen we analytisch de gemiddelde cyclustijden voor de verschillende invullingen. De systeemconfiguratie met de laagste gemiddelde cyclustijd in het analytische model wordt dan ook de configuratie voor ons systeem.

Nu we de planning in aantallen rond hebben moeten we op de BOM SKU's bij elkaar zoeken die gezamenlijk dit aantal benodigde componenten halen. Als dit niet mogelijk is dan kunnen de benodigde aantallen van SKU's gesplitst worden om de optimale invulling alsnog te realiseren.

Een uitgewerkt voorbeeld hiervan staat in Appendix 4.

3.6 – Productievolgorde

In het productiebeleid kan er een tweesplitsing gemaakt worden in Online en Offline machine scheduling. In paragraaf 3.6.1 zullen we deze methodes met elkaar vergelijken en in paragraaf 3.6.2 gaan we verder in op welke stappen er genomen moeten worden om tot een goede strategie te komen. In 3.6.3. gaan we vervolgens deze strategie vaststellen, die we ook zullen gebruiken in ons simulatiemodel

3.6.1 – Online versus offline machine scheduling

Offline scheduling bepaalt voorafgaand aan het uitvoeren van het proces een verwerkingsvolgorde en online scheduling doet dit tijdens de uitvoering van het proces. Van offline scheduling kunnen we gebruik maken als alle relevante data, zoals de uit te voeren taken, procestijden, opleveringstijden, etc. allemaal voorafgaand aan het uitvoeren van het proces bekend zijn.

Bij online scheduling heb je nog niet de informatie die benodigd is om een volgorde te bepalen, maar krijg je die (deels) gedurende de loop van het systeem. Wanneer deze informatie beschikbaar komt is het vervolgens mogelijk om de verdere invulling aan de verwerkingsvolgorde te geven.

Wanneer de Part Supply een mispick maakt, bijvoorbeeld omdat de te picken component niet goed ligt, gaan we er vanuit dat het te picken component niet nog een keer gepickt kan worden. We gaan er dus vanuit dat een component haar nut kwijtraakt en dus theoretisch uit het systeem verdwijnt. Dit willekeurige verdwijnen van componenten heeft invloed op de volgorde waarin nieuwe trays met SKU's nodig zijn. Aan het begin zal de impact op de relatieve voorraad van mispicks beperkte impact hebben, maar naarmate het proces langer loopt zullen de voorraadvolumes van de SKU's meer random afwijken.

Op een kleine productierun zal dus een vooraf bepaald deterministische roostering een beperkte invloed hebben op de prestaties van het model, omdat de voorraden van componenten nog redelijk dicht tegen elkaar aanliggen. Af en toe zullen twee SKU's verkeerdom geproduceerd worden. Als je het systeem echter wat langer laat draaien dan zullen de voorraden een stuk verder uit elkaar komen te liggen, want de mispicks zijn random en zullen dus niet bij elk component op elk moment even vaak voorgekomen zijn. Daarom is het bij langere productieruns belangrijk dat je inspelt op de voorraad verschillen, door verwerkingsvolgordes aan te passen. Vooraf weet je niet welke SKU's meer en welke SKU's minder mispicks dan gemiddeld krijgen, dus dit moet online gebeuren. Doordat wij online scheduling zullen gebruiken en pas op het moment dat er een nieuw component benodigd is te bepalen welk component dit wordt kunnen we verkeerde productievorgordes voorkomen.

3.6.2 – Theorie productievorgorde

Bij het bepalen van welk SKU als volgende verenkeld moet worden, focussen we op twee aspecten. De eerste is het voorkomen dat voorraden van SKU's leegraken en de tweede is het voorkomen dat er een componentsoort moet wachten om naar de part placer te kunnen omdat deze niet leeg is, terwijl een andere componenttray al wél leeg is. De productievorgorde focust zich op het vergroten van de bezettingsgraden van de machines en daarmee het verkorten van de doorlooptijd. De prioriteitsregel in de Part Supply wordt daarom de zogeheten *Shortest Queue At Next Operation*, met een kleine uitzondering waar we zo op terugkomen.

Daarbij rekenen we de queue niet in resterende componenten per SKU, maar in verwachte resterende tijd dat er nog componenten van het componenttype beschikbaar zijn voor de Part Placer. Dit doen we door per componenttype te kijken naar:

- Het aantal resterende componenten in het Part Placement station aan het begin van de vulling van de huidige carrier
- Het moment dat de Part Placement begon met het vullen van de huidige carrier
- De verwachte picktijden
- Het aantal benodigde componenten per product
- Eventuele aanvoer van het component dat reeds in de productielijn zit

Het eerste punt is belangrijk omdat we dan de componentvoorraden op een juiste manier kunnen vergelijken. Als we zouden kijken naar de huidige voorraad dan zou een tray met SKU's die al op de huidige carrier is geplaatst eerder aan vervanging toe kunnen lijken dan een tray waarvan de componenten daar nog niet op zijn geplaatst.

Omdat één Part Supply aan twee Part Placers levert moet vervolgens ook het verschil in begintijden tussen de carriers bij de verschillende Part Placers meegenomen worden.

Uit het aantal resterende componenten, het aantal componenten dat al in de productielijn zit ter aanvulling en de benodigde componenten per product leiden we af hoeveel carriers er nog gevuld kunnen worden per SKU. Als we deze gegevens combineren met de gemiddelde pick-tijd per component dan kunnen we een goede inschatting maken van wanneer een SKU nog maar voor één tray aan voorraad heeft en wanneer deze geheel leeg zal raken of misschien al wel leeggeraakt is.

3.6.3 - Toepassing productievолgorde

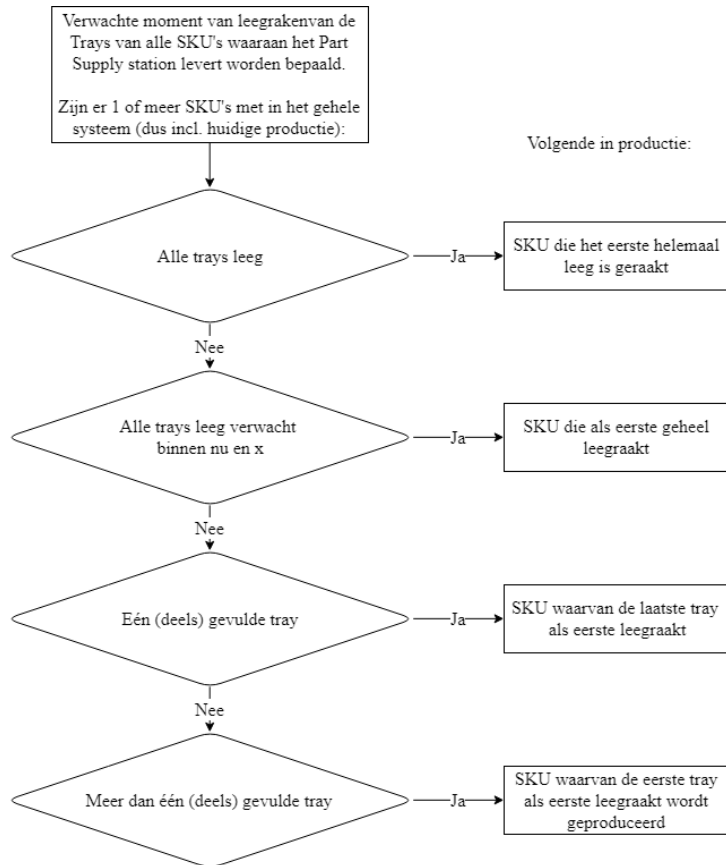
Allereerst kijken we of er SKU's zijn waarvan er geen enkele tray meer op voorraad is of in de productie is. Zijn er dergelijke SKU's, dan kiezen wij ter productie het componenttype die het langste leeg is.

Vervolgens kijken we of er een component is met minder dan $x+1$ verwachte carriers resterend voordat deze geheel leeg raakt, omdat je de productietijd van x trays moet wachten voordat het gekozen component daadwerkelijk beschikbaar is. X is hierbij dan gelijk aan de vultijd van twee trays gedeeld door de vultijd van een carrier. Met de standaardparameters komt dit uit op $x \approx 75/(\text{aantal componenten})$. Als er één of meerdere van deze SKU's zijn dan kiezen we de SKU die als eerste leeg zal raken.

Is dit niet het geval dan wordt er gekeken of er al trays leeg zijn die aan vervanging toe zijn. Zo ja, dan wordt het component dat als eerste op zal raken én waarvan al een tray leeg is geproduceerd. Deze stap is noodzakelijk omdat er soms meerdere componenten van hetzelfde type nodig zijn, waardoor een component waarvan de bufferpositie nog meerdere carriers niet

leeg zal raken voorrang zou kunnen krijgen over een in mindere mate benodigd component met een reeds lege bufferpositie.

Wanneer dit ook niet het geval is zal er gekeken worden naar welk componenttype als eerste een lege tray zal hebben. Deze gehele procedure is schematisch weergegeven in de flowchart in figuur 6.



Figuur 6: flowchart productievorgorde

3.7 – Simulatie

Simulatie zal een belangrijke tool worden in ons onderzoek, dus het is tijd om het begrip wat verder te verkennen. In paragraaf 3.7.1 zal worden uitgelegd wat simulatie precies is. In paragraaf 3.7.2 zullen we vervolgens verder ingaan op onze motivatie om simulatie te gebruiken. Vervolgens zullen we in paragraaf 3.7.3 kort in gaan op ons type simulatie, namelijk Discrete Event simulatie. In paragraaf 3.7.4 verkennen we vervolgens theorie over het fundament van het simulatiemodel: het conceptueel model. We sluiten af met paragraaf 3.7.5, waarin we kijken hoe we kunnen vaststellen of het model geschikt is voor gebruik.

3.7.1 – Wat is simulatie?

Simulatie is het experimenteren met een gesimplificeerde imitatie van een proces, terwijl de tijd vordert, met als doel om het systeem beter te begrijpen en/of het systeem te verbeteren. Een systeem wordt gedefinieerd als een verzameling van entiteiten die door middel van hun interactie samenwerken om een doel te bereiken (Schmidt, 1970).

Een simulatie voorspelt de prestaties van een systeem op basis van input en eigen performance indicators. Daarmee is prestatie van het systeem afhankelijk van de input. Door verschillende (input)scenario's te testen kan gekeken worden welke tactiek de best verwachte uitkomst (dus score op performance indicators) levert. Het is de taak van de gebruiker van het simulatiemodel om de juiste experimenten te kiezen en het simulatie model dus te gebruiken als een tool ter onderbouwing van een keuze (Robinson, 2014). De performance indicators voor dit onderzoek zullen worden gedefinieerd in hoofdstuk 4.

3.7.2 – Waarom gebruiken we simulatie?

Het gebruik van simulatie kan veel voordelen hebben. Systemen kunnen dermate complex zijn dat het zonder een simulatiemodel erg lastig is om de impact van systeemconfiguraties in te schatten. Met een simulatiemodel kan de impact van veranderingen worden getoetst zonder dat het systeem zelf ook maar een seconde stil hoeft te staan en zonder dat er allerlei dure alternatieven worden gerealiseerd zonder dat zeker is of de investering rendabel is. Ook kan experimenteren in de realiteit gevaarlijk zijn, te lang duren of simpelweg onmogelijk zijn omdat het systeem nog helemaal niet bestaat (Mes, 2017). Verder maakt simulatie het mogelijk om de omgevingsvariabelen van experimenten goed onder controle te houden, zodat verschillende systeemontwerpen onder gelijke condities met elkaar vergeleken kunnen worden (Law, 2014).

Natuurlijk zijn er ook argumenten tégen het gebruik van simulatie. Simulatie vergt een hoop tijd en een hoop data. Ook in ons geval mist er zekerheid over de inputdata. Daarom moet het model flexibel zijn in het omstellen van deze data en de daaruit volgende systeemconfiguratie. Zo blijft het model zelfs nuttig wanneer de werkelijkheid afwijkt van de verwachting.

In hoofdstuk 4 zullen we invulling geven onze simulatie, en een systeem ontwikkelen aan de hand van de theorie die we in dit hoofdstuk verkend hebben. We verwerken in het model de benodigde buffers en gebruiken de machineplanning en productievolgorde zoals beredeneerd.

3.7.3 – Discrete-Event Simulatie

Om ons model te simuleren zullen we gebruik maken van Discrete-Event simulatie. Deze simulatievorm wordt vaak gebruikt procesontwerp problemen met stochastiek en wachtrijen te simuleren. In Discrete-Event simulatie verandert de staat van het model op niet-vooraf bekende momenten. Een direct gevolg hiervan is dat deze sprongen in de tijd niet allemaal even groot zijn. (Birta, 2013)

3.7.4 – Het conceptueel model

Voorafgaand aan het maken van het simulatie model zullen we een conceptueel model opstellen. Een conceptueel model is een niet-softwaregebonden beschrijving van het te ontwerpen simulatiemodel, die de doelen, input, output, inhoud, aannames en versimpelingen van het simulatiemodel bevat (Robinson, 2014). Hiervan zijn de input en stapsgewijze sub-systeemomschrijvingen reeds behandeld.

Het conceptueel model heeft als doel om een solide basis te leggen voor het te bouwen simulatie model. Het conceptueel model moet valide, geloofwaardig, bruikbaar en haalbaar zijn. Validiteit en geloofwaardigheid draaien om het scheppen van de overtuiging dat het conceptueel model leidt tot een simulatiemodel die voldoende nauwkeurig is voor het gestelde doel. Validiteit kijkt vanuit de ontwikkelaar en de geloofwaardigheid vanuit de afnemer van het model. Bruikbaarheid kijkt naar de mate waarin het model bruikbaar is als een beslissing-ondersteuningstool. Gebrek aan flexibiliteit en/of run snelheid kunnen de bruikbaarheid van een nauwkeurig genoeg model beperken, dus er moeten goede afwegingen gemaakt worden in de scope en het detailniveau van het simulatiemodel. Als laatste moet het conceptueel model het vertrouwen wekken dat er een goed simulatiemodel gebouwd kan worden.

3.7.5 – Validatie en verificatie

Wanneer dit model daadwerkelijk gebouwd is, moeten we controleren of het model geschikt is om te gebruiken. Dit doen we door middel van modelvalidatie en verificatie. Het probleem met theoretische modellen, zoals een simulatiemodel, is dat het onmogelijk is om te bewijzen of een model een 100% accurate afspiegeling van de werkelijkheid is (Robinson, 2014). Daarom wordt het doel van modelverificatie en modelvalidatie gezien als het genoeg vertrouwen creëren in het model om het te gebruiken in beslissingsprocessen (Serman, 2000). Modelverificatie draait om het controleren of de conceptueel model juist is omgezet naar het simulatiemodel en modelvalidatie controleert de mate waarin het model voor het gestelde doel geschikt is (Robinson, 2014).

Modelverificatie en validatie wordt gedaan door het proberen te bewijzen dat het model incorrect is (Serman, 2000). Omdat de éne test in een situatie niet kan bewijzen dat het model niet valide is, maar de andere test dit wel kan uitwijzen, is er géén vaste test (of serie testen) om een model te valideren of verifiëren. Daardoor kunnen we er ook niet zeker van zijn dat een model een perfecte afspiegeling is van de praktijk, ondanks meerdere testen de juistheid van het model ondersteunen.

Wel zijn er tal van algemene testen die kunnen worden uitgeoefend op een simulatiemodel. Die testen dienen niet enkel gezien te worden als eindcontrole, maar moeten iteratief ingezet worden. Op basis van bevindingen wordt het model bijgeschaafd en verder gevormd naar validiteit.

Veel van de testen toetsen in welke mate de theorie overeenkomt met de praktijk. Dat is in ons geval niet mogelijk, omdat er nog geen praktijk is om de theorie mee te vergelijken. Hillston (2003) geeft echter een goed overzicht van ook andere mogelijkheden om simulatiemodellen te kunnen verifiëren en valideren. Zo zullen we ondermeer gebruikmaken van Seed Independence en een gevoeligheidsanalyse. Meer hierover zal te vinden zijn in paragraaf 4.4.

4 – Simulatie

In dit hoofdstuk doorlopen we het proces van het opzetten van het simulatiemodel door in paragraaf 4.1 het conceptueel model op te zetten. We gaan in op hoe we weten dat het model geschikt is voor gebruik en natuurlijk hoe we dit model daadwerkelijk kunnen gebruiken. Daarbij bepalen we ook de Key Performance Indicators, waarmee we de output kunnen beoordelen. In paragraaf 4.2 laten we zien hoe het simulatiemodel er uit is komen te zien. In paragraaf 4.3 stellen we vast hoe we het model gebruiken, door te kijken naar de lengte van de opwarmperiode, het aantal benodigde replicaties en de minimale loopduur van het model. Als laatste kijken we in paragraaf 4.4 naar de geschiktheid van het model, door de modelvalidatie en modelverificatie te bekijken.

4.1 – Conceptueel model

In paragraaf 3.7.4 kwam reeds voorbij wat er precies in een conceptueel model opgenomen moet worden. In paragraaf 4.1.1 zullen we dan ook het doel van het simulatiemodel vaststellen. In paragraaf 4.1.2 kijken we naar de input en output van het model en in paragraaf 4.1.3 kijken we naar de processtroom die in het simulatiemodel geïmplementeerd wordt. Vervolgens bespreken we in paragraaf 4.1.4 de limitaties van het simulatiemodel.

4.1.1 – Doel simulatiemodel

Het doel van het te maken simulatie model is inzicht vergaren in het gedrag van de te ontwikkelen productielijn op basis van de inputvariabelen. We zijn hierbij benieuwd naar de cyclustijden, maar bijvoorbeeld ook naar buffervullingen en leverbetrouwbaarheid aan de verdere stappen in de productie. Machinebouwer is hierbij niet geïnteresseerd in de cyclustijden na een uur productie vanuit niets, maar wil weten wat de lange termijn gemiddelden zijn. Daarom zullen we gebruik maken van een non-terminating simulatie met opstartperiode. Dit wil zeggen dat de metingen in het systeem pas gedaan worden wanneer het systeem in evenwicht is en we benieuwd zijn naar de lange termijn prestaties. Dit zullen wij dus ook meenemen in ons simulatie model. In paragraaf 4.3 zullen we deze opwarmperiode vaststellen.

Tevens moeten het simulatie model en de analytische benaderingen elkaar kunnen controleren op onjuistheden. Verschillen in uitkomsten moeten daarbij worden geanalyseerd om tot een juist analytisch model te komen en een juist simulatiemodel.

Daarnaast moet het mogelijk zijn om de impact van latere interventies te kunnen toetsen en willen we dat we de toegevoegde waarde kunnen testen van de buffers, die niet cruciaal zijn om een product te produceren maar als het goed is de cyclustijden wel kunnen verkorten.

4.1.2 – Input en output van het model

Zoals eerder gezegd is een simulatiemodel een verzameling van entiteiten die door middel van hun interactie samenwerken om een doel te bereiken (Schmidt, 1970) De manier waarop deze interactie plaatsvindt, komt deels voort uit de infrastructuur van het model en deels uit de inputvariabelen, zoals procestijden die productievorgordes veranderen. Om juiste prestaties van het systeem te meten moeten we dus niet alleen een juiste meetmanier hebben (KPI's), maar ook juiste inputvariabelen.

4.1.2.1 – Input

De eerste vorm van input die de gebruiker in het systeem kan zetten is de productsamenstelling van het te simuleren product. Zelf zullen we bij het gebruik van de simulatie steeds twee standaard producten van Producent testen. Daarnaast zullen we ook enkele productsamenstellingen testen met zowel meer als minder SKU's, om ook waar te kunnen nemen wat de effecten van experimenten op grotere en kleinere productsamenstellingen zijn. De BOM van deze producten staan in Appendix 3.

Daarnaast moeten alle SKU's ook toegewezen worden aan een Part Supply station en een Part Placement station. Hiervoor is analytisch een optimum te beredeneren buiten de simulatieomgeving, dit staat verder omschreven in paragraaf 3.5.2. Het resultaat hiervan is een overzicht van welk component in welk station komt. In appendix 3 staan in de laatste twee kolommen per component in welke part supply en part placement stations ze zitten

Verder zijn er tal van inputvariabelen in de vorm van getallen, deze getallen vormen de procestijden van de verschillende stations.

- Gemiddelde Pick and Place tijd in Part Supply station.
- Standaardafwijking van de gemiddelde Pick and Place tijd in het Part Supply station.
- Kans op het moeten hertrillen bij een pick in Part Supply station.
- Extra triltijd bij éénmaal hertrillen in Part Supply station.
- Gemiddelde minimale Pick and Place tijd in het Part Placement station.
- Standaardafwijking van de minimale Pick and Place tijd in het Part Placement station.
- De kans op een mispick bij een pick in het Part Placement station.

Als laatste willen we ook voor enkele controles kunnen uitvoeren op de meerwaarde van systeeminrichtingen. Daarom zullen we bepaalde bufferplaatsen modulair ontwerpen en het in de inputvariabelen mogelijk maken om deze plaatsen aan of uit te zetten.

4.1.2.2 – KPI's

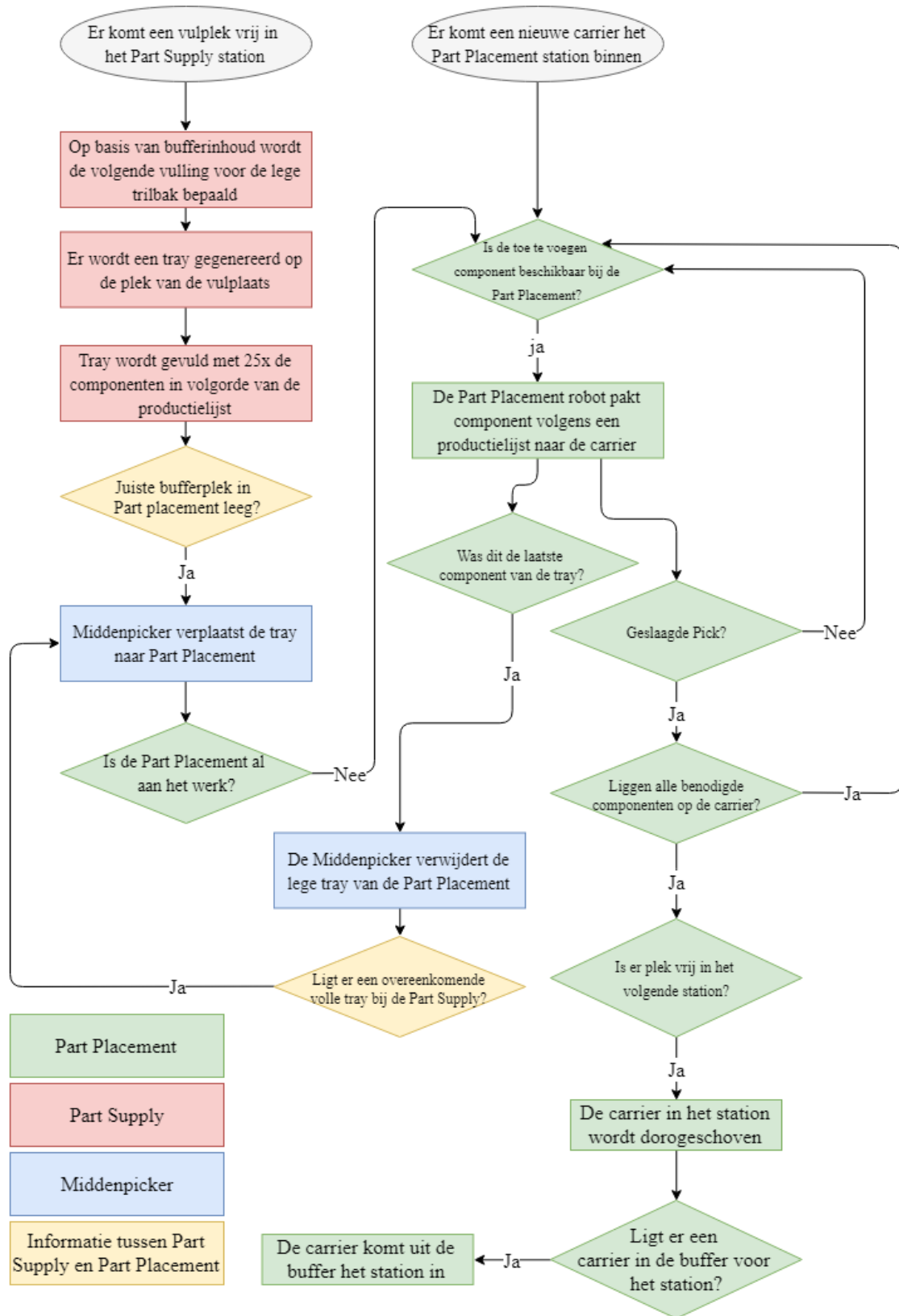
KPI's: KPI's zijn Kritieke prestatie-indicatoren, of in het Engels *Key Performance Indicators*. Dit is de kwalitatieve of kwantitatieve informatie van een geobserveerd fenomeen (of proces, of resultaat) die het mogelijk maakt om de evolutie hiervan te analyseren en om te kijken welke kwaliteitsdoelen zijn behaald. Hierbij is het belangrijk dat er indicatoren worden gekozen die het proces juist afspiegelen (Franceschini, 2007). Wanneer we verschillende scenario's toetsen zullen deze indicatoren het eenvoudiger moeten maken om de systemen met elkaar te vergelijken. Voor het opstellen van de lijn zijn we geïnteresseerd in de prestaties op gebied van outputtijden, leverbetrouwbaarheden, bezettingsgraden per machine en flexibiliteit. Deze onderwerpen komen dus ook naar voren in de gekozen KPI's, die als volgt luiden:

- Gemiddelde tijd per product (cyclustijd)
- Gemiddelde tijd per product t.o.v. het theoretisch gemiddelde minimum
- Bezettingsgraden stations
- Leverbetrouwbaarheid aan productie
- Maximaal aantal trays gelijktijdig in het proces

Daarnaast zullen er in de gerealiseerde versie van het uiteindelijke model ook indicatoren zijn die ons kunnen helpen om de validatie van het theoretische model, maar ook de prestatie van de realisatie zelf te verbeteren. Wanneer er meer inzicht komt in de daadwerkelijke machinetijden, faalkansen, faaltijden en afwijkingen dan kan de planning aangepast worden op deze nieuwe informatie. Om de juiste data te verkrijgen zal er na realisatie dus onderzoek gedaan moeten worden naar de gerealiseerde procestijden en de afwijkingen en faalkansen hiervan.

4.1.3 – Proces flow

Het simulatiemodel is opgezet aan de hand van de omschrijving van individuele onderdelen van het systeem en de interactie tussen deze onderdelen. Er is gekeken naar welke (in paragraaf 2.3 reeds beschreven) handelingen van het systeem gesimuleerd moeten worden. Om dit overzichtelijk te krijgen is dit vertaald naar een flowchart, die ook de basis vormt van het simulatiemodel. Deze flowchart van de productielijn staat weergegeven in figuur 7. Wanneer er bij keuzes bijvoorbeeld geen “nee” optie staat gegeven dan resulteert de “nee” optie in niets.



Figuur 7: Flowchart van de productielijn t.b.v. simulatie-ontwerp

4.1.4 – Limitaties

Voorafgaand aan het opstellen van het model, stellen we vast welke limitaties het model mag hebben. Deze hebben te maken met de soms beperkte kennis in de modelontwikkelingsfase (aannames in paragraaf 4.1.4.1) en met versimpelingen (in paragraaf 4.1.4.2) die worden toegepast om het model sneller in het gebruik en in de ontwikkeling te maken.

4.1.4.1 – Aannames:

Aannames worden gedaan wanneer er onzekerheden of verwachtingen zijn van de te modeleren omgeving en dienen om gaten in de kennis op te vullen (Robinson, 2014). De aannames die we doen zijn als volgt:

1. Bij de Part Placers is er ruimte voor alle trays, plus benodigde bufferposities, die we later zullen bepalen. Zowel de Midden Picker als de Part Place robot kan al deze plaatsen bereiken. In het laatste grafische model van Machinebouwer was dit niet het geval, waardoor in de simulatie trayplaatsen overlappen. Machinebouwer zal dit in de realisatie aanpassen.
2. Er zijn enkele componenttypen die niet via de Part Supply verenkd kunnen worden, trays met deze producten worden met de hand gevuld en aangeleverd naast de tweede Part Supply, de aanname die we doen is dat deze producten altijd voldoende op voorraad zijn.
3. Alle picktijden en kansen op fouten zijn aannames. Want het systeem bestaat nog niet. Deze aannames worden gedaan op basis van de expertise van Machinebouwer. De impact van afwijkingen zullen we bespreken bij de gevoeligheidsanalyse.
4. Alle robots kunnen communiceren met elkaar, de bijbehorende aanname is dat deze communicatie verwaarloosbaar weinig tijd kost.
5. De robots herkennen hun eigen fouten. Wanneer zij een misspick hebben gedaan dan weten zij dit en gaan zij er niet vanuit dat het component wel verplaatst is. Wanneer dit in werkelijkheid niet zou gebeuren dan zouden er incomplete trays afgeleverd worden, die met de hand aangevuld moeten worden of worden weggegooid.
6. Elke Part Placer kan elk type component op elke plek op de carrier leggen. Het is niet duidelijk of er beperkingen zijn wat betreft de vul-volgorde van de carrier. Machinebouwer verwacht van niet, dus daarom doen we deze aanname.

4.1.4.2 – Versimpelingen:

1. In onze simulatieruns simuleren we één product per keer en kijken bij deze simulatieruns naar de prestaties op de lange termijn. In werkelijkheid zal na een batch carriers omgeschakeld moeten worden naar een ander product. De impact van de omschakeltijden en opstarttijden op de systeemprestaties is erg afhankelijk van de totale loopduur van de simulatie. In overleg met Producent is dus gekozen om te kijken naar de lange termijn prestaties zonder de opstarttijden daarin mee te nemen.
2. *De kans op opnieuw trillen bij Part Supply is onafhankelijk van de vullingsgraad van de trilbak.* In werkelijkheid zal dit niet zo zijn, want als er bijvoorbeeld nog één component over is zal deze altijd los liggen. Dit heeft naast de impact van de picktijden van de gehele tray nergens invloed op, in principe zou dus het volladen van een tray in zijn geheel met één kansverdeling afkunnen.
3. Er komt altijd direct een nieuwe lege tray bij de Part Supply wanneer een volle tray wordt opgehaald. Lege trays van de Part Placement verlaten in de simulatie het systeem. In werkelijkheid zullen deze leeggeplukte trays weer bij de Part Supply geplaatst worden. De Middenpicker zou de tijd van het vullen van één tray hebben om een lege tray hierheen te plaatsen. Gezien de andere vereiste handelingen van de Middenpicker is er ruim voldoende tijd om deze handeling uit te voeren, maar in de simulatie is de handeling buiten beschouwing gelaten (in overleg met Machinebouwer).
4. *De Picktijd bij part placement is onafhankelijk van de positie van de tray.* In werkelijkheid zal er een verwaarloosbaar klein verschil zijn, dus hebben we het verwachte gemiddelde genomen van de picktijd.
5. *De trilbakken worden altijd met 25 componenten gevuld.* In werkelijkheid zullen de trilbakken tussentijds bijgevoerd moeten worden en de overgebleven componenten zullen terugvloeien in de bulkbakken. Omdat het vullen en legen van de trilbak gebeurt terwijl de andere trilbak leeggepickt wordt is deze tijd verwaarloosbaar, ook verwacht Machinebouwer niet dat het tussentijds bijvullen extra tijd gaat opleveren.
6. *Er is altijd voldoende Bulk aanwezig om de benodigde trays te vullen.* Het is aan werknemers van Producent om te zorgen dat deze bakken niet leegraken. Voor het bijvullen van de productielijn hoeft het proces niet stilgelegd te worden, dus dit zou geen invloed moeten hebben op de productielijn.
7. Een Part Placer kan maar één carrier tegelijkertijd vullen en een carrier kan maar door één Part Placer tegelijkertijd gevuld worden. Praktisch zou het misschien mogelijk moeten zijn

om meerdere carriers tegelijkertijd te vullen en daarmee de bezettingsgraden uit te balanceren, maar er is gekozen voor een toegewijde vulplaats per Part Placement station.

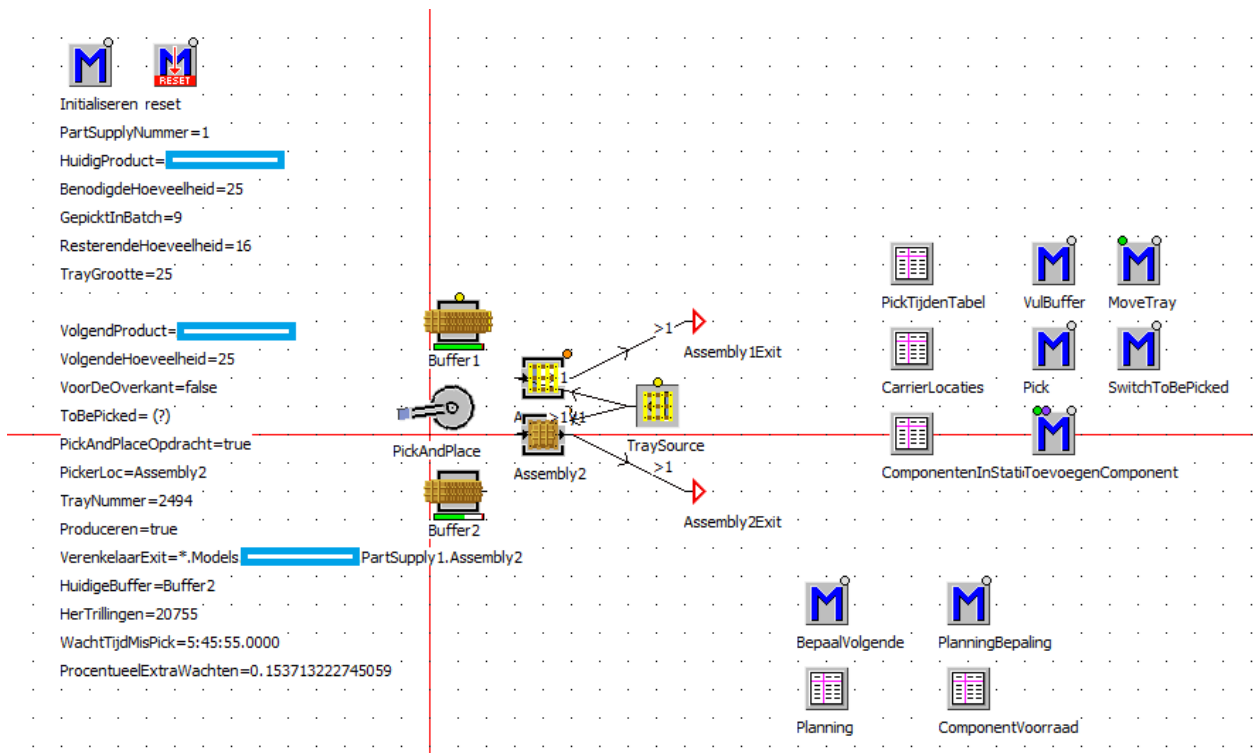
8. *Robots zitten elkaar nooit in de weg.* In de simulatie kunnen robots door elkaar heen bewegen. Deze versimpeling is gedaan omdat het erg veel tijd zou kosten om hier omheen te werken. Visuele analyse in het simulatiemodel doet vermoeden dat dit geen groot probleem vormt.
9. *Mispicks bij de Part Placement resulteren altijd in het “verlies” van het benodigde component.* Mispicks kunnen in de realiteit op meerdere manieren tot stand komen, maar we gaan ervan uit dat deze altijd gepaard gaan met het verlies van het component waarop de mispick is gedaan. Het gevolg hiervan is dat de ideale aanlevervolgorde van trays verandert gedurende de simulatie.

4.2 – Het Simulatiemodel zelf

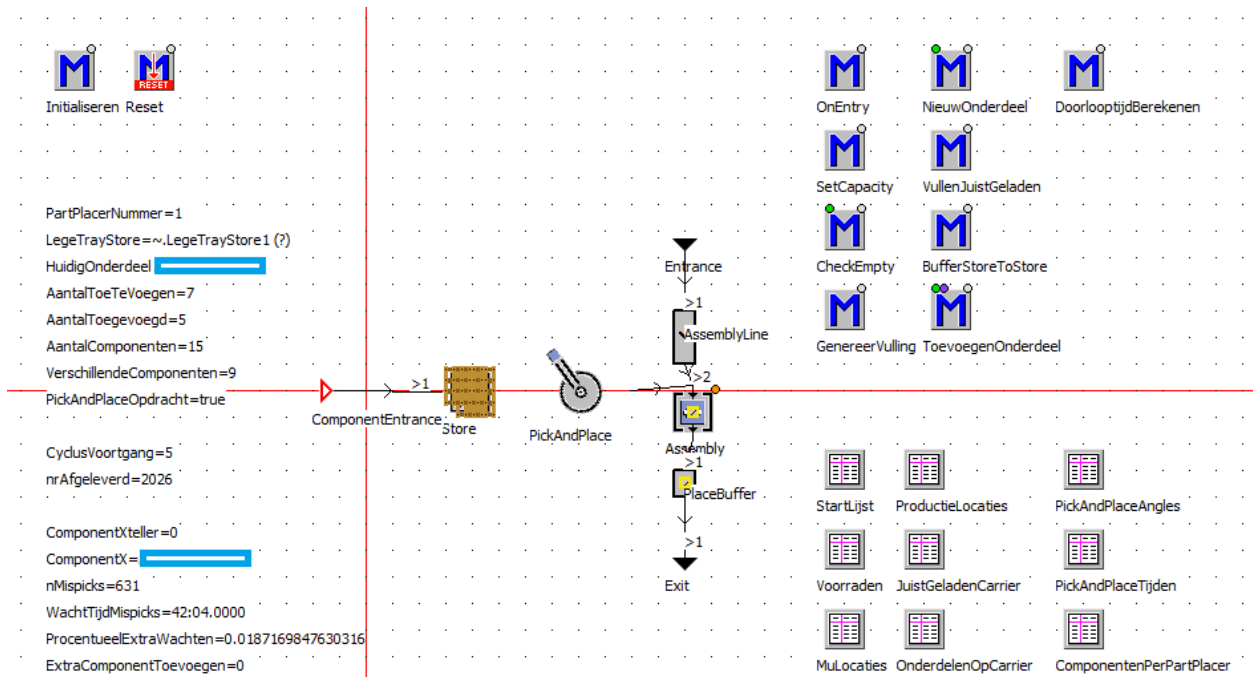
Het simulatiemodel is gebouwd in Siemens Plant Simulation, een discrete-event simulation tool. Er is voor dit programma gekozen omdat dit programma gebruikt wordt gedurende de opleiding Technische Bedrijfskunde aan University of Twente. De entiteiten in het model werken samen door middel van connectors en door de gebruiker geschreven code. Deze code wordt in methoden gezet, die op vaste momenten geactiveerd kunnen worden (zoals bij binnenkomst van een onderdeel in een buffer). Een deel van deze code is benodigd om het proces op de juiste manier te laten verlopen, maar er is ook een deel dat ervoor zorgt dat de gewenste KPI's gemeten kunnen worden en een deel dat telkens controleert of de carriers wel op de juiste manier gevuld zijn. Het bouwen van modellen die zijn gebaseerd op objecten en de interactie tussen deze objecten heet object geïntegreerd modelleren.

Als eerste zijn de frames ontworpen, dit zijn sub-onderdelen van het systeem. Het voordeel van frames is dat je deze meerdere keren in je hoofdmodel kan plaatsen, waardoor je een type station maar één keer hoeft te ontwerpen. Als er later dan dingen aangepast worden wordt dit in het hele systeem aangepast, zodat er geen fouten in het systeem sluipen.

Er zijn twee frames ontworpen: het Part Supply station en het Part Placement station, deze staan respectievelijk in figuur 8 en figuur 9.

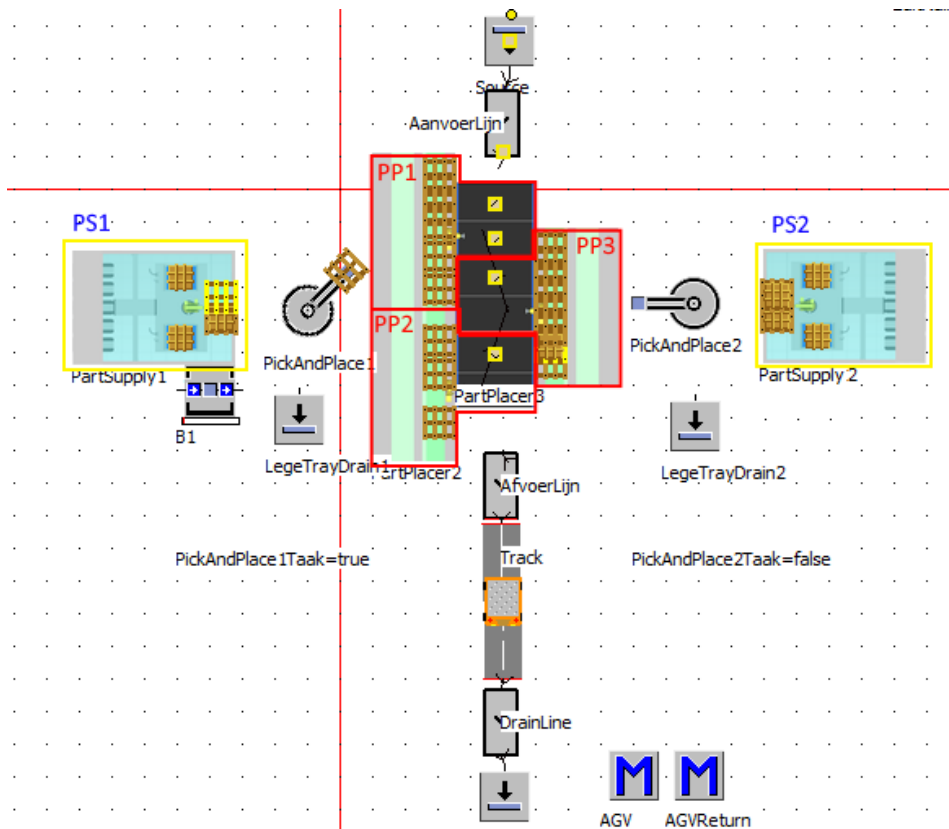


Figuur 8: Het Part Supply station in Plant Simulation



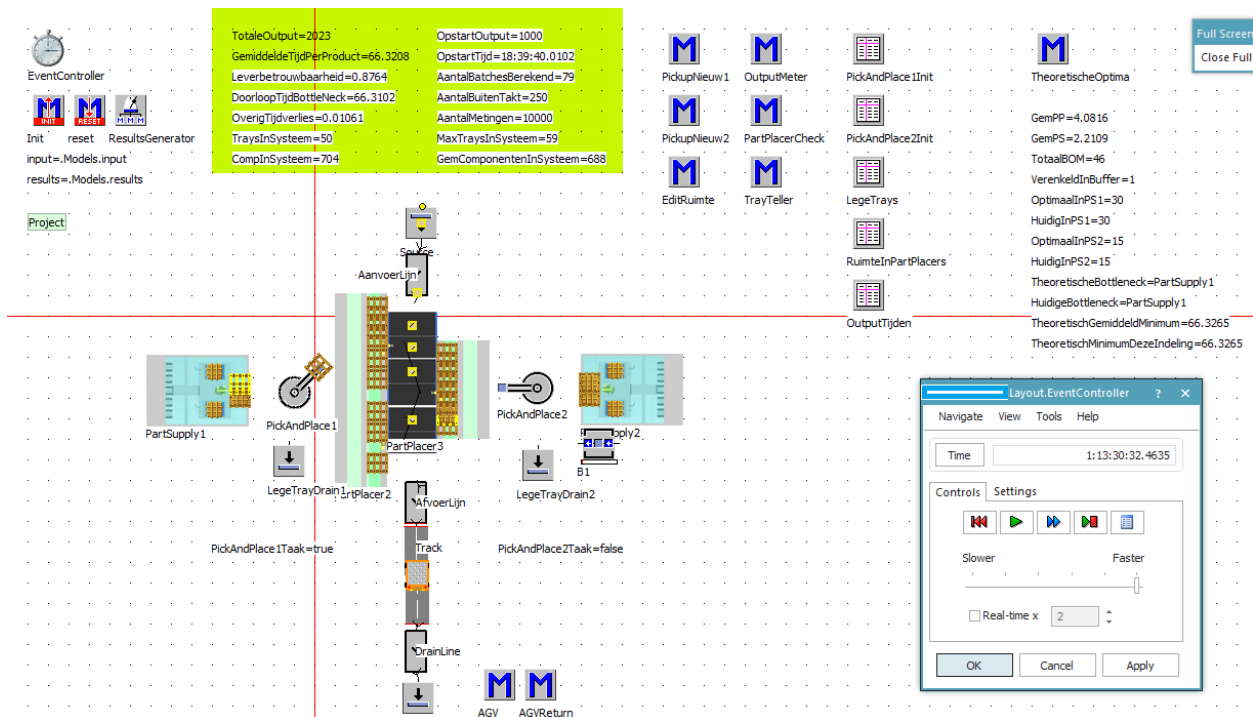
Figuur 9: Het Part Placement station in Plant Simulation

Deze frames zijn vervolgens meerdere keren in het overkoepelende model gezet, zoals afgebeeld staat in figuur 10.



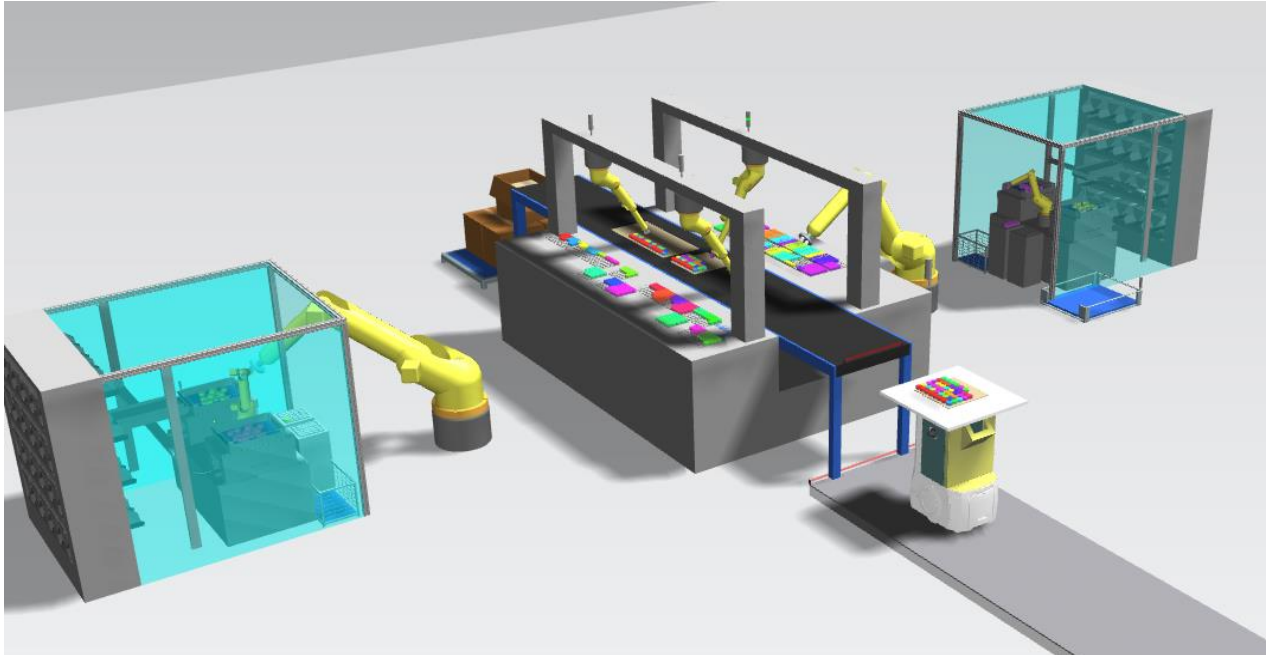
Figuur 10: Frames van Part Supply en Part Placement samengevoegd

Samen met andere methodes en variabelen heeft dit gezorgd voor het uiteindelijke simulatiemodel. Een grafisch overzicht van dit simulatiemodel staat in figuur 11.



Figuur 11: Uiteindelijk 2D Plant Simulation simulatiemodel

Daarna is het simulatiemodel omgezet naar een 3d model. Een deel van de graphics voor dit model is aangeleverd door Machinebouwer, en een ander deel is overgenomen vanuit de graphicsdatabase van Siemens Plant Simulation. Deze 3d graphics maken het eenvoudiger om simulatiefouten op te sporen (trays leggen geen juist pad af) en om processen te optimaliseren (bij inspectie van het proces lijken trays in verkeerde volgorde te worden aangeleverd). Daarnaast helpt het 3d model om andere partijen, zoals Machinebouwer en Producent, sneller te laten begrijpen wat er precies in het proces gebeurt en is het eenvoudiger om feedback te krijgen van de mensen met de juiste expertise. Een weergave van het 3d model staat in figuur 12.



Figuur 12: 3D weergave van het simulatiemodel

4.3 – Opwarmperiode, herhalingen en loopduur

Omdat we in de volgende paragraaf gebruik maken van output van het model, zullen we eerst moeten kijken op welk moment van de simulatie betrouwbare output gegenereerd wordt. In paragraaf 4.1.1 stelden we al vast dat we met een non-terminating simulatie werken en dat we dus rekening moeten houden met een opwarmperiode. Dat is de tijd die het systeem nodig heeft om in een evenwichtstoestand te komen. Hiervoor gebruiken we de methode van Welch (zie appendix 1). Daarbij komen we uit een opwarmfase van 1200 carriers. Tijdens het samenstellen van deze 1200 carriers heeft het systeem zich langzaam gevuld en hebben de Part Placement stations genoeg picks en dus ook mispicks gedaan om de voorraadviveaus van verschillende componenten te randomiseren.

Voor de loopduur moeten we minimaal 10 maal de opwarmfase gebruiken (Robinson, 2014). Omdat het model niet heel snel draait zullen we 10 maal de opwarmfase als loopduur gebruiken. De totale lengte van een simulatierun wordt dan 13.200 producten.

Ook hebben we niet genoeg aan één run van het model. Omdat het model gebruik maakt van willekeur zal de output van de ene simulatierun anders uitvallen dan de output van de andere simulatierun. Om de impact van deze willekeur op onze KPI's te beperken zal het model meermaals gerund moeten worden met verschillende randomgetal reeksen. Het minimaal benodigde aantal van deze replicaties is 2, zie appendix 2. De impact van random reeksen in ons model is relatief laag omdat er maar twee stochastische processen in ons simulatiemodel zitten (deze zijn de kans op hertrilling in de Part Supply en de mispicks in de Part Placement stations).

Wanneer niet anders vermeld gaan we dus uit van een loopduur van 13.200 producten waarvan de output van de eerste 1200 producten niet wordt meegenomen in de metingen. De simulatie wordt per experiment twee maal gedraaid met verschillende willekeurige getallen zodat we de grove impact van verschillende experimenten in kaart kunnen brengen. Als we preciezere output nodig hebben dan zullen we meer replicaties gebruiken.

4.4 – Validatie en verificatie van het simulatiemodel

In paragraaf 3.7.4 zagen we al het doel van modelvalidatie en modelverificatie. In 4.4.1 zullen we dus ook kijken naar de verificatie van het door ons gemaakte model. In 4.4.2 zullen we de modelvalidatie bespreken.

4.4.1 – Verificatie

Verificatie is het controleren of het conceptueel model juist gedigitaliseerd is, en het verifiëren zou je kunnen zien als het debuggen van het model, het controleren of het model doet wat die moet doen.

1. Seed independence

De Seed independence verificatiemethode kijkt naar de impact van random nummer reeksen op de output van het simulatiemodel. Elke reeks heeft in de simulatiesoftware een eigen nummer, de zogeheten *seed value*. Door het model te testen met verschillende *seed values* en de uitkomsten te vergelijken kunnen we de impact van de random reeksen achterhalen. Het zou voor de output geen significant verschil mogen maken welke *seed value* je gebruikt, vandaar de naam van de methode. Mocht de impact van de random variabelen te groot zijn dan kunnen we geen eenduidige resultaten verwerven en dat zou het nut van het simulatiemodel kunnen beperken.

We hebben het model met tien verschillende *seed values* gedraaid met de gebruikelijke loopduur. De resultaten hiervan staan in tabel 2.

Tabel 2: Output voor GP1 met verschillende *seed values*

Run nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cyclustijd	62.008	62.001	61.954	62.002	62.012	61.979	61.930	61.962	61.975	61.970

Het verschil tussen de minimale en de maximale uitkomsten van de runs is 0.13%, ofwel ~5 seconden voor elk uur. We concluderen dat de impact van *seed value* reeksen op de output van het simulatiemodel erg klein is en dus dat het model, qua impact van de random variabelen, geschikt is om eenduidige resultaten te genereren. Om de effecten van de *seed values* toch zo te verkleinen zullen we gebruik maken van replicaties, zoals in paragraaf 4.3 besproken.

2. Degeneracy Testing

Degeneracy Testing is een verificatiemethode waarbij je kijkt hoe het theoretisch model onder extreme omstandigheden opereert. Je test de gevoeligheid van het systeem dus niet op basis van afhankelijkheid van willekeur, maar op basis van inputvariabelen. Hier maken wij in ons model ook gebruik van door bij onze input naast de standaard productsamenstellingen ook grotere en kleinere samenstellingen te toetsen in al onze testen. Deze samenstellingen staan in Appendix 3. We zullen bij onze resultaten geen noemenswaardige grotere afwijkingen zien naarmate productsamenstellingen veel groter of kleiner worden (zie paragraaf 6.1). Daarmee slaagt het model ook voor deze test.

3. Gevoeligheidsanalyse

Omdat het systeem nog niet daadwerkelijk gebouwd is zijn de inputparameters zoals de pick-and-place tijden en de kans op een mispick geschat door Machinebouwer. Om die reden hebben we ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de verwerkingstijden en de kans op mispicks.

In het eerste deel van de experimenten blijven de gemiddelde pick-and-place tijden van stations gelijk maar variëren de foutkansen en de basistijden van picks van de Part Supply en Part Placement stations. In de kolom “Laagst mogelijk” staat de theoretische minimale gemiddelde cyclustijd, analytisch berekend. In de kolom “Laagst i.c.m. indeling” wordt er beredeneerd wat de minimale gemiddelde cyclustijd met de huidige machine planning is. We zien in deze getallen bij de verschillende experimenten (op een kleine afronding na) geen verschillen, omdat de inputwaarden zo zijn gekozen dat de P_s en P_p (zie paragraaf 2.4) hetzelfde blijven. Om deze reden zien we ook geen verschillen in de bezettingsgraden van de Pick and Place robots.

In de gerealiseerde cyclustijd zitten geen grote verschillen, maar we zien wel dat de leverbetrouwbaarheid (het percentage producten dat binnen 70s na het vorige product uit het systeem komt rollen) is gedaald bij de experimenten waarvan de kans op een mispick bij het Part Placement station omhoog is gegaan.

Het systeem werkt dus nog steeds naar behoren, ook wanneer de totstandkoming van de analytisch benaderde cyclustijd anders in elkaar zit. Omdat de theoretische bottleneck van GP1 het Part Supply station is, is een tweede conclusie die we kunnen trekken dat het deel van de producten die binnen de beoogde cyclustijd van 70 seconden nauw samenhangt met de kans op mispicks in het Part Placement station, ongeacht van het feit of dit de bottleneck is.

Tabel 3: Gevoeligheid van kansen en triltijden waarbij gemiddelden hetzelfde blijven

Product: GP1	Placer P&P	Placer p(mis)	Supply P&P	Supply p(mis)	Tritijd (s)	Laagst Mogelijk	Laagst i.c.m. indeling	Gem Takt	deel onder 70s
Nulmeting	4	0.02	1.8333	0.25	1	65.656	65.656	65.683	0.889
Exp 01	4	0.02	1.8333	0.4	0.5	65.656	65.656	65.706	0.886
Exp 02	4	0.02	1.8333	0.5	0.3333	65.656	65.656	65.665	0.890
Exp 03	3.92	0.0396	1.7901	0.25	1	65.656	65.656	65.764	0.764
Exp 04	3.8776	0.05	1.7671	0.25	1	65.657	65.657	65.790	0.708

Product: GP1	Placer P&P	Placer p(mis)	Supply P&P	Supply p(mis)	Tritijd (s)	Supply1 (P&P)	Supply2 (P&P)	Placer1 (P&P)	Placer2 (P&P)	Placer3 (P&P)
Nulmeting	4	0.02	1.8333	0.25	1	0.826	0.399	0.869	0.931	0.993
Exp 01	4	0.02	1.8333	0.4	0.5	0.826	0.399	0.869	0.931	0.993
Exp 02	4	0.02	1.8333	0.5	0.3333	0.827	0.399	0.870	0.932	0.993
Exp 03	3.92	0.0396	1.7901	0.25	1	0.822	0.398	0.868	0.930	0.992
Exp 04	3.8776	0.05	1.7671	0.25	1	0.820	0.397	0.868	0.930	0.992

In het tweede deel van de gevoeligheidsanalyse kijken we hoe het systeem reageert als er picktijden of foutkansen afzonderlijk omhoog gaan. In deze gevallen veranderen de P_s , P_p en de verhoudingen tussen deze twee.

Tabel 4: Gevoeligheid van kansen afzonderlijk

Product: GP1	Placer P&P	Placer p(mis)	Supply P&P	Supply p(mis)	Tritijd (s)	Laagst Mogelijk	Laagst i.c.m. indeling	Gem Takt	deel onder 70s
Nulmeting	4	0.02	1.8333	0.25	1	65.656	65.656	65.683	0.889
Exp 05	4.4	0.02	1.8333	0.25	1	67.697	72.187	72.267	0.169
Exp 06	4	0.03	1.8333	0.25	1	66.329	66.329	66.418	0.817
Exp 07	4	0.02	2	0.25	1	69.048	69.048	69.092	0.857
Exp 08	4	0.02	1.8333	0.275	1	65.656	65.656	65.707	0.888
Exp 09	4	0.02	1.8333	0.25	1.1	65.656	65.656	65.687	0.886

Product: GP1	Placer P&P	Placer p(mis)	Supply P&P	Supply p(mis)	Tritijd (s)	Supply1 (P&P)	Supply2 (P&P)	Placer1 (P&P)	Placer2 (P&P)	Placer3 (P&P)
Nulmeting	4	0.02	1.8333	0.25	1	0.826	0.399	0.869	0.931	0.993
Exp 05	4.4	0.02	1.8333	0.25	1	0.751	0.363	0.869	0.931	0.994
Exp 06	4	0.03	1.8333	0.25	1	0.826	0.399	0.869	0.930	0.993
Exp 07	4	0.02	2	0.25	1	0.856	0.415	0.827	0.885	0.945
Exp 08	4	0.02	1.8333	0.275	1	0.826	0.399	0.869	0.931	0.993
Exp 09	4	0.02	1.8333	0.25	1.1	0.826	0.399	0.869	0.931	0.993

We zien dat de gemiddelden nu wel significant omhoog gaan, maar dat ook het verwachte minimum omhoog gaat. Omdat met nieuwe procestijden de huidige machineplanning in sommige gevallen niet meer optimaal is, stijgt de gemiddelde cyclustijd nog harder. Wel blijft het systeem zich nog steeds gedragen zoals verwacht; de cyclustijden blijven ongeveer gelijk aan de minimale cyclustijd voor de gekozen planning. In de laatste twee experimenten verandert er niets aan de gemiddelde cyclustijd ten opzichte van de nulmeting, omdat de wijzigingen niet hebben geleid tot een langere doorlooptijd van de oude bottleneck of het creëren van een nieuwe bottleneck.

Uit deze experimenten kunnen we concluderen dat veranderingen in standaardtijden van handelingen de grootste impact hebben op de gemiddelde cyclustijd. Hogere kansen op mispicks in de bottleneck resulteren in een lagere leverbetrouwbaarheid, ook wanneer de basistijden van de handelingen in verhouding even ver omlaag gaan. Het laatste punt wat we hieruit opmerken is dat wanneer bij invoering van het systeem blijkt dat de verwerkingstijden in stations variëren, de machineplanning opnieuw beken moet worden omdat kleine verschillen anders grotere gevolgen kunnen hebben op de doorlooptijd dan nodig.

4. Animatie

Bij verificatie door animatie maak je gebruik van de visualisatie van de simulatiesoftware om het model te verifiëren. We hebben elk componenttype een aparte kleur gegeven en via de 3d weergave gekeken of de productievолgorde logisch is, of de componenten geen onverwachtse sprongen in het systeem maken, of er geen trays zijn die niet uniform gevuld zijn en ook om te kijken waar blokkeringen optreden. Deze vorm van verificatie is iteratief gebruikt gedurende het ontwerp van het simulatiemodel.

4.4.2 – Modelvalidatie

Validatie is het testen van de geschiktheid van het model voor het beoogde doel. Het is belangrijk dat het doel van de simulatie in het achterhoofd wordt gehouden bij de validatie. Dit doel is het inzichtelijk maken van de prestaties van het systeem, afhankelijk van het ontwerp van het systeem en de inputvariabelen.

Aannames en versimpelingen

In paragraaf 4.1.4. bespraken we welke aannames we voor ons simulatiemodel hebben gedaan en waarom we deze moesten doen. Ook bespraken we welke versimpelingen we moesten doorvoeren en waarom deze versimpelingen gedaan konden worden. Omdat we geen aannames of versimpelingen hebben gedaan die botsen met het doel van de simulatie concluderen we dat op dit gebied het model niet invalide is.

Outputwaarde controle

Omdat er nog geen realisatie is van het beoogde systeem kunnen we het model niet vergelijken met de praktijk. Wel is het mogelijk om bepaalde output op een analytische manier te berekenen en dat te vergelijken met de outputwaarden van ons model. Eerder, in paragraaf 3.3, toonden we al aan hoe de doorlooptijd van de bottleneck analytisch benaderd kon worden. Omdat we vervolgens buffers hebben ingezet om de cyclustijd gelijk te houden aan de doorlooptijd van de bottleneck, kunnen we het simulatiemodel verder valideren door de cyclustijd van het simulatiemodel te vergelijken met de theoretische doorlooptijd van de bottleneck. Dit hebben we voor zes verschillende producten gedaan, die variëren in grootte en verwachte bottlenecks. De resultaten van de productieruns, die met vijf replicaties zijn gedraaid, staan in tabel 5.

Tabel 5: Doorlooptijden bottleneck versus gemiddelde cyclustijd

Product	#componenten	#handmatig Cyclustijd		Verwachte Cyclustijd	Verschil
		verenkeld	Simulatie		
GP1	45	2	61.992	61.905	-0.087
GP2	46	1	65.852	65.656	-0.196
KleinPP	35	0	53.508	53.411	-0.096
KleinPS	37	1	50.867	50.850	-0.017
GrootPP	53	1	72.977	72.958	-0.019
GrootPS	51	1	75.189	75.169	-0.020

Ook hebben we in ons simulatiemodel controles aangebracht die de bezettingsgraden van stations meet. Deze zouden zich hetzelfde tot elkaar moeten verhouden als de gemiddelde doorlooptijden van de stations zich tot elkaar verhouden. Wanneer we het model draaien met twee replicaties en 13.200 producten, waarbij we vanaf 1200 producten beginnen met meten (zie paragraaf 4.3) dan komen we voor de 6 producten uit op een gemiddelde afwijking van 0.1%. We concluderen we dat het model qua structuur valide genoeg is.

5 - Interventies

In dit hoofdstuk zullen we kijken naar ingrepen die we kunnen doen om het systeem sneller te laten produceren. De mate van verbetering bepalen we op basis van veranderingen in de waargenomen cyclustijd, daarom zullen we in 5.1 eerst kijken naar de nulmetingen voor verschillende producten. Vervolgens zullen we in 5.2 kijken waar eventuele verbeterpunten zitten, deze theoretisch onderbouwen en de impact van de interventies proberen te benaderen. In 5.3 trekken we conclusies uit deze interventies

5.1 – Nulmetingen

De inputvariabelen voor de experimenten en nulmetingen worden gedaan op basis van de schattingen vanuit Machinebouwer. De verwerkingsplekken van de SKU's zijn per te maken product reeds optimaal verdeeld over stations en we gaan ervan uit dat de systemen op alle in paragraaf 3.4 genoemde plekken bufferposities hebben.

We meten naast twee gangbare producten (GP1 en GP2) ook kleinere en grotere productsamenstellingen, zoals in paragraaf 4.4.2 al bij *Degeneracy Testing* genoemd werd. Bij deze producten maken we ook onderscheid tussen de bottlenecks. We hebben dus grote en kleine producten met Part Supply en Part Placement bottlenecks.

	Bottleneck	
	Part Supply	Part Placement
Veel geproduceerd	GP1	GP2
Kleiner testproduct	KleinPS	KleinPP
Groter testproduct	GrootPS	GrootPP

De productsamenstellingen zijn te vinden in Appendix 3. Om de stationstoewijzing niet steeds aan te hoeven passen zijn deze nieuwe producten zo in benodigde SKU-aantallen samengesteld dat ze reeds aan het juiste station zijn toegewezen.

Uit de nulmetingen voor de twee gangbare producten (Appendix 3, GP1 en GP2) blijkt dat de cyclustijden gemiddeld respectievelijk 61,99 en 65,85 seconden zijn. Dit valt onder de gestelde eis van Producent. Verder vallen respectievelijk 96,88% en 81,51% van de gemeten cyclustijden onder de 70 seconden. De overige verdeling van deze output staat in Appendix 5, daarbij staan ook de rest van de resultaten van deze nulmetingen.

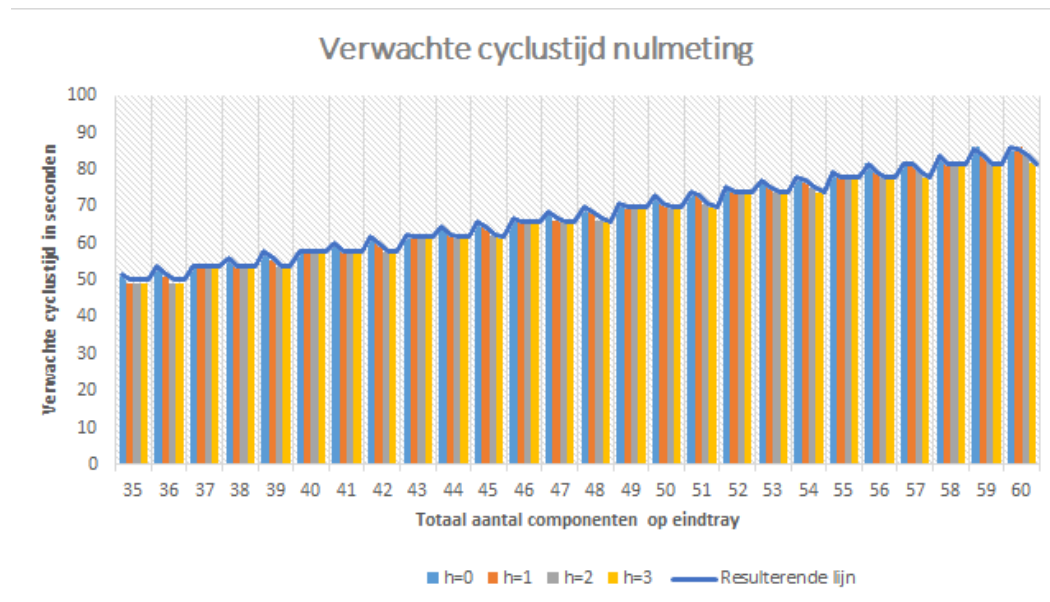
We zullen bij de interventies die we gaan doen steeds de verwachte resultaten analytisch berekenen, door per schema product de verwachte cyclustijd te berekenen, zoals we eerder ook in paragraaf 3.2 deden:

$$cyclustijd = \max \begin{cases} t_{ps} * n_{ps1} & \text{part supply 1} \\ t_{ps} * n_{ps2} & \text{part supply 2} \\ t_{pp} * n_{pp1} + 0,35 & \text{partplacement 1} \\ t_{pp} * n_{pp2} + 0,35 & \text{partplacement 2} \\ t_{pp} * n_{pp3} + 0,35 & \text{partplacement 3} \end{cases}$$

De berekening van de optimale stationsinvulling staan per interventie in Appendix 6.

Dit doen we ook voor de nulmeting. Gegeven de samenstellingen van de producten waarmee we werken, namelijk 45 en 46 componenten, hebben we besloten om producten van 35 tot en met 60 componenten te toetsen. Per componentaantal in een product steeds gekeken naar 0, 1, 2 en 3 componenten die met de hand verenkeld worden (dit wordt steeds aangeduid met H), omdat blijkt dat dit aantal vaak een noemenswaardige impact heeft op het resultaat. Er zijn dus vier (vaak verschillende) schattingen geplot in de grafiek per componentaantal. Dit staat ook weergegeven in figuur 13.

Omdat we later meerdere van deze verwachte cyclustijden met elkaar willen vergelijken om de impact van de interventies duidelijk te maken zullen we echter de staafdiagrammen hierna omwille van een duidelijkere vergelijking weglaten, figuur 13 moet inzicht bieden in de totstandkoming van de resulterende lijn.

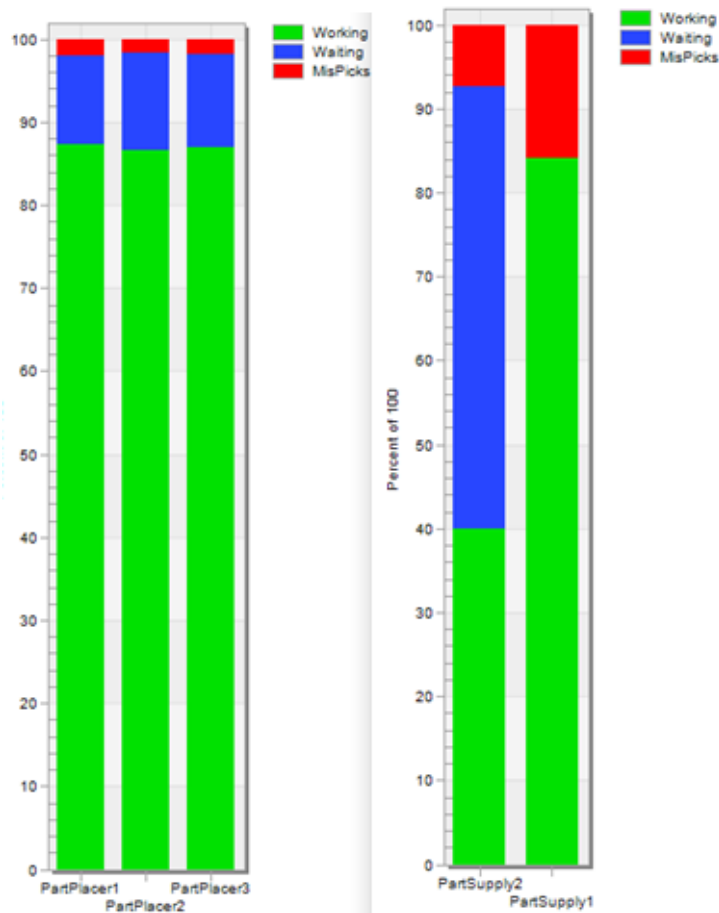


Figuur 13: Verwachte cyclustijd nulmeting

5.2 – Opzet Interventies

De hieronder genoemde interventies hebben als doel om met een relatief kleine investering grote prestatieverbeteringen te realiseren. De belangrijkste vergelijkingsfactor hierbij is de gemiddelde cyclustijd, maar we zullen ook prestatieverbeteringen kunnen uitlezen uit de bezettingsgraden van machines.

In figuur 14 staan de gemiddelde bezettingsgraden van de Pick & Place robots in de Part Supply en Part Placement stations na de productierun van GP1, een (volgens Producent) op basis van componentaantal gemiddeld product die daarnaast ook veel geproduceerd wordt.



Figuur 14: bezettingsgraden Pick & Place robots bij GP1

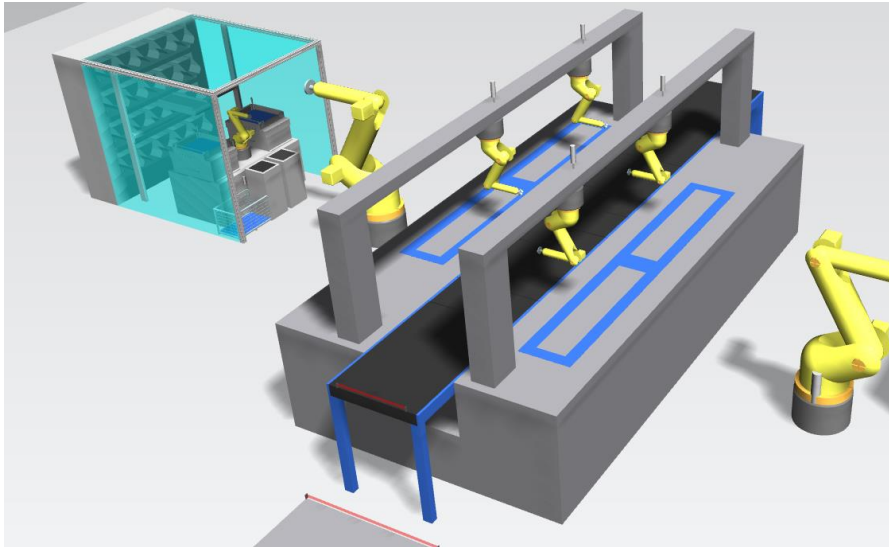
We zien dat de Part Supply die aan één Part Placement station levert het merendeel van de tijd niets te doen heeft, terwijl de Part Placement stations niet eens op volle capaciteit draaien. Als we een deel van de onbenutte capaciteit van het tweede Part Supply station kunnen inzetten voor het eerste Part Supply station, dan zou de belasting van het meeste belaste station (dus de bottleneck) afnemen. Niet alleen de gemiddelde outputtijd zou daardoor omlaag gaan, maar de bezettingsgraden van de andere stations zouden dan ook omhoog gaan.

Zoals we voorheen de doorlooptijden voor verschillende producten zonder interventies hebben benaderd zullen we dit ook doen voor producten die op een lijn mét interventies worden samengesteld. In *Appendix 6: Berekening stationvulling bij*

interventies zal per interventie uitgelegd staan met welke systeeminvulling we bij de theoretische impact van de interventies zijn gekomen. Uiteindelijk zullen we een greep van deze producten simuleren om te kijken of de resultaten overeenkomen met de verwachting en om te kijken hoe de overige KPI's waar we geen duidelijk beeld van hebben worden beïnvloed door de interventies.

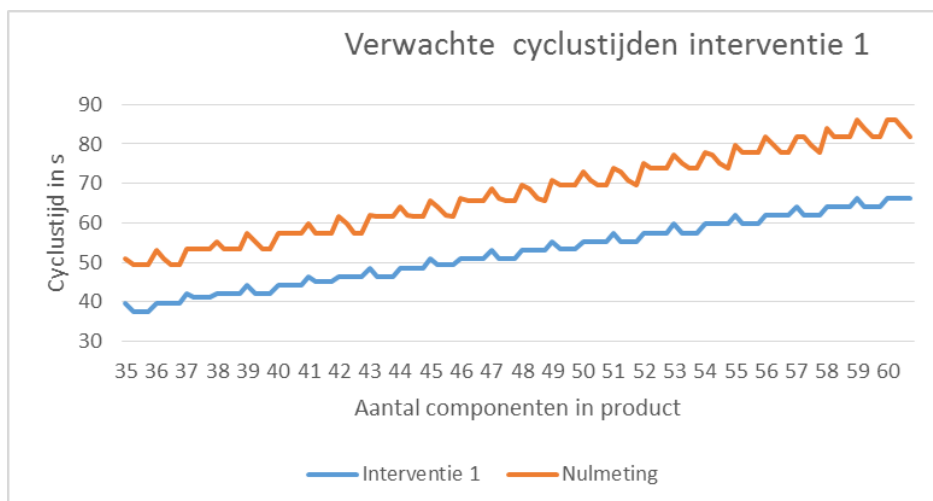
5.2.1 – Interventie 1: Een extra Part Placement station

Een opstap naar de eerste mogelijke verbetering voor het beter verdelen van de werkdruk kwam in paragraaf 3.2 voorbij, waarbij we constateerden dat een verhouding van één part supply op twee part placement stations optimaal is. In deze verhouding zullen alle stations een gelijkwaardige werkdruk ervaren en zullen de gemiddelde bezettingsgraden het hoogst zijn. Ook zal het makkelijker zijn om een goede, gebalanceerde planning voor de machines te maken. In deze interventie zullen we dus een extra Part Place station toevoegen. De resulterende opstelling hiervan staat in figuur 15.



Figuur 15: Invulling interventie 1

De verwachte cyclustijden staan in gevisualiseerd in figuur 16, alle getallen zullen steeds te vinden zijn in appendix 7. Er blijkt een verbetering van tussen de 20 en 25% te behalen door een extra Part Placement station toe te voegen, terwijl er maar één robot toegevoegd hoeft te worden aan het huidige systeem van 7 Pick-and-Place robots. De verwachting is dus dat dit een relatief kleine investering is.



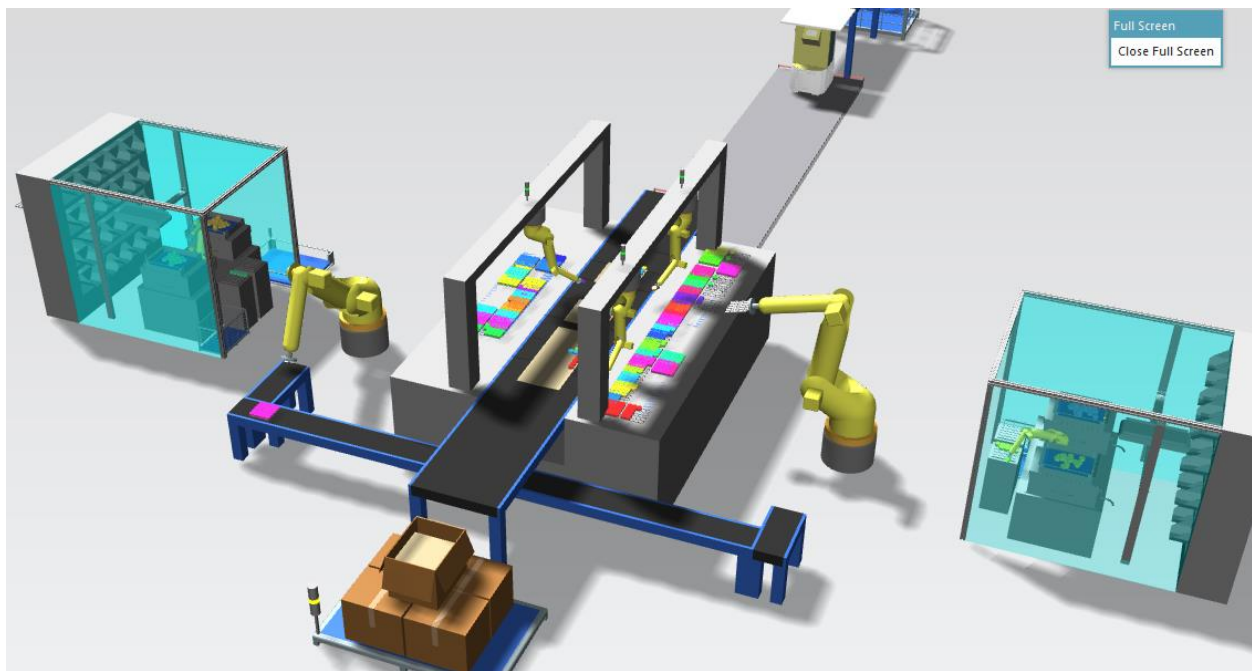
Figuur 16: Verwachte resultaten interventie 1 t.o.v. de nulmeting

5.2.2 – Interventie 2: Flexibiliteit in Part Supply – Part Placement leveringen.

Als we verder gaan kijken naar mogelijkheden om de pieken van verschillende stations uit te levelen en dus het maximale uit de investering van de stations te halen zonder extra stations toe te voegen, dan moeten we kijken naar een systeem waarbij de doorgaans onderbeladen stations kunnen helpen om de last van de doorgaans overbeladen stations te verminderen. Een systeem dat altijd veel *idle-time* heeft, is het Part Supply station die aan één Part Placement station levert.

Door ervoor te zorgen dat de trays uit dit Part Supply station verplaatst kunnen worden naar de andere kant van de lijn, kunnen we de toevoer van trays aan Part Placement station één en Part Placement station 2 vergroten.

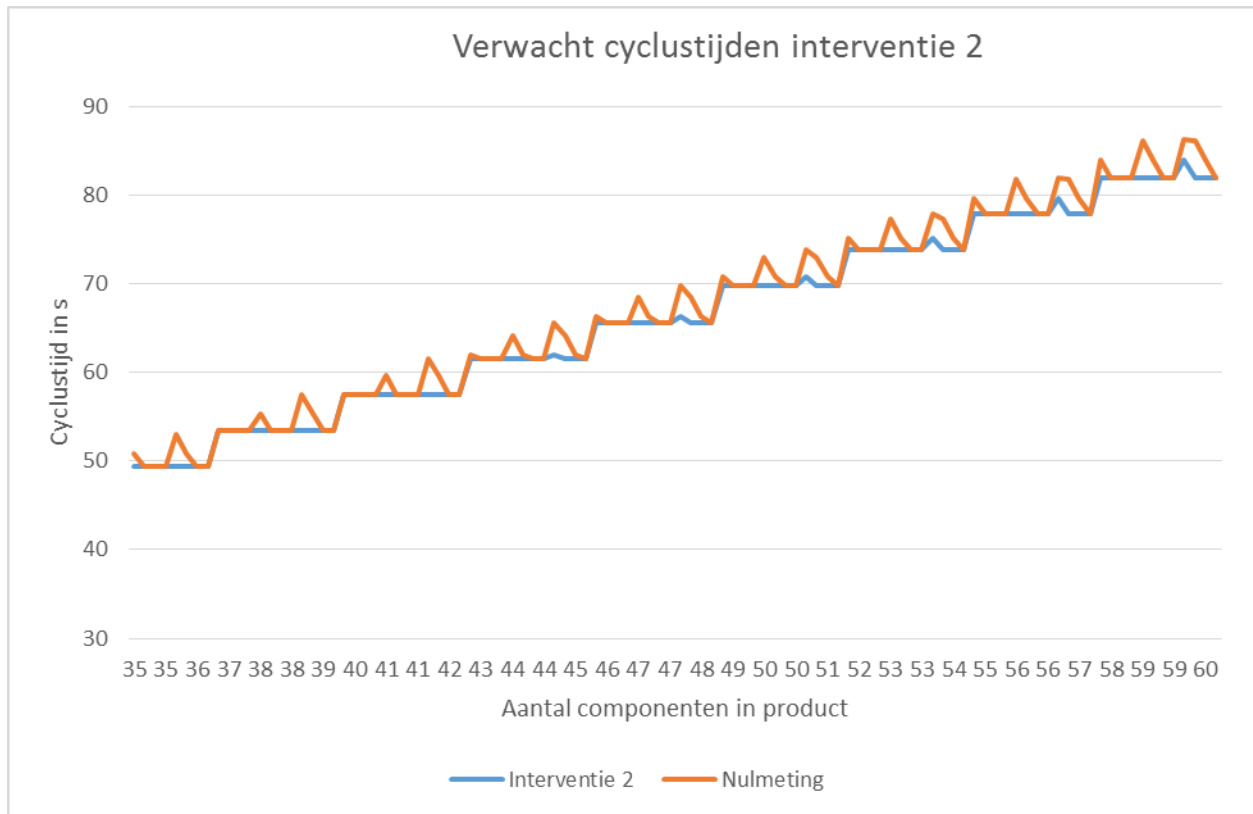
Een mogelijke opstelling hiervoor is te zien in figuur 17, waar trays door de Middenpicker (in de figuur links) op de kleine loopband worden geplaatst, die de trays transporteert naar de oppakrange van de andere Middenpicker.



Figuur 17: Opstelling waarin het linker Part Supply station ingezet kan worden om de rechter te helpen

Naast de voordelen van het extra produceren van trays door Part Supply station 2 aan Part Placement stations 1 en 2 heeft het systeem ook twee nadelen. De eerste is dat het systeem complexer wordt omdat er nieuwe communicatie nodig is tussen stations (Part Supply 2 met Part Placer 1, Part Placer 2 en Part Supply 1). Daarnaast is er niet met elke componentsamenstelling winst te behalen door dit systeem in te voeren. We zagen in hoofdstuk 3 dat de bottleneck van het systeem afhankelijk is van het totaal aantal benodigde componenten. Dit systeem zal alleen de bottleneck verminderen als de bottleneck daadwerkelijk een Part Supply station is.

Toch valt er in veel gevallen wel tijdswinst te behalen (zie figuur 18) en zijn de kosten van deze loopbanden een aanzienlijk stuk kleiner dan de kosten van een Part Placement station.



Figuur 18: Verwachte resultaten van interventie 2 t.o.v. de nulmeting

5.2.3 – Interventie 3: Flexibiliteit in Part Placement plaatsingsstrategie.

Tot nu toe zijn we uit gegaan van vast deel van de SKU's per Part Placement station. We kunnen niet elk Part Placement station eigen carriers laten volplaatsen omdat we niet een genoeg voorraad plaatsen hebben per Part Placement station, noch genoeg Bulkbakken in de Part Supply stations om alle SKU's voor een gemiddeld product te herbergen. Toch is er wel een kleine speling in deze stations.

Wanneer we producten samenstellen met componentenaantallen deelbaar door drie, dan hebben alle part placers in theorie dezelfde bezettingsgraad. Wanneer het niet deelbaar is door drie zal dit echter niet het geval zijn en dan zal/zullen telkens één of twee part placement machines een component meer moeten plaatsen dan één of twee van de andere Part Placers.

De laatste ingreep die we dus zullen uittesten is het variabel maken van de plaatsingslocatie van één SKU. Als het totaal aantal te plaatsen componenten bij deling door drie een restwaarde heeft van één dan zal dit een SKU zijn waarvan één component benodigd is, en bij een restwaarde van twee zal dit een SKU zijn waarvan twee componenten benodigd zijn.

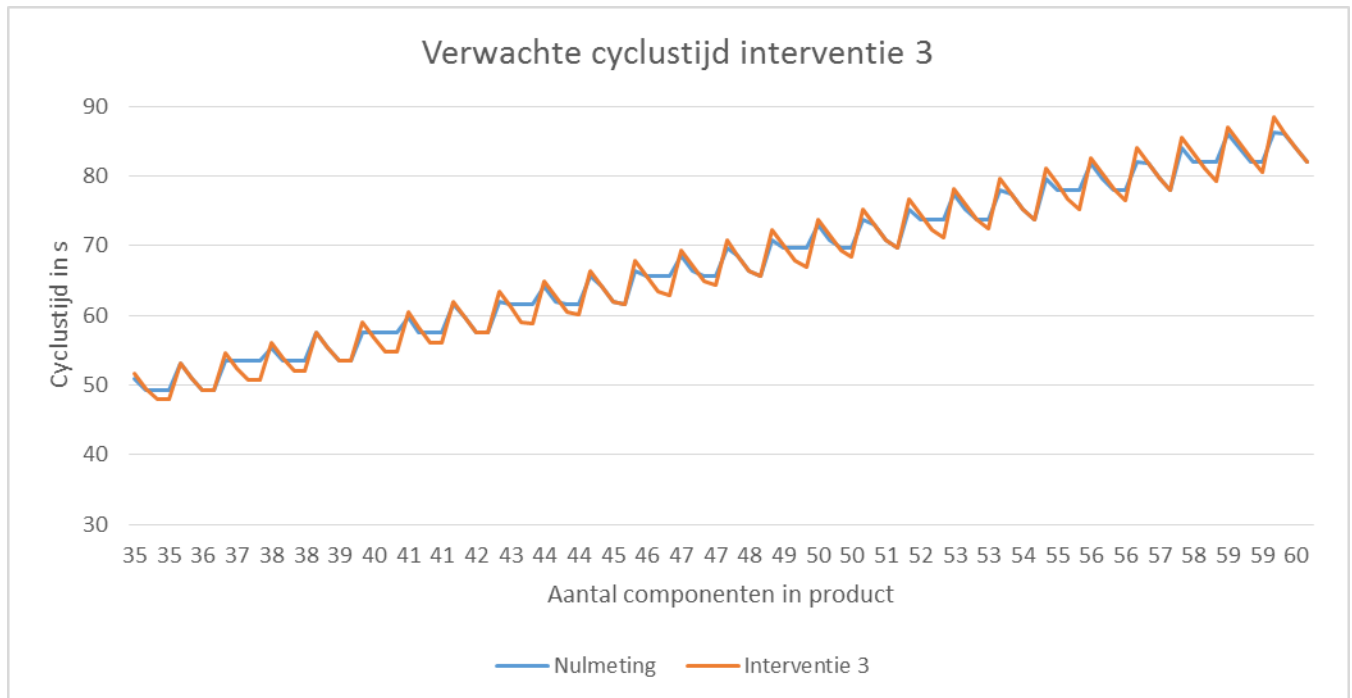
Dit laatste component zal in x van de drie gevallen geplaatst worden bij een plaatsingsstation en altijd bij x stations geplaatst worden, waarbij x gelijk is aan de restwaarde van het totaal aantal te plaatsen componenten delen door 3. Een voorbeeld hiervan staat in figuur 19.

Figuur 19: Verdelen van component over Part Placement stations

OUD	Componenten:	46 /3, rest: 1			OUD	Componenten:	47 /3, rest: 2		
	Part Placement 1	Part Placement 2	Part Placement 3		Part Placement 1	Part Placement 2	Part Placement 3		
Carrier 1	15	15	16	Carrier 1	15	16	16		
Carrier 2	15	15	16	Carrier 2	15	16	16		
Carrier 3	15	15	16	Carrier 3	15	16	16		
Carrier 4	15	15	16	Carrier 4	15	16	16		
Carrier 5	15	15	16	Carrier 5	15	16	16		
NIEUW	Componenten:	46 /3, rest: 1			NIEUW	Componenten:	47 /3, rest: 2		
	Part Placement 1	Part Placement 2	Part Placement 3		Part Placement 1	Part Placement 2	Part Placement 3		
Carrier 1	16	15	15	Carrier 1	16	16	15		
Carrier 2	15	16	15	Carrier 2	15	16	16		
Carrier 3	15	15	16	Carrier 3	16	15	16		
Carrier 4	16	15	15	Carrier 4	16	16	15		
Carrier 5	15	16	15	Carrier 5	15	16	16		
etc.				etc.					

Ook aan deze interventie kleven nadelen. Er is een kleine hoeveelheid extra communicatie nodig (op welke tray moet welke robot een component extra plaatsen?), maar daarnaast belast je ook het Part-Supply station (dat vaak de bottleneck is) met extra werk om de totale arbeid in de Part Placement stations uit te balanceren. Zelfs wanneer Part Placement stations de bottlenecks zijn zitten de doorlooptijden van het drukste Part Placement station en het drukste Part Supply station zo dicht tegen elkaar aan dat een verschuiving van componenttoewijzingen meer kwaad dan goed doet.

Dit resulteert volgens onze analytische benadering in tijdsverlies in plaats van tijdswinst in veel van de gevallen (zie figuur 20). We kunnen dus concluderen dat interventie 3 in ieder geval een negatieve impact heeft als Part Placement stations de bottleneck zijn en in de meeste gevallen ook bij een bottleneck in de Part Supply stations. Er zijn echter een paar uitzonderingen, en omdat deze interventie vrij gemakkelijk ingezet kan worden is het handig om deze uitzonderingen in de gaten te houden. We zullen dus ook kijken naar de mogelijkheden om deze interventie te combineren met interventie 1 en met interventie 2.



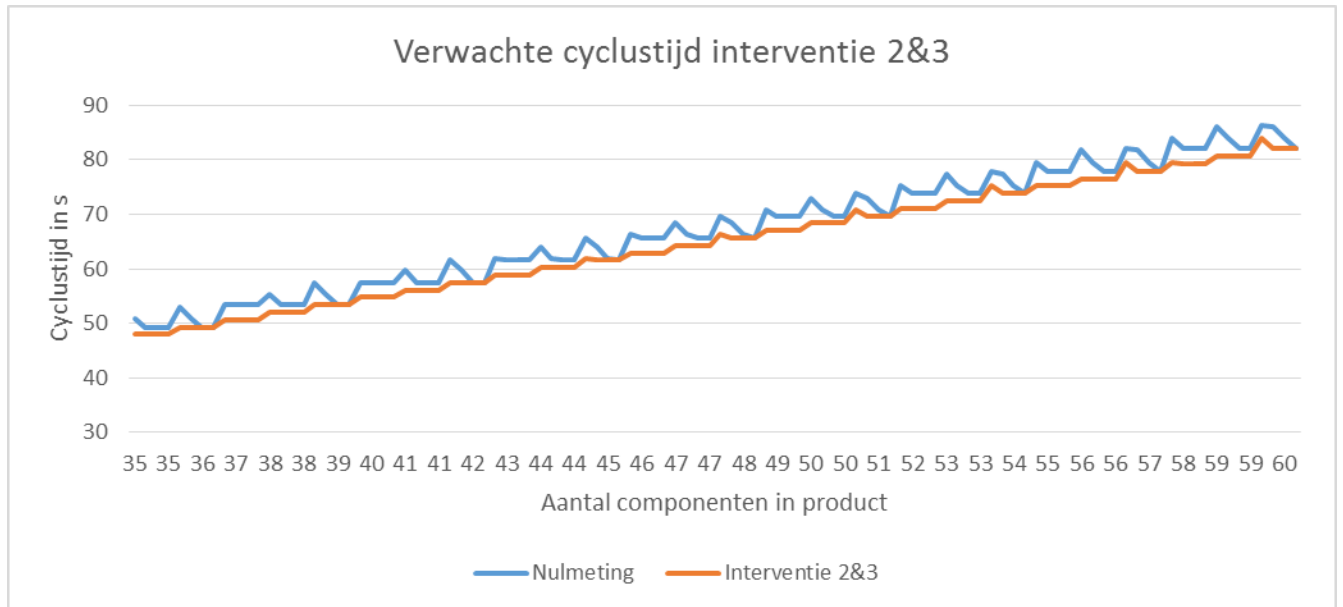
Figuur 20: Verwachte resultaat interventie 3 t.o.v. de nulmeting

5.2.4 – Interventies 2 en 3 gecombineerd

Interventie 2 heeft als doel meer balans te brengen tussen de Part Supply stations, maar heeft dus niet bij elke productsamenstelling toegevoegde waarde. Interventie 3 heeft als doel om de werkdruk van de Part Placement stations geheel uit te balanceren, maar dat gaat ten koste van de verhouding tussen de Part Supply stations, omdat één part supply station aan twee Part Placement stations moet leveren. Als we deze interventies gezamenlijk zouden doorvoeren dan zouden de negatieve gevolgen van interventie 3 gecompenseerd kunnen worden door de impact van interventie 2. Op zijn beurt zou interventie 2 de doorlooptijd van de lijn verder kunnen verminderen als interventie 3 ervoor heeft gezorgd dat de Part Supply stations geen bottleneck meer zijn. Deze combinatie van interventies zou kunnen resulteren in een synergie van ingrepen en de doorlooptijd kunnen verkorten.

Ten opzichte van de tweede interventie is er weinig extra informatieoverdracht nodig binnen het systeem, enkel welke carrier van welk Part Placement station een extra component krijgt (zie figuur 19 in paragraaf 5.4).

De stationsbezettingen in componentaantallen staan wederom genoemd in appendix 6. Als dit te realiseren is, wat het simulatiemodel kan uitwijzen, dan is de te behalen winst de winst zoals weergegeven in figuur 21.



Figuur 21: Verwachte resultaat van combinatie interventie 2&3 t.o.v. de nulmeting

5.2.5 – Interventies 1 en 3 gecombineerd

Interventie 3 had voorheen enkel toegevoegde waarde als de bottleneck van het systeem in de Part Placement stations ligt en er voldoende speling was bij de Part Placement stations, waar interventie 2 dus voor nodig was. Dat komt omdat wanneer de Part Placement station bezetting uitgebalanceerd moet worden, de bijbehorende Part Supply stations meer werk moesten verrichten.

Nu we vanuit de eerste interventie een Part Placement station tot onze beschikking hebben, kunnen we de lasten van deze machines verdelen en daarmee in veel gevallen de doorlooptijd verkorten zonder dat er een machine een langere doorlooptijd krijgt dan wat voorheen de bottleneck was. In figuur 22 staat een voorbeeld ter verduidelijking. In dit voorbeeld heeft het toepassen van interventie 3 een negatieve impact op de cyclustijd van het systeem, omdat Part Supply 1, die al een hoge doorlooptijd had, nog drukker is geworden door het geheel nivelleren van de Part Placement stationsbezettingen. Wanneer we echter interventie 1 zien we dat vervolgens het toepassen van interventie 3 wél een positieve impact heeft op de doorlooptijd van het systeem.

n=47		h=0					
		Nulmeting				Interventie 3	
		n	t			n	t
PS1	31	68.536		PS1	31.33	69.273	
PS2	17	37.584		PS2	15.67	34.637	
PP1	15	61.224		PP1	15.67	63.946	
PP2	16	65.656		PP2	15.67	64.296	
PP3	17	69.738		PP3	15.67	64.296	
		Interventie 1				Interventie 1&3	
		n	t			n	t
PS1	24	53.060		PS1	23.5	51.955	
PS2	23	50.850		PS2	23.5	51.955	
PP1	12	49.330		PP1	11.75	47.959	
PP2	12	49.330		PP2	11.75	48.309	
PP3	12	49.330		PP3	11.75	48.309	
PP4	11	45.248		PP4	11.75	48.309	

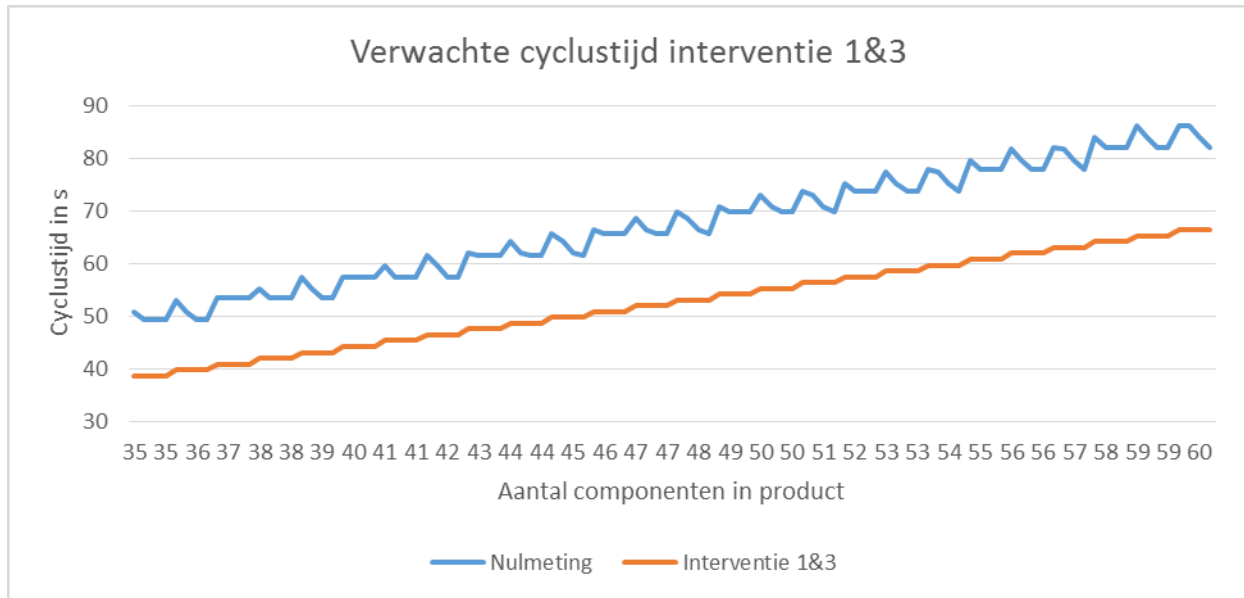
Figuur 22: De combinatie van interventies 1 en 3 zijn effectiever dan enkel interventie 1

Er zijn echter ook gevallen waarin dit niet goed gaat, dit zijn altijd gevallen waarbij één of meerdere producten met de hand worden aangeleverd, zoals weergegeven in figuur 23.

n=47		h=1					
		Nulmeting				Interventie 3	
		n	t			n	t
PS1	30	66.33		PS1	30.333	67.06	
PS2	16	35.37		PS2	15.667	34.64	
PP1	15	61.22		PP1	15.667	63.95	
PP2	16	65.66		PP2	15.667	64.3	
PP3	16	65.66		PP3	15.667	64.3	
		Interventie 1				Interventie 1&3	
		n	t			n	t
PS1	23	50.85		PS1	22.5	49.74	
PS2	23	50.85		PS2	23.5	51.95	
PP1	12	48.98		PP1	11.75	47.96	
PP2	12	48.98		PP2	11.75	47.96	
PP3	12	48.98		PP3	11.75	47.96	
PP4	11	44.9		PP4	11.75	47.96	

Figuur 23: Interventie 1 is beter dan de combinatie van interventie 1 en 3

Hieronder staat in figuur 24 weergegeven wat de verwachte resultaten zijn van het altijd doorvoeren van de combinatie van interventie 1 & 3.



Figuur 24: Verwachte resultaat interventies 1&3 gecombineerd, t.o.v. de nulmeting

5.3 – Conclusie van Interventies

We zullen in deze paragraaf de genoemde (combinatie van) interventies bespreken. Daarbij zullen we een volgorde hanteren op basis van de verwachte benodigde investering. In Appendix 7 staat een overzicht van de verwachte impact van elke interventie en staat aangegeven welke keuzes beter zijn dan andere keuzes.

Allereerst zullen we kijken naar enkel interventie 3, omdat deze interventie de minste kosten met zich meebrengt om in te voeren. Er hoeft enkel extra informatie overgedragen te worden waarvoor de middelen er reeds zijn.

Als we deze interventie invoeren op de momenten waarop we een positieve impact verwachten dan is de winst op cyclustijd, gegeven het aantal met de hand verenkeld componenten (H), als volgt:

Tabel 6: Verwachte cyclustijd-reductie bij interventie 3 t.o.v. de nulmeting

H	0	1	2	3
Interventie 3 winst	0.00%	0.34%	1.53%	2.00%

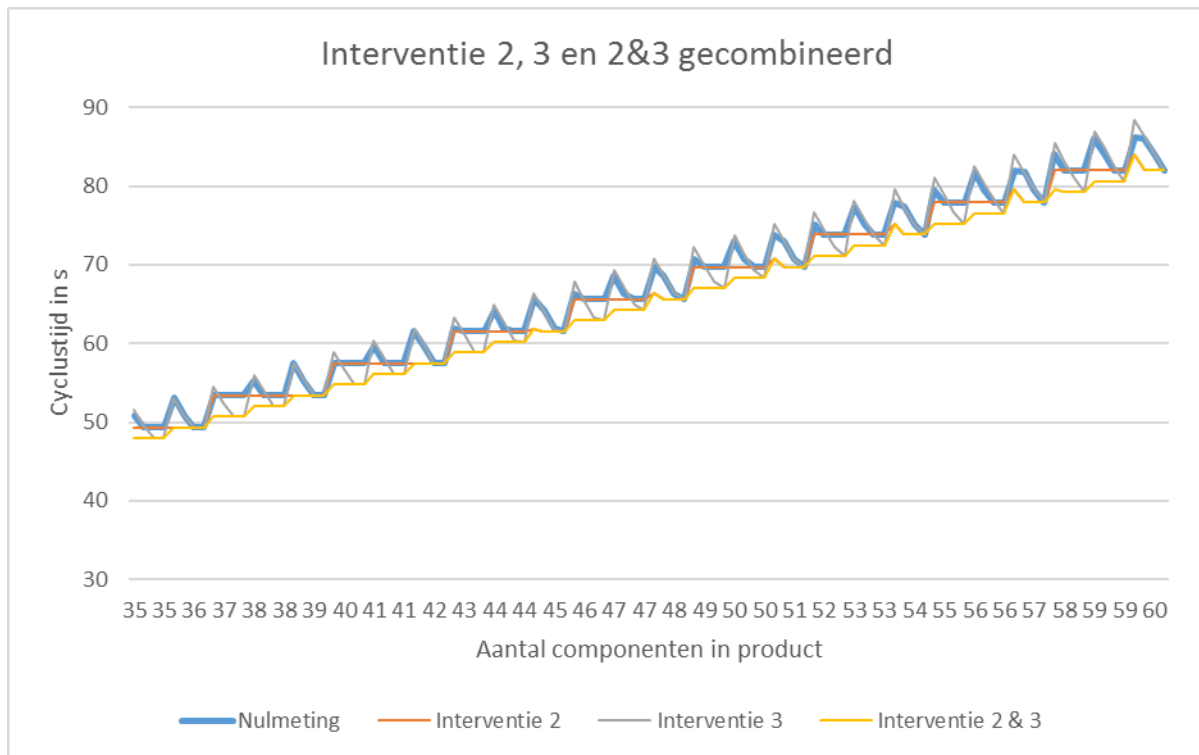
Wanneer er meerdere componenten met de hand worden verenkeld loont het al snel om interventie 3 toe te passen. Gegeven het feit dat er in de producten waar we de samenstelling van

kennen maar een klein aantal SKU's met de hand verenkeld moeten worden, verwachten we dat deze impact niet groot zijn.

We zien verder in figuur 25 dat het inderdaad klopt dat in bijna alle gevallen de combinatie van interventie 2 en 3 beter lijkt te gaan werken dan enkel interventie 2. Daarnaast merken we dat dat deze interventies beter presteren met weinig producten die met de hand verenkeld worden. Dat komt omdat het verenkelen met de hand een soortgelijke impact heeft als interventie 2, namelijk dat de Part Placement stations die bij Part Supply 1 horen worden aangevuld zonder dat Part Supply 1 daar iets voor hoeft te doen. In de tabel hieronder, tabel 7, staan de tijdwinsten voor de interventies. Hiervan komt een deel van de datapunten overeen met de datapunten voor de winst van enkel interventie 3. Hoe interventie 2, 3 en de combinatie van interventie 2 en 3 zich tot elkaar en de nulmeting verhouden, staat grafisch weergegeven in figuur 25.

Tabel 7: Verwachte cyclustijdreductie bij interventie 2 en interventie 2+3 t.o.v. de nulmeting

H	0	1	2	3
Interventie 2 winst	3.48%	1.77%	0.36%	0.00%
Interventie 2+3 winst	5.42%	3.76%	2.36%	2.00%



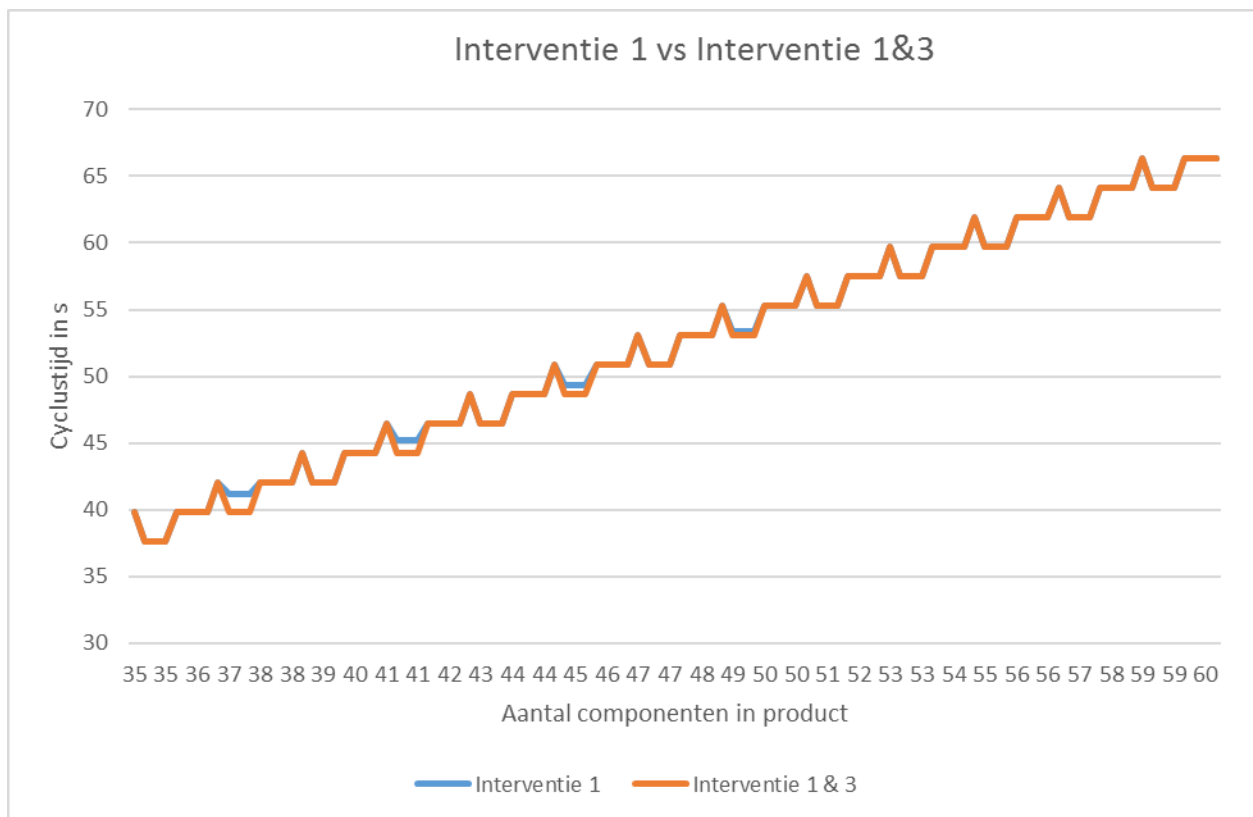
Figuur 25: Interventie 2, 3 en de combinatie van interventie 2&3 t.o.v. de nulmeting

Als laatste hebben we de – naar verwachting – duurste interventie: het plaatsen van een extra part placer, waarvan de verwachte cyclustijdreductie staat weergegeven in tabel 8.

Tabel 8: Verwachte cyclustijdreductie bij interventie 1 en interventie 1+3 t.o.v. de nulmeting

H	0	1	2	3
Interventie 1 winst	23.04%	22.86%	21.73%	21.45%
Interventie 1+3 winst	23.87%	22.24%	21.10%	20.81%

De verschillen tussen de interventies zijn niet groot. Het loont bij een extra Part Placement station in hele beperkte situaties om interventie 3 ook toe te passen: enkel bij een componentaantal van $4i+1$ met $N \leq 53$ en $H > 0$. Daarbij wordt het positieve effect van de toevoeging van interventie 3 ook kleiner naarmate N groter wordt (Zie figuur 26). Dat zijn namelijk de enige momenten waarop de uitbalancering niet ten koste gaat van Part Supply tijden.



Figuur 26: Verwachte cyclustijd van interventie 1+3 t.o.v. interventie 1

Op basis van de verwachte nieuwe stationsbezettingen bij invoering van interventies (zie Appendix 6) kunnen we de verwachte impact van alle interventies berekenen per productsamenstelling. Het totale overzicht staat in Appendix 7.

In de tabel hieronder staat een kleine greep uit de voorkeuren voor de interventies, gegeven of er wel of geen extra investering gedaan wordt. We kijken hierbij naar producten van 42 tot en met 46 componenten (N). Per product maken we onderscheid in hoeveel van de componenten met de

hand verenkeld worden (*H*). De producten die we in het simulatiemodel gebruiken zijn oranje gemarkeerd.

Onder *Niets Extra* vinden we in de eerste kolom groen gearceerd als er naast interventie 1 geen interventie is die de cyclustijd verkort. In de tweede tabel staat groen gearceerd als het invoeren van enkel interventie 3 de cyclustijd verkort.

Onder *Extra loopband* vinden we in de eerste kolom waarden groen gearceerd als interventie 2 een verbetering oplevert ten opzichte van geen extra investering, en de rechter kolom is groen gearceerd als interventie 3 toevoegen beter werkt dan enkel interventie 2.

Onder de header *Extra Part Placer* staan interventies 1 en interventie 1 & 3. Deze zijn altijd beter dan geen extra investering, dus is enkel aangegeven wanneer ook interventie 3 toegevoegd moet worden.

			Niets Extra		Extra loopband?		Extra PartPlacer	
N	H	0	$0 \leq 2, 0 \leq 3, 0 \leq 2 \& 3$	$3 < 0$	$2 < 0$	$2 \& 3 < 2, 2 \& 3 < 3$	$1 \leq 1 \& 3$	$1 \& 3 < 1$
42	0	61.57	61.57	61.9	57.49	57.49	46.43	46.43
42	1	59.69	59.69	59.69	57.49	57.49	46.43	46.43
42	2	57.49	57.49	57.49	57.49	57.49	46.43	46.43
42	3	57.49	57.49	57.49	57.49	57.49	46.43	46.43
43	0	61.9	61.9	63.38	61.57	58.85	48.64	48.64
43	1	61.57	61.57	61.17	61.57	58.85	46.43	46.43
43	2	61.57	61.57	58.96	61.57	58.85	46.43	46.43
43	3	61.57	61.57	58.85	61.57	58.85	46.43	46.43
44	0	64.11	64.11	64.85	61.57	60.21	48.64	48.64
44	1	61.9	61.9	62.64	61.57	60.21	48.64	48.64
44	2	61.57	61.57	60.43	61.57	60.21	48.64	48.64
44	3	61.57	61.57	60.21	61.57	60.21	48.64	48.64
45	0	65.66	65.66	66.33	61.9	61.9	50.85	50.85
45	1	64.11	64.11	64.11	61.57	61.57	49.33	48.64
45	2	61.9	61.9	61.9	61.57	61.57	49.33	48.64
45	3	61.57	61.57	61.57	61.57	61.57	49.33	48.64
46	0	66.33	66.33	67.8	65.66	62.94	50.85	50.85
46	1	65.66	65.66	65.59	65.66	62.94	50.85	50.85
46	2	65.66	65.66	63.38	65.66	62.94	50.85	50.85
46	3	65.66	65.66	62.94	65.66	62.94	50.85	50.85

6 – Resultaten experimenten

In dit hoofdstuk komen de resultaten aan bod. We beginnen in paragraaf 6.1 met de experimenten die moeten uitwijzen in welke mate de buffers, zoals besproken in paragraaf 3.4, benodigd zijn. In 6.2 bespreken we de experimenten waarmee we controleren of de verwachte impact van de interventies overeenkomt met de uitkomsten van de simulatie.

6.1. – Experimenten Buffers

Het effect van de buffers inventariseren door in het simulatiemodel enkele variabelen uit te zetten, waardoor de bufferposities overgeslagen of niet gebruikt worden. Vervolgens produceren we de gebruikelijke hoeveelheid producten *GP1* en *GP2* en kijken we of de nieuwe systeemafstelling een merkbare negatieve impact heeft op de doorlooptijden. Als dit inderdaad zo is dan kunnen we hieruit concluderen dat de bufferposities vereist zijn om de cyclustijd zo laag mogelijk te houden. Omdat er bij productie van *GP1* en *GP2* verschillende bottlenecks zijn verwachten we dat het experimenteren met deze twee producten genoeg moet zijn om effecten te kunnen meten. De buffers die aan bod zullen komen zijn de traybuffer in het Part Placement station (paragraaf 6.1.1). Ook testen we de carrier buffers in het Part Placement station (paragraaf 6.1.2) en we bespreken de buffer trilbak in het Part Supply station (paragraaf 6.1.3). De experimentopzet van de bufferplekken in het part placement station staan in tabel 9.

Tabel 9: Experimentopzet Bufferplekken Part Placement

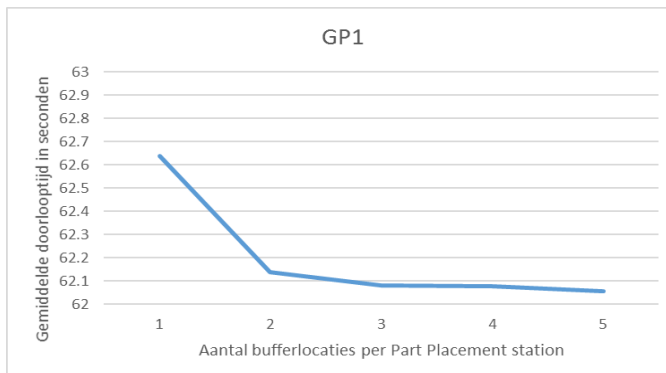
Product	BufferPlekTraysPartPlacement	CarrierBufferPartPlacement	BufferPlaatsenPerStation
GP1	FALSE	TRUE	0
GP2	FALSE	TRUE	0
GP1	TRUE	TRUE	6
GP2	TRUE	TRUE	6
GP1	TRUE	TRUE	5
GP2	TRUE	TRUE	5
GP1	TRUE	TRUE	4
GP2	TRUE	TRUE	4
GP1	TRUE	TRUE	3
GP2	TRUE	TRUE	3
GP1	TRUE	TRUE	2
GP2	TRUE	TRUE	2
GP1	TRUE	TRUE	1
GP2	TRUE	TRUE	1
GP1	TRUE	FALSE	6
GP2	TRUE	FALSE	6

6.1.1 – Traybuffer in Part Placement

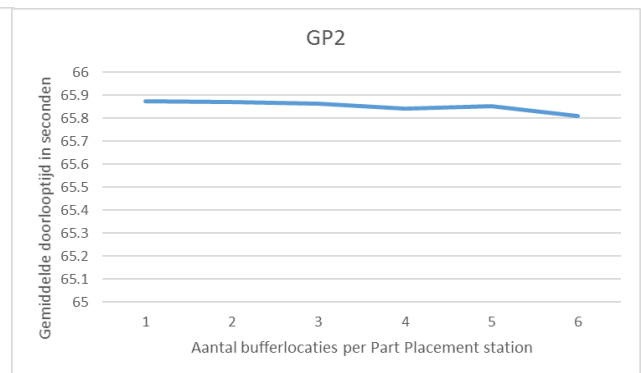
Het eerste probleem dat we tegenkomen bij het uitzetten van de bufferposities is dat het kwijtraken van componenten bij mispicks een zeer negatieve invloed heeft op de procesflow. Omdat aan het begin van de simulatieruns de componentvoorraden erg dicht tegen elkaar aan liggen (want er zijn nog niet genoeg mispicks uit willekeurige trays geweest) wil het in sommige gevallen zo zijn dat door mispicks de volgorde van benodigdheden van componenten op zo'n manier verandert dat het systeem vastloopt. De posities in het Part Supply station liggen dan vol en kunnen hun trays niet afstaan, omdat de componenten in het Part Placement station nog niet op zijn.

Wanneer we de componentverliezen bij mispicks uit het systeem zouden halen kunnen we geen juiste vergelijking maken met de andere systemen. Ook is deze aanname juist gedaan op basis van de expertise van Machinebouwer. We concluderen dus dat de bufferposities op de voorraadplaatsen van de trays benodigd zijn.

Vervolgens hebben we geëxperimenteerd met het aantal bufferposities, gezien het overbodig zou lijken om elke tray één bufferpositie te geven om een kleine verstoring in de vereiste volgorde van de Part Supply stations op te vangen. De resultaten hiervan staan voor GP1 en GP2 respectievelijk in figuur 27 en figuur 28. Daarbij merken we dat er een verschil zit tussen de producten die Part Supply en Part Placement bottlenecks hebben. In totaal twee bufferposities per Part Placement station lijkt voldoende om de verandering in benodigde productievolvergorden op te vangen.



Figuur 27: Effect van buffers op doorlooptijd GP1



Figuur 28: Effect van Buffers op doorlooptijd GP2

6.1.2 – Carrier Buffers in het Part Placement station

Ook is er een duidelijke achteruitgang te zien in de cyclustijd van het systeem wanneer we carrier buffers uit het systeem halen. De doorlooptijden van de Part Placement stations worden nu namelijk gelijk aan de doorlooptijd van het traagste Part Placement station. Wanneer de standaard doorlooptijden van de Part Placement stations dicht tegen elkaar aan liggen zal een mispick bij één van deze stations dus de doorlooptijden in andere stations ook negatief

beïnvloeden. In tabel 10 zien we dan ook een groter negatief effect bij product *GPI*, een product waarvan de componenten gelijk verdeeld kunnen worden over alle Part Placement stations.

Tabel 10: Simulatieresultaten: Geen carrier buffer tussen Part Placement stations

Zonder Carrier Buffer tussen Part Placements		
	GP1	GP2
N	45	46
Cyclustijden		
Gem. cyclustijd	64.735	67.093
Deel binnen 70s	0.872	0.751
Cyclustijd t.o.v. nulmeting	+2.743	+1.241
% verbetering	-4.4%	-1.9%
Bezettingsgraad		
PartSupply1	0.810	0.809
PartSupply2	0.434	0.447
PartPlacer1	0.945	0.912
PartPlacer2	0.946	0.911
PartPlacer3	0.945	0.973
WIP		
Max Trays in systeem	57	62

6.1.3 – Trilbak buffers

In paragraaf 3.4.1 kwam de trilbak in het Part Supply station naar voren als eerste benodigde buffer. We hebben niet geëxperimenteerd met een extra trilbak minder. In tegenstelling tot de eerdere buffers is het eenvoudig om in te zien dat deze buffer sowieso benodigd is. Zonder deze buffer komen namelijk sowieso de vul- en leegtijd van de trilbak bij de doorlooptijd in het Part Supply station op. We hebben hier geen exacte getallen van, maar dit zou dus een negatieve impact hebben op de cyclustijd. Bij productie van een product van 50 componenten zou zonder een extra trilbak deze tijd 2 bovenop de normale doorlooptijd van deze stations komen.

6.2 – Experimenten interventies

In dit onderdeel gaan we toetsen hoe de interventies presteren in het simulatiemodel. In paragraaf 6.2.1 Bespreken we interventie 1. Om interventie 1 (het toevoegen van een extra part placer) te testen, moesten we het model zodanig aanpassen dat we de interventie niet eenvoudig modulair konden maken, daarom is in een apart model deze interventie toegevoegd en is deze interventie los getoetst van de rest van de interventies.

De experimentopzet van deze interventies staat weergegeven in tabel 11. Omdat we bij alle experimenten uitgaan van dezelfde parameters voor tijden en mispicks zullen we deze in het vervolg achterwege laten.

Tabel 11: Experimentopzet interventie 1

Product	Placer P&P	Placer p(mis)	Supply P&P	Supply p(mis)	Tritijd (s)
GP1	4	0.02	1.8333	0.25	1
GP2	4	0.02	1.8333	0.25	1
KleinPP	4	0.02	1.8333	0.25	1
KleinPS	4	0.02	1.8333	0.25	1
GrootPP	4	0.02	1.8333	0.25	1
GrootPS	4	0.02	1.8333	0.25	1

In paragraaf 6.2.2 komt interventie 2 aan bod en in paragraaf 6.2.3 interventie 3. De combinatie van interventie 2 & 3 zullen evalueren in paragraaf 6.2.4. De experimentopzet van deze simulatie staat in tabel 12.

Tabel 12 - Experimentopzet interventie 2, 3 en 2&3

Product	Interventie2_Actief	Interventie3_Actief	Interventie_3	Dus Interventies:
GP1	FALSE	FALSE	FALSE	0
GP1	TRUE	FALSE	FALSE	2
GP1	TRUE	TRUE	FALSE	2&3
GP2	FALSE	FALSE	FALSE	0
GP2	TRUE	FALSE	FALSE	2
GP2	TRUE	TRUE	FALSE	2&3
KleinPP	FALSE	FALSE	FALSE	0
KleinPP	TRUE	FALSE	FALSE	2
KleinPP_int3*	FALSE	TRUE	FALSE	3
KleinPP_int23*	TRUE	TRUE	FALSE	2&3
KleinPS	FALSE	FALSE	FALSE	0
KleinPS	TRUE	FALSE	FALSE	2
KleinPS_int3*	FALSE	TRUE	FALSE	3
KleinPS_int23*	TRUE	TRUE	FALSE	2&3
GrootPP	FALSE	FALSE	FALSE	0
GrootPP	TRUE	FALSE	FALSE	2
GrootPP	TRUE	TRUE	FALSE	2&3
GrootPS	FALSE	FALSE	FALSE	0
GrootPS	TRUE	FALSE	FALSE	2
GrootPS_int3*	FALSE	TRUE	FALSE	3
GrootPS_int23*	TRUE	TRUE	FALSE	2&3

*Sommige producten moesten bij interventies afwijkend worden ingedeeld, omdat de interventie zorgde voor een verschuiving van de optimale machineplanning. Daarom zien we enkele producten met een aangepaste naam (en dus ook aangepaste machineplanning).

Bij de resultaten van de experimenten zullen we bij de gemeten cyclustijden en trays in stations steeds refereren aan de nulmeting, die voor het gemak nogmaals staat weergegeven in tabel 13.

Tabel 13: Nulmeting simulatie

Nulmeting	GP1	GP2	KleinPP	KleinPS	GrootPP	GrootPS
Cyclustijden						
Gem. cyclustijd	61.992	65.852	53.508	50.867	74.026	75.189
Theoretisch gemiddeld	61.905	65.656	53.411	50.850	73.819	75.169
Afwijking t.o.v. theorie	-0.087	-0.196	-0.096	-0.017	-0.207	-0.020
Deel binnen 70s	0.969	0.815	0.992	0.971	0.247	0.088
Bezettingsgraad						
PartSupply1	0.845	0.825	0.840	0.846	0.834	0.846
PartSupply2	0.453	0.455	0.420	0.442	0.456	0.448
PartPlacer1	0.987	0.929	0.915	0.882	0.937	0.922
PartPlacer2	0.987	0.929	0.991	0.962	0.936	0.976
PartPlacer3	0.987	0.991	0.915	0.962	0.992	0.976
WiP						
Max Trays in systeem	57	62	54	39	72	62

6.1.2.1 – Resultaten Interventie 1: Extra Part Placement station

Tabel 14: Simulatieresultaten bij interventie 1

Interventie 1	GP1	GP2	KleinPP	KleinPS	GrootPP	GrootPS
Cyclustijden						
Gem. cyclustijd	49.559	50.855	41.257	39.804	55.307	57.629
Theoretisch gemiddeld	49.330	50.850	40.816	39.795	55.271	57.482
Afwijking t.o.v. theorie	-0.229	-0.005	-0.441	-0.008	-0.035	-0.147
Deel binnen 70s	0.991	0.935	0.998	0.968	0.934	0.961
Cyclustijd t.o.v. nulmeting	12.433	14.997	12.250	11.063	17.671	17.560
% verbetering	20.1%	22.8%	22.9%	21.7%	24.2%	23.4%
Bezettingsgraad						
PartSupply1	0.793	0.810	0.817	0.846	0.846	0.845
PartSupply2	0.831	0.846	0.817	0.800	0.846	0.844
PartPlacer1	0.988	0.963	0.988	0.922	0.959	0.991
PartPlacer2	0.905	0.883	0.890	0.922	0.959	0.920
PartPlacer3	0.905	0.962	0.889	0.922	0.959	0.920
PartPlacer4	0.905	0.883	0.890	0.820	0.885	0.920
WiP						
Max Trays in systeem	47 (-10)	57 (-5)	59 (+5)	52 (+13)	53 (-13)	62 (=)

In lijn met de verwachtingen liggen de bezettingsgraden van Part Supply 1 en Part Supply 2 erg dicht tegen elkaar aan. De cyclustijden liggen in de meeste gevallen ook dicht tegen de verwachte cyclustijden aan. We merken echter wel dat de afwijking ten opzichte van de theorie in sommige gevallen hoog uitvalt. Ondanks dat blijven de verbeteringen ten opzichte van de nulmeting aanzienlijk.

6.1.2.2 – Resultaten Interventie 2: Van Part Supply 2 Naar Part Placement 1&2

De resultaten van interventie 2 staan in tabel 15. We zien niet bij alle producten verbeteringen, maar daar waar verbeteringen zijn, zijn ze duidelijk aanwezig. Ook zien we dat duidelijk dat er meer trays in het systeem zitten, wat logisch is omdat er door het nieuwe systeem meer plaatsen beschikbaar zijn in het systeem.

Tabel 15: Simulatieresultaten interventie 2

Interventie 2	GP1	GP2	KleinPP	KleinPS	GrootPP	GrootPS
Cyclustijden						
Gem. cyclustijd	61.992	65.854	53.519	49.636	70.176	74.172
Theoretisch gemiddeld	61.574	65.656	53.411	49.330	69.738	73.819
Afwijking t.o.v. theorie	-0.417	-0.198	-0.108	-0.306	-0.439	-0.353
Deel binnen 70s	0.970	0.818	0.996	0.997	0.565	0.088
Cyclustijd t.o.v. nulmeting	0.001	-0.002	-0.011	1.231	2.801	1.016
% verbetering	0.0%	0.0%	0.0%	2.4%	3.8%	1.4%
Bezettingsgraad						
PartSupply1	0.785	0.768	0.770	0.792	0.827	0.808
PartSupply2	0.514	0.512	0.490	0.528	0.507	0.505
PartPlacer1	0.987	0.929	0.915	0.904	0.988	0.935
PartPlacer2	0.987	0.929	0.990	0.986	0.988	0.989
PartPlacer3	0.987	0.991	0.915	0.986	0.988	0.990
WiP						
Max Trays in systeem	59 (+2)	64 (+2)	56 (+2)	47 (+8)	74 (+8)	70 (+8)

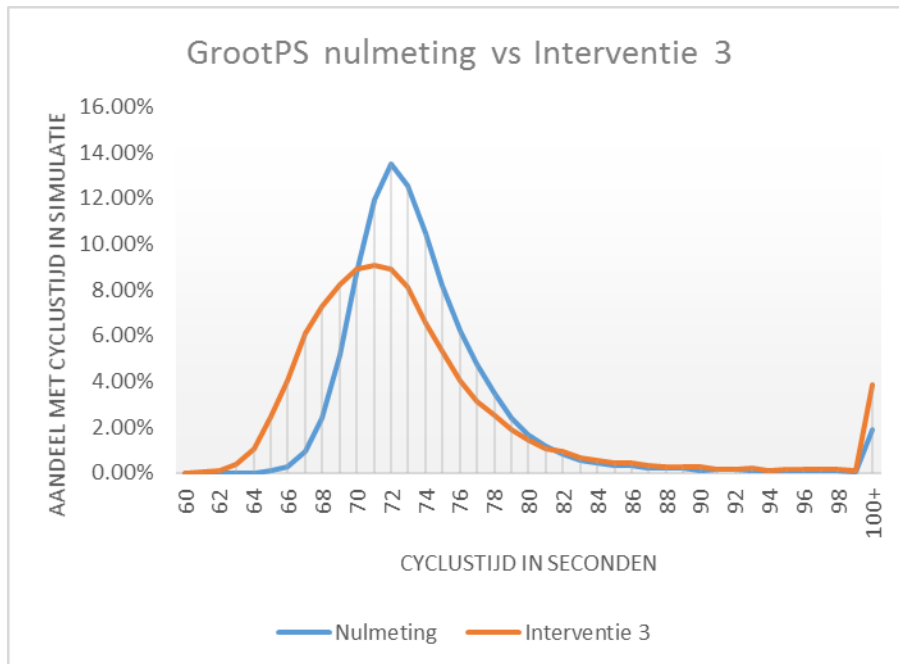
6.1.2.3 – Resultaten Interventie 3: Nivelleren van Part Placement bezetting

Omdat deze interventie alleen relevant is voor situaties waarin er in Part Placement 1 en Part Placement 2 een ongelijk aantal componenten moet worden toevoegen aan de carrier, zijn er maar drie van de testproducten samengesteld in het simulatiemodel.

Tabel 16: Simulatieresultaten interventie 3

Interventie 3	KleinPP	KleinPS	GrootPS
Cyclustijden			
Gem. cyclustijd	53.090	50.863	75.178
Theoretisch gemiddeld	53.060	50.850	75.169
Afwijking t.o.v. theorie	-0.029	-0.013	-0.009
Deel binnen 70s	0.998	0.968	
Cyclustijd t.o.v. nulmeting	0.418	0.004	0.011
% verbetering	0.8%	0.0%	0.0%
Bezettingsgraad			
PartSupply1	0.846	0.846	0.846
PartSupply2	0.423	0.442	0.449
PartPlacer1	0.961	0.922	0.950
PartPlacer2	0.960	0.922	0.949
PartPlacer3	0.922	0.962	0.977
WIP			
Max Trays in systeem	46 (-8)	40 (+1)	60 (-2)

Zoals verwacht zijn de bezettingsgraden van Part Placer 1 en Part Placer 2 nagenoeg gelijk. De verbetering is niet groot in dit systeem, maar er hoeft dan ook niets extra's gebouwd te worden, en is dus vooral mooi meegenomen. Voor de gevallen die geen duidelijk kortere meerwaarde hebben, is er gekeken naar de verdeling van de outputtijden. In figuur 29 zien we dat de verdeling van de outputtijden van interventie 3 meer uitgestrekt is dan die van de nulmeting. Ook zijn er meer uitschieters naar boven. De voorkeur zal wanneer er gemiddeld geen verschil verwacht wordt, liggen bij het niet doorvoeren van interventie 3.



Figuur 29: Cyclustijden “GrootPS” in simulatie (gemiddeld geen verschil)

6.1.2.4 – Resultaten Interventie 2 & 3

Tabel 17: Simulatieoutput van interventie 2 & 3 gecombineerd

Interventie 2&3	GP1	GP2	KleinPP	KleinPS	GrootPP	GrootPS
Cyclustijden						
Gem. cyclustijd	61.813	63.331	51.066	48.351	70.176	72.914
Theoretisch gemiddeld	61.574	62.935	50.690	47.969	69.738	72.459
Afwijking t.o.v. theorie	-0.239	-0.396	-0.376	-0.382	-0.439	-0.455
Deel binnen 70s	0.970	0.940	0.996	0.998	0.565	0.252
Cyclustijd t.o.v. nulmeting	0.001	2.521	2.442	2.515	2.801	2.275
% verbetering	0.0%	3.8%	4.6%	4.9%	3.8%	3.0%
Bezettingsgraad						
PartSupply1	0.785	0.798	0.771	0.776	0.827	0.796
PartSupply2	0.514	0.532	0.550	0.579	0.507	0.539
PartPlacer1	0.987	0.987	0.985	0.984	0.988	0.988
PartPlacer2	0.987	0.987	0.984	0.984	0.988	0.988
PartPlacer3	0.987	0.987	0.985	0.984	0.988	0.988
WiP						
Max Trays in systeem	58 (+1)	67 (+5)	59 (+5)	50 (+11)	74 (+8)	73 (+11)

We zien dat de bezettingsgraden in de Part Placement stations in alle gevallen bijna gelijk zijn, niet alleen binnen een product groep maar ook in het algemeen. Omdat deze stations per product altijd hetzelfde aantal componenten moeten toevoegen en aan de bezettingsgraden te zien duidelijk de bottleneck zijn, is er niet één bottleneck, maar zijn het er drie. Na optische inspectie van het simulatiemodel lijkt de éne bufferplek tussen opeenvolgende Part Placement stations lijken niet genoeg om de variantie van de stations op te vangen. Het effect is niet zo heftig als we in paragraaf 6.1.1 zagen. Naar verwachting valt de afwijking ten opzichte van de theorie op te lossen met een extra bufferpositie bij de stations, maar dit is niet getest.

Ondanks dit is er wel een noemenswaardige verbetering ten opzichte van de nulmeting met deze interventie.

7 – Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zullen we bespreken welke conclusies we kunnen doen op basis van informatie die we hebben gekregen gedurende het onderzoek. In paragraaf 7.1 zullen we eerst concluderen welke systeemsamenstelling minimaal benodigd is om de gemiddelde cyclustijd van 70 seconden voor de gebruikelijke producten te behalen. Daarna zullen we in paragraaf 7.2 conclusies trekken op basis van onze bevinden vanuit de simulatie experimenten en in paragraaf 7.3 zullen we deze bevindingen kort ter discussie stellen. In paragraaf 7.4 zullen we vervolgens aanbevelingen doen op basis van onze bevindingen.

7.1 – De minimaal benodigde systeemsamenstelling

Op basis van de inputvariabelen zijn ten minste 2 Part Supply stations en 3 Part Placement stations nodig om gemiddeld de door Producent gestelde cyclustijd van 70 seconden voor GP1 en GP2 te behalen.

Daarnaast zijn er per Part Supply station 2 trilbakken benodigd. Het Part Placement station haalt zonder carrier-buffers ook gemiddeld de 70 seconden cyclustijd takt, aangezien Machinebouwer heeft gezegd dat zo'n bufferplek weinig kost en een merkbaar positief resultaat op de doorlooptijd heeft (zie paragraaf 6.1.2), zijn deze bufferposities voor carriers een eenvoudige cyclustijdreductie.

Ervan uitgaande dat deze bufferpositie is toegevoegd dan zal er ook minimaal 1 bufferpositie per Part Placement station moeten zijn om ervoor te zorgen dat de variabiliteit geen belemmering vormt voor het functioneren van het systeem. Vanaf 2 bufferposities zal ook de impact op de doorlooptijd minimaal zijn.

7.2 – Conclusie simulatie

De voornaamste conclusie die we uit de simulatie kunnen trekken is dat met de huidige parameters de afwijkingen en mispicks een dusdanige impact op het systeem hebben dat de verwachte cyclustijd niet gelijk is aan de verwachte minimale doorlooptijd van het drukste station. Ofwel, er zit bij sommige productsamenstellingen een noemenswaardig verschil tussen de analytische benadering en de gemeten gemiddelde cyclustijd in de simulatie.

Verder moet er veel communicatie plaatsvinden tussen de stations als de inputparameters en aannames een correcte afspiegeling van de werkelijkheid zijn, anders zal het systeem kunnen vastlopen doordat een verkeerde aanvoervolgorde van trays gehanteerd wordt. Ook blijkt uit de gevoeligheidsanalyse dat de werkelijke verwerkingstijden gemeten worden omdat er al snel een verandering in systeeminvulling benodigd is om het systeem optimaal te laten presteren.

Gegeven de inputparameters is de verwachte doorlooptijd in ieder geval goed analytisch te benaderen. De overduidelijk beste interventie is daarbij interventie 1, het toevoegen van een

extra Part Placement station. In alle gevallen heeft dit een positief effect op de cyclustijd van het systeem, vaak tussen de 20% en 25%, daarbij verwachten we ook dat de toevoeging van het systeem zeker niet tegen de 20% van de kosten van het hele systeem zal lopen. Verder houdt interventie 1 het systeem relatief eenvoudig en maakt het systeem misschien nog wel eenvoudiger. Zo ben je voor je systeeminvulling niet meer afhankelijk van de verhouding tussen de Part Supply en Part Placement doorlooptijden, zoals bij de nulmeting wel nodig is voor de systeeminvulling.

Daarnaast is interventie 3 vaak kosteloos toe te voegen aan het systeem, en zal, wanneer hiervan een positieve impact wordt verwacht, zeker toegevoegd moeten worden. Wanneer er geen gemiddelde tijdsinstroom te halen is dan moet deze interventie niet gebruikt worden, want zoals we in figuur 27 zagen levert dit wel een spreiding in de cyclustijden op.

7.3 – Discussie Interventies

Het is lastig om op basis van de simulatieoutput aanbevelingen te doen, omdat de uitkomsten niet hetzelfde zijn voor alle productsamenstellingen. Waar een interventie op het ene product een erg positieve impact heeft, draagt het bij een ander product niets bij aan de vermindering van de cyclustijd, of de interventie verslechtert de cyclustijd zelfs. Verder hebben we geen idee welke productsamenstellingen er allemaal zijn en hoeveel procent van de tijd welke producten worden gemaakt. Stel dat we dit wel zouden weten, dan zouden we per interventie een gewogen gemiddelde kunnen nemen om tot een gemiddelde impact te komen per interventie.

Ook beschikken we niet over de kennis om een kosten-baten analyse te maken voor wanneer deze interventies doorgevoerd zouden moeten worden. Hierbij zou een afweging gemaakt kunnen worden tussen de vaste en variabele productie kosten. Ook moet er rekening gehouden worden met de verwachte toekomstige vraag naar producten.

7.4 – Aanbevelingen

Om de cyclustijd bij realisatie van het systeem te verkorten doen we de volgende aanbevelingen:

- Het meten van de daadwerkelijke doorlooptijden en mispicks van stations en de systeeminvulling op basis van deze nieuwe gegevens aanpassen (indien nodig). Hierbij moet ook rekening gehouden met het gedrag van de mispicks: wordt een component echt onbruikbaar bij een mispick in het Part Placement station?
- Inventariseren of een reductie van 20% van de cyclustijd de investering van een extra Part Placement station waard is. Zo ja, overstappen naar vier Part Placement stations.
- Indien mogelijk, is het handig om in sommige gevallen interventie 3 toe te passen. Als de cyclustijd van het systeem direct verkort kan worden door een component zogenaamd “uit te smeren” over meerdere stations (dus de ene carrier wordt

component A in station 1 toegevoegd, bij de andere carrier wordt component A in station 2 toegevoegd).

- Creëer genoeg bufferposities voor trays bij het Part Placement station. Niet alleen is dit belangrijk om de doorlooptijd te verkorten, maar het is met de huidige systeemp parameters essentieel, anders loopt het systeem namelijk vast.

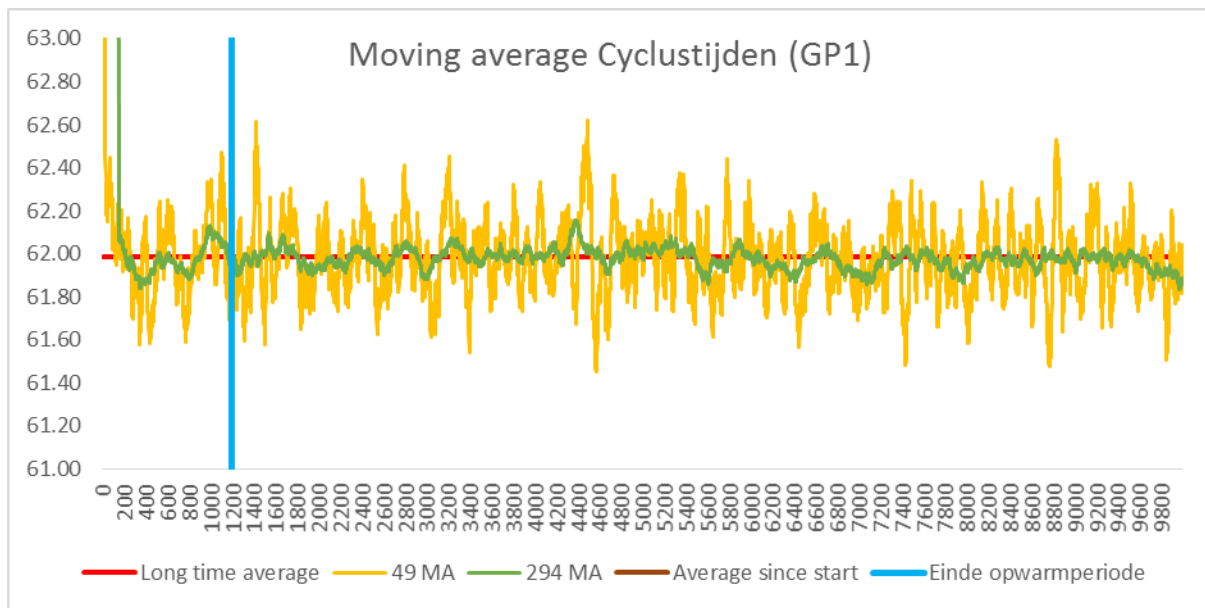
8 – Referenties

- Birta, L. G. (2013). *Modelling and Simulation*. London: Springer.
- Franceschini, F. G. (2007). *Management by measurement : designing key indicators and performance measurement systems*. Berlin: Springer Verlag.
- Heerkens, H. (2012). *Geen Probleem - een aanpak voor alle bedrijfskundige vragen en mysteries*. Nieuwegein: Van Winden Communicatie.
- Hillston, J. (2003). *Model Validation and Verification - Teaching Notes*. Opgehaald van University Of Edinburgh: <http://www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/ms/notes/note14.pdf>
- Law, A. (2014). *Simulation modeling and analysis*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Mes, M. (2017). *Simulation Modelling using Practical Examples*:. Opgehaald van University Of Twente:
<https://www.utwente.nl/en/bms/iebis/staff/mes/plantsimulation/tutorialplantsimulation13v20170726.pdf>
- Pinedo, M. (2005). *Planning and scheduling in manufacturing and services*. New York, NY: Springer.
- Robinson, S. (2014). *Simulation : the practice of model development and use*. . Hampshire, UK: Palgrave MacMillan.
- Schmidt, J. &. (1970). *Simulation and Analysis of Industrial SYstems*. Homewood, IL: Richard D. Irwin.
- Slack, N. J. (2016). *Operations Management*. Harlow, England: Person.
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics : systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Irwin/McGraw-Hill.

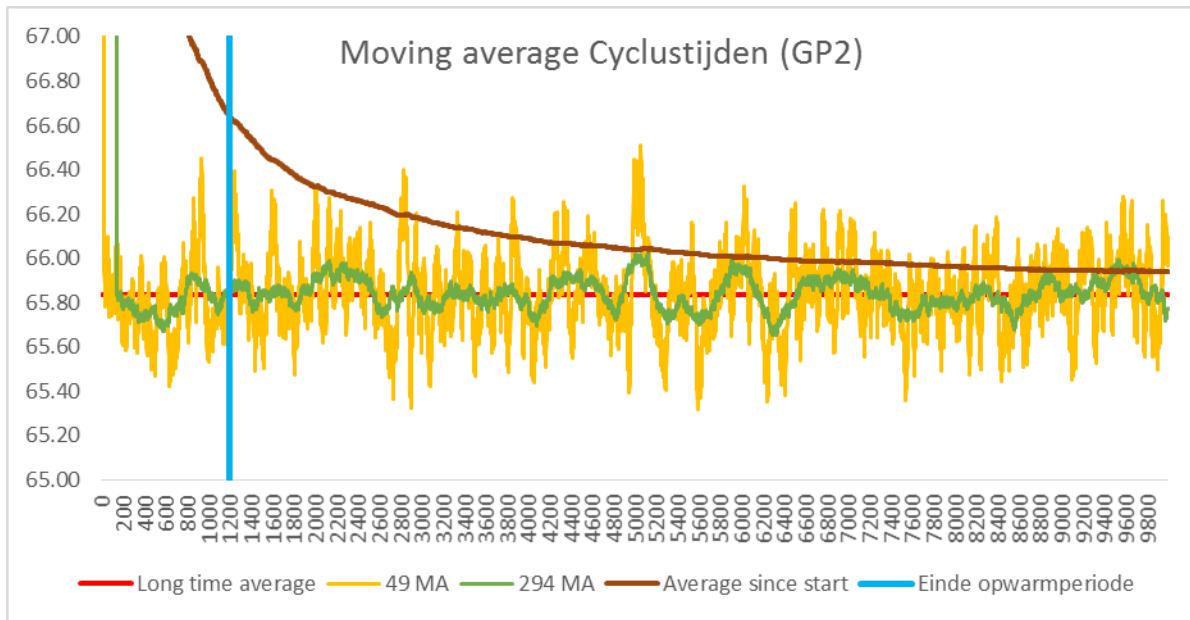
Appendix 1: Bepalen van de opwarmtijd

Voor het bepalen van de opwarmtijd hebben we gebruik gemaakt van de grafische methode van Welch. Hiervoor zijn 5 replicaties gedraaid van het simulatiemodel. Per component is er gekeken naar de gemiddelde cyclustijd in alle simulaties, een moving averages hiervan geplot. Het interval van de moving averages heb ik gebaseerd op terugkerende cycli in het systeem. Omdat een volle tray gemiddeld 24,5 carriers kan bedienen (zie paragraaf 3.3), maar een moving average met hele getallen wordt gedaan, kiezen we voor een moving average met een interval van 49. Daarnaast zijn er trays voornamelijk trays met SKU's die per product 1, 2, 3 of 4 maal nodig zijn, dus kiezen we als interval ook $(24.5 * (1 * 2 * 3 * 4) =) 294$ gekozen om overige terugkerende patronen uit de output te filteren.

Op basis van de grafische weergave hiervan bepalen we dat voor beide producten een opstarttijd van 1200 producten geschikt is. De piek aan het begin is te verklaren door het feit dat de simulatie leeg begint. Het duurt een tijdje voordat het eerste product van de band af is gerold, want dat kan pas nadat elke tray minimaal één keer vanuit het Part Supply station is aangeleverd.



Figuur 30: Welch's moving average voor GP1



Figuur 31: Welch's moving average voor GP2

Appendix 2: Het aantal benodigde replicaties

Als vuistregel voor het minimaal aantal te draaien replicaties per experiment geldt tussen de 3 en de 5. (Law, 2014). Om te bepalen of dit statistisch gezien genoeg is hebben we de simulatie tien maal herhaald en de outputwaarden naast elkaar gelegd. Door de outputwaardes te vergelijken met het gemiddelde van de waarnemingen ervoor berekenen we de variantie. Deze vergelijken we met de linkszijdige t-test met de toegestane foutmarge van 0,05. Het aantal vrijheidsgraden

zijn dan het aantal runs – 1. De error is dan $\frac{(t_{0,975,n-1} * \sqrt{\frac{VAR}{\#RUNS}})}{gemiddelde}$. Als dit voor NrReplicaties kleiner is dan de gestelde 0,05 concluderen we dat het aantal replicaties *nrReplicaties* genoeg is.

We merken dat twee replicaties voor zowel GP1 als GP2 genoeg is om met voldoende zekerheid te scheppen. Om onzekerheid te voorkomen kiezen we dus voor de 5 replicaties.

Tabel 18: Aantal replicaties GP1

NrReplication	MeanTroughputTime	Mean	Variance	Tvalue	Error	Test
1	62.00777793					
2	62.00098504	62.00438	2.31E-05	12.7062	0.000696	Ok
3	61.95406009	61.98761	0.000856	4.302653	0.001172	Ok
4	62.00156971	61.9911	0.000619	3.182446	0.000639	Ok
5	62.01200534	61.99528	0.000552	2.776445	0.000470	Ok
6	61.97890119	61.99255	0.000486	2.570582	0.000373	Ok
7	61.93023408	61.98365	0.00096	2.446912	0.000462	Ok
8	61.96161128	61.98089	0.000883	2.364624	0.000401	Ok
9	61.97471212	61.98021	0.000777	2.306004	0.000346	Ok
10	61.97039652	61.97923	0.000701	2.262157	0.000305	Ok

Tabel 19: Aantal Replicaties GP2

NrReplication	MeanTroughputTime	Mean	Variance	Tvalue	Error	Test
1	65.85686798					
2	65.86752656	65.8622	5.68E-05	12.7062	0.001028	Ok
3	65.81839642	65.8476	0.000668	4.302653	0.000975	Ok
4	65.88348601	65.85657	0.000767	3.182446	0.000669	Ok
5	65.83418094	65.85209	0.000676	2.776445	0.000490	Ok
6	65.84808676	65.85142	0.000543	2.570582	0.000371	Ok
7	65.76492137	65.83907	0.001522	2.446912	0.000548	Ok
8	65.84227527	65.83947	0.001306	2.364624	0.000459	Ok
9	65.86988314	65.84285	0.001245	2.306004	0.000412	Ok
10	65.79519137	65.83808	0.001334	2.262157	0.000397	Ok

Appendix 3: Productsamenstellingen van gangbare producten

SKU	GP1	GP2	KleinPS	KleinPP	GrootPS	GrootPP	PP	PS
A00001	11	7	1	2	4	3	PP1	PS1
A00002	0	0	0	0	0	0	PP1	PS1
A00003	0	1	2	1	1	3	PP1	PS1
A00004	0	1	1	1	2	2	PP1	PS1
A00005	0	1	0	1	1	1	PP1	PS1
A00006	0	1	1	1	3	2	PP1	PS1
A00007	1	1	1	1	1	1	PP1	PS1
A00008	1	1	1	1	1	1	PP1	PS1
A00009	1	0	0	1	1	1	PP1	PS1
A00010	0	1	0	1	2	1	PP1	PS1
A00011	0	1	0	1	0	1	PP1	PS1
A00012	1	0	0	1	1	1	PP1	PS1
A00013	1	1	0	1	1	1	PP3	PS2
A00014	1	4	0	1	1	1	PP3	PS2
A00015	3	0	0	1	1	1	PP3	PS2
A00016	2	2	1	1	2	1	PP3	PS2
A00017	1	1	0	1	1	3	PP3	PS2
A00018	1	1	1	1	1	1	PP3	PS2
A00019	1	1	1	0	1	1	PP3	PS2
A00020	1	1	2	1	2	1	PP3	PS2
A00021	0	2	1	0	3	1	PP3	PS2
A00022	1	1	1	0	1	2	PP3	PS2
A00023	1	1	1	1	1	2	PP3	PS2
A00024	1	0	0	1	1	1	PP2	VIB*
A00025	1	0	0	1	0	0	PP2	VIB*
A00026	0	1	0	1	0	0	PP2	VIB*
A00027	1	1	1	1	2	1	PP2	PS1
A00028	1	1	0	1	2	1	PP2	PS1
A00029	1	2	2	1	3	3	PP2	PS1
A00030	3	3	1	1	1	3	PP2	PS1
A00031	1	2	2	1	3	1	PP2	PS1
A00032	3	3	1	1	2	2	PP2	PS1
A00033	0	1	0	1	1	1	PP3	PS2
A00034	1	0	0	1	0	1	PP3	PS2
A00035	1	1	0	1	1	2	PP2	PS1
A00036	2	1	0	1	3	3	PP2	PS1

*Verenkeld in buffer, Part Supply station is uiteindelijk PS1.

Appendix 4: Uitgewerkt voorbeeld voor bepalen machineplanning

Als voorbeeld nemen we product GP2, waarvan de samenstelling in Appendix 3 staat. Vanuit paragrafen 2.4 en 3.2 weten we dat de gemiddelde bewerkingstijd in het Part Supply station (t_{ps}) gelijk is aan 2.2109 en de gemiddelde verwerkingstijd in het Part Placement station (t_{pp}) gelijk is aan 4.0816.

$$x = \frac{t_{ps}}{t_{ps} + t_{pp}} * N$$

Geeft ons $x = 29.84$. We gaan dus voor beide waarden van x analytisch berekenen wat de minimale verwerkingstijd is.

$$\text{s.t.} \quad t = \max \begin{cases} t_{ps} * n_{ps1} & \text{part supply 1} \\ t_{ps} * n_{ps2} & \text{part supply 2} \\ t_{pp} * n_{pp1} + 0,35 & \text{partplacement 1} \\ t_{pp} * n_{pp2} + 0,35 & \text{partplacement 2} \\ t_{pp} * n_{pp3} + 0,35 & \text{partplacement 3} \end{cases}$$

Tabel 20

$$x = 29 \vee 30$$

$$n_{ps1} = x - V$$

$$n_{ps2} = N - n_{ps1} - V$$

$$n_{pp1} = \text{ceil}\left(\frac{n_{ps1} + V}{2}\right)$$

$$n_{pp2} = \text{floor}\left(\frac{n_{ps1} + V}{2}\right)$$

$$n_{pp3} = n_{ps2}$$

$$x, n_{station}, N, V \in \mathbb{Z}_+$$

$$x, V \leq N$$

x	28	29
n_{ps1}	28	29
n_{ps2}	17	16
n_{pp1}	14	15
n_{pp2}	15	15
n_{pp3}	17	16
Max(t)	69.74	65.66

Uit tabel 20 leiden we dus af dat de configuratie met 30 componenten in Part Supply 1 de beste systeemconfiguratie is voor het desbetreffende product. Deze proberen we samen te stellen uit 2 sets SKU's die samen 15 componenten bevatten. Een mogelijke afstelling die aan de SKU eisen voldoet staat in tabel 21.

Tabel 21: Mogelijke systeemindeling voor product GP2

PS1&PP1

A00001	7
A00002	0
A00003	1
A00004	1
A00005	1
A00006	1
A00007	1
A00008	1
A00010	1
A00011	1

SomPP1 15

SomPS1 29

SomPS2 16

PS1&PP2

A00027	1
A00028	1
A00029	2
A00030	3
A00031	2
A00032	3
A00035	1
A00036	1

Met hand & PP2

A00026	1
--------	---

SomPP2 15

PS2 & PP3

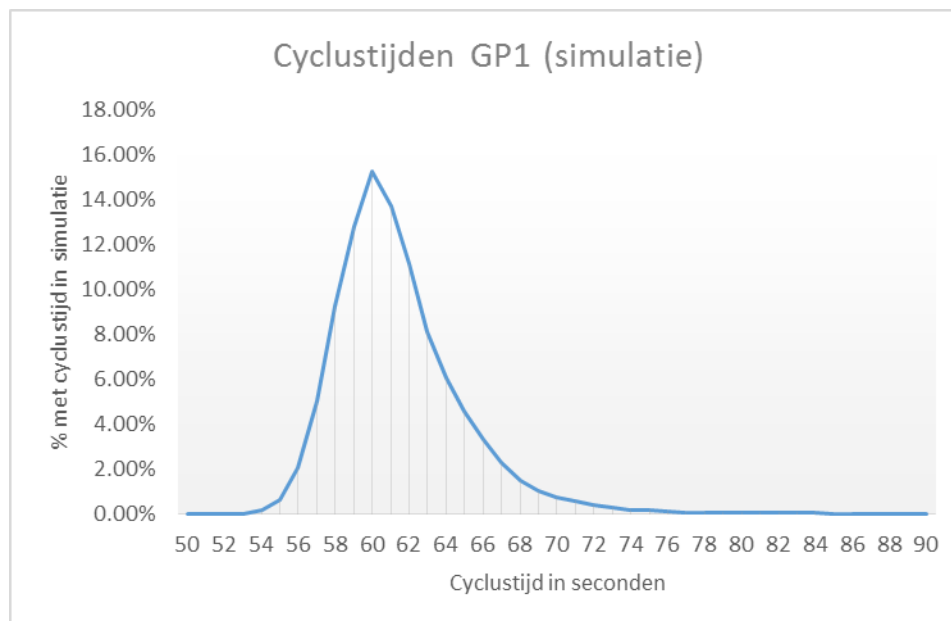
A00013	1
A00014	4
A00016	2
A00017	1
A00018	1
A00019	1
A00020	1
A00021	2
A00022	1
A00023	1
A00033	1

SomPP3 16

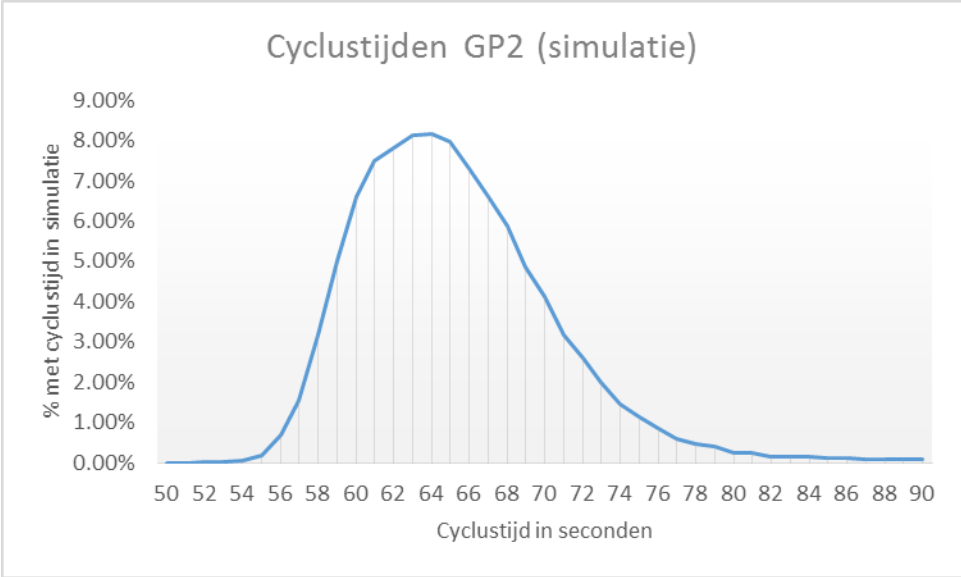
Appendix 5: Resultaten nulmetingen

Tabel 22: Nulmetingen simulatie voor GP1 en GP2

	GP1	GP2
Cyclustijden		
Gem. cyclustijd	61.992	65.852
Theoretisch gemiddeld	61.905	65.656
Afwijking t.o.v. theorie	-0.087	-0.196
Deel binnen 70s	0.969	0.815
Bezettingsgraad		
PartSupply1	0.845	0.825
PartSupply2	0.453	0.455
PartPlacer1	0.987	0.929
PartPlacer2	0.987	0.929
PartPlacer3	0.987	0.991
WIP		
Max Trays in systeem	57	62
Gem. SKU's in systeem	918	1165



Figuur 32: Verdeling cyclustijden bij nulmeting: GP1



Figuur 33: Verdeling cyclustijden bij nulmeting: GP2

Appendix 6: Berekening stationvulling bij interventies

Om de effecten van de interventies te berekenen moeten sommige stations eerst optimaal ingevuld worden. Hoe de aantallen in de verschillende stations voor de interventies is bepaald is te vinden in deze appendix. Daarbij staat ook een voorbeeld, voor dit voorbeeld zijn de inputwaarden van GP2 gebruikt en deze staan hieronder.

Input		Benaming:
Componenten	46	N
waarvan Handmatig:	1	H
T(PS)	2.21085	TPS
T(PP)	4.08164	TPP
tPP/(tPS+tPP)	0.6487	Verh

Voor de verwerkingstijden geldt:

$$tPS = nPS * T(PS)$$

$$tPP_1 = nPP * T(PP)$$

$$tPP_{2,3,4} = nPP * T(PP) + 0.35$$

Standaard situatie:

$$nPS_1 = ((Verh * N) \text{ afgerond naar boven en beneden}) - H$$

$$nPS_2 = N - nPS_1 - H$$

$$nPP_1 = \text{floor}((nPS_1 + H)/2)$$

$$nPP_2 = \text{Ceil}((nPS_1 + H)/2)$$

$$nPP_3 = nPS_2$$

Zonder Interventies	floor-1 (controle)		Floor		Ceil		ceil+1 (controle)		
PS1	27	59.69296	28	61.90381	29	64.11466	30	66.32551	
PS2	17	37.58446	16	35.37361	15	33.16276	14	30.9519	
PP1	14	57.14286	14	57.14286	15	61.22449	15	61.22449	
PP2	14	57.49286	15	61.57449	15	61.57449	16	65.65612	
PP3	17	69.73775	16	65.65612	15	61.57449	14	57.49286	
		69.73775	PP3	65.65612	PP3	64.11466	PS1	66.32551	PS1
				Bottleneck		PS1			
				Cyclustijd		64.11466			

Interventie 1:

$$nPS_1 = \text{Ceil}(N/2) - H$$

$nPS_2 = \text{floor}(N/2)$
 $nPP_1 = \text{Ceil}((nPS_1+h)/2)$
 $nPP_2 = \text{floor}((nPS_1+h)/2)$
 $nPP_3 = \text{Ceil}(nPS_2)$
 $nPP_4 = \text{floor}(nPS_2)$

Interventie 1: Vier Part Placers					
		PS1	22	48.63871	PS1
		PS2	22	48.63871	PS2
		PP1	12	48.97959	PP1
		PP2	11	44.89796	PP2
		PP3	11	44.89796	PP3
		PP4	11	44.89796	PP4
		Bottleneck		PP1	
		Cyclustijd		48.97959	

Interventie 2:

$nPS_1 = ((\text{Verh} * N) \text{ afgerond naar boven en beneden}) - N - H$
 $nPS_2 = N - nPS_1 - H$
 $nPP_1 = \text{floor}((nPS_1 + H + n\text{Overkant})/2)$
 $nPP_2 = \text{Ceil}((nPS_1 + H + n\text{Overkant})/2)$
 $nPP_3 = nPS_2 - n\text{Overkant}$

*aantal componenten dat van PS_2 naar PP_1 & PP_2 gaat. Vastgesteld op 2.

Interventie 2: van PS_2 naar PP_1 en PP_2									
		floor-1		Floor		Ceil		ceil+1	
PS1		25	55.27126	26	57.48211	27	59.69296	28	61.90381
PS2		19	42.00616	18	39.79531	17	37.58446	16	35.37361
PP1		14	57.14286	14	57.14286	15	61.22449	15	61.22449
PP2		14	57.49286	15	61.57449	15	61.57449	16	65.65612
PP3		17	69.73775	16	65.65612	15	61.57449	14	57.49286
		69.73775	PP3	65.65612	PP3	61.57449	PP2	65.656122	PP2
Aantal van PS_2 :				Bottleneck		PP2			
	2			Cyclustijd		61.57449			

Interventie 3:

$nPS_1 = ((\text{Verh} * N) \text{ afgerond naar boven en beneden}) - N - H$
 $nPS_2 = N - nPS_1 - H$
 $nPP_1 = (nPS_1+h)/2$
 $nPP_2 = (nPS_1+h)/2$
 $nPP_3 = nPS_2$

Interventie 3									
		floor-1 (controle)		Floor		Ceil		ceil+1 (controle)	
PS1		28	61.90381	29	64.11466	30	66.32551	31	68.53636
PS2		17	37.58446	16	35.37361	16	35.37361	14	30.9519
PP1		14.5	59.18367	15	61.22449	15.5	63.26531	16	65.30612
PP2		14.5	59.53367	15	61.57449	15.5	63.61531	16	65.65612
PP3		17	69.73775	16	65.65612	16	65.65612	14	57.49286
		69.73775	PP3	65.65612	PP3	66.32551	PS1	68.536361	PS1
				Bottleneck		PP3			
				Cyclustijd		65.65612			

Interventie 2 en 3:

$$nPS_1 = nPP_1 + nPP_2 - H - nOverkant$$

$$nPS_2 = nPP_3 + nOverkant$$

$$nPP_1 = N/3$$

$$nPP_2 = N/3$$

$$nPP_3 = N/3$$

*aantal componenten dat van PS₂ naar PP₁ & PP₂ gaat. Vastgesteld op 2 + de te verdelen SKU

Interventie 2 & 3				
PS1		27	59.69296	PS1
PS2		17	37.58446	PS2
PP1		15	61.22449	PP1
PP2		15	61.57449	PP2
PP3		15	61.57449	PP3
Aantal van PS2:	Bottleneck	PP2		
2	Cyclustijd	61.57449		

Interventie 1 en 3:

$$nPS_1 = \text{Ceil}(n/2) - h$$

$$nPS_2 = \text{Floor}(N/2) - H$$

$$nPP_1 = (nps1 + H) / 2$$

$$nPP_2 = (nps1 + H) / 2$$

$$nPP_3 = nps2 / 2$$

$$nPP_4 = nps2 / 2$$

Interventie 1&3: Vier Part Placers geleveld				
PS1		21	46.42786	PS1
PS2		22	48.63871	PS2
PP1		11.5	46.93878	PP1
PP2		11.5	46.93878	PP2
PP3		11	44.89796	PP3
PP4		11	44.89796	PP4
	Bottleneck		PS2	
	Cyclustijd		48.63871	

Appendix 7: Voorkeuren interventies

In de tabel hieronder staan de voorkeuren voor de interventies, gegeven of er wel of geen extra investering gedaan wordt. We kijken hierbij naar producten van 35 tot en met 55 componenten (N). Per product maken we onderscheid in hoeveel van de componenten met de hand verenkeld worden (H). De producten die we in het simulatiemodel gebruiken zijn oranje gemarkeerd.

Onder *Niets Extra* vinden we in de eerste kolom groen gearceerd als er naast interventie 1 geen interventie is die de cyclustijd verkort. In de tweede tabel staat groen gearceerd als het invoeren van enkel interventie 3 de cyclustijd verkort.

Onder *Extra loopband* vinden we in de eerste kolom waarden groen gearceerd als interventie 2 een verbetering oplevert ten opzichte van geen extra investering, en de rechter kolom is groen gearceerd als interventie 3 toevoegen beter werkt dan enkel interventie 2.

Onder de header *Extra Part Placer* staan interventies 1 en interventie 1 & 3. Deze zijn altijd beter dan geen extra investering, dus is enkel aangegeven wanneer ook interventie 3 toegevoegd moet worden.

			Niets Extra		Extra loopband?		Extra PartPlacer	
N	H	0	$0 \leq 2, 0 \leq 3, 0 \leq 2 \& 3$	$3 < 0$	$2 < 0$	$2 \& 3 < 2, 2 \& 3 < 3$	$1 \leq 1 \& 3$	$1 \& 3 < 1$
35	0	50.85	50.85	51.59	49.33	47.97	39.80	39.80
35	1	49.33	49.33	49.38	49.33	47.97	37.58	37.58
35	2	49.33	49.33	47.97	49.33	47.97	37.58	37.58
35	3	49.33	49.33	47.97	49.33	47.97	37.58	37.58
36	0	53.06	53.06	53.06	49.33	49.33	39.80	39.80
36	1	50.85	50.85	50.85	49.33	49.33	39.80	39.80
36	2	49.33	49.33	49.33	49.33	49.33	39.80	39.80
36	3	49.33	49.33	49.33	49.33	49.33	39.80	39.80
37	0	53.41	53.41	54.53	53.41	50.69	42.01	42.01
37	1	53.41	53.41	52.32	53.41	50.69	41.17	39.80
37	2	53.41	53.41	50.69	53.41	50.69	41.17	39.80
37	3	53.41	53.41	50.69	53.41	50.69	41.17	39.80
38	0	55.27	55.27	56.01	53.41	52.05	42.01	42.01
38	1	53.41	53.41	53.80	53.41	52.05	42.01	42.01
38	2	53.41	53.41	52.05	53.41	52.05	42.01	42.01
38	3	53.41	53.41	52.05	53.41	52.05	42.01	42.01
39	0	57.48	57.48	57.48	53.41	53.41	44.22	44.22
39	1	55.27	55.27	55.27	53.41	53.41	42.01	42.01
39	2	53.41	53.41	53.41	53.41	53.41	42.01	42.01
39	3	53.41	53.41	53.41	53.41	53.41	42.01	42.01

40	0	57.49	57.49	58.96	57.49	54.77	44.22	44.22
40	1	57.49	57.49	56.75	57.49	54.77	44.22	44.22
40	2	57.49	57.49	54.77	57.49	54.77	44.22	44.22
40	3	57.49	57.49	54.77	57.49	54.77	44.22	44.22
41	0	59.69	59.69	60.43	57.49	56.13	46.43	46.43
41	1	57.49	57.49	58.22	57.49	56.13	45.25	44.22
41	2	57.49	57.49	56.13	57.49	56.13	45.25	44.22
41	3	57.49	57.49	56.13	57.49	56.13	45.25	44.22
42	0	61.57	61.57	61.90	57.49	57.49	46.43	46.43
42	1	59.69	59.69	59.69	57.49	57.49	46.43	46.43
42	2	57.49	57.49	57.49	57.49	57.49	46.43	46.43
42	3	57.49	57.49	57.49	57.49	57.49	46.43	46.43
43	0	61.90	61.90	63.38	61.57	58.85	48.64	48.64
43	1	61.57	61.57	61.17	61.57	58.85	46.43	46.43
43	2	61.57	61.57	58.96	61.57	58.85	46.43	46.43
43	3	61.57	61.57	58.85	61.57	58.85	46.43	46.43
44	0	64.11	64.11	64.85	61.57	60.21	48.64	48.64
44	1	61.90	61.90	62.64	61.57	60.21	48.64	48.64
44	2	61.57	61.57	60.43	61.57	60.21	48.64	48.64
44	3	61.57	61.57	60.21	61.57	60.21	48.64	48.64
45	0	65.66	65.66	66.33	61.90	61.90	50.85	50.85
45	1	64.11	64.11	64.11	61.57	61.57	49.33	48.64
45	2	61.90	61.90	61.90	61.57	61.57	49.33	48.64
45	3	61.57	61.57	61.57	61.57	61.57	49.33	48.64
46	0	66.33	66.33	67.80	65.66	62.94	50.85	50.85
46	1	65.66	65.66	65.59	65.66	62.94	50.85	50.85
46	2	65.66	65.66	63.38	65.66	62.94	50.85	50.85
46	3	65.66	65.66	62.94	65.66	62.94	50.85	50.85
47	0	68.54	68.54	69.27	65.66	64.30	53.06	53.06
47	1	66.33	66.33	67.06	65.66	64.30	50.85	50.85
47	2	65.66	65.66	64.85	65.66	64.30	50.85	50.85
47	3	65.66	65.66	64.30	65.66	64.30	50.85	50.85
48	0	69.74	69.74	70.75	66.33	66.33	53.06	53.06
48	1	68.54	68.54	68.54	65.66	65.66	53.06	53.06
48	2	66.33	66.33	66.33	65.66	65.66	53.06	53.06
48	3	65.66	65.66	65.66	65.66	65.66	53.06	53.06
49	0	70.75	70.75	72.22	69.74	67.02	55.27	55.27
49	1	69.74	69.74	70.01	69.74	67.02	53.41	53.06
49	2	69.74	69.74	67.80	69.74	67.02	53.41	53.06
49	3	69.74	69.74	67.02	69.74	67.02	53.41	53.06

50	0	72.96	72.96	73.70	69.74	68.38	55.27	55.27
50	1	70.75	70.75	71.48	69.74	68.38	55.27	55.27
50	2	69.74	69.74	69.27	69.74	68.38	55.27	55.27
50	3	69.74	69.74	68.38	69.74	68.38	55.27	55.27
51	0	73.82	73.82	75.17	70.75	70.75	57.48	57.48
51	1	72.96	72.96	72.96	69.74	69.74	55.27	55.27
51	2	70.75	70.75	70.75	69.74	69.74	55.27	55.27
51	3	69.74	69.74	69.74	69.74	69.74	55.27	55.27
52	0	75.17	75.17	76.64	73.82	71.10	57.48	57.48
52	1	73.82	73.82	74.43	73.82	71.10	57.48	57.48
52	2	73.82	73.82	72.22	73.82	71.10	57.48	57.48
52	3	73.82	73.82	71.10	73.82	71.10	57.48	57.48
53	0	77.38	77.38	78.12	73.82	72.46	59.69	59.69
53	1	75.17	75.17	75.91	73.82	72.46	57.49	57.48
53	2	73.82	73.82	73.70	73.82	72.46	57.49	57.48
53	3	73.82	73.82	72.46	73.82	72.46	57.49	57.48
54	0	77.90	77.90	79.59	75.17	75.17	59.69	59.69
54	1	77.38	77.38	77.38	73.82	73.82	59.69	59.69
54	2	75.17	75.17	75.17	73.82	73.82	59.69	59.69
54	3	73.82	73.82	73.82	73.82	73.82	59.69	59.69
55	0	79.59	79.59	81.06	77.90	75.18	61.90	61.90
55	1	77.90	77.90	78.85	77.90	75.18	59.69	59.69
55	2	77.90	77.90	76.64	77.90	75.18	59.69	59.69
55	3	77.90	77.90	75.18	77.90	75.18	59.69	59.69