

OPTIMALISATIE VAN HET MIM PROCES BIJ DEMCON

Bacheloropdracht



Guus Dubbink
2 februari, 2018

Titel:

Optimalisatie van het MIM proces bij Demcon

Onderzoeksvraag:

‘Waar in het MIM proces ontstaan bottlenecks naarmate de productie stijgt en hoe kunnen deze worden weggenomen?’

Auteur:

G.H.C. Dubbink (Guus)

Studentnummer:

s1488465

Datum, Plaats:

2 februari 2018, Oldenzaal

Opleiding:

Technische Bedrijfskunde

DEMCON

Begeleider:

Dr. Ir. E. Dietrich (Erik)

UNIVERSITEIT TWENTE

1^e begeleider:

Dr. Ir. M.R.K. Mes (Martijn)

2^e begeleider:

Dr. Ir. L.L.M. van der Wegen (Leo)



**UNIVERSITY
OF TWENTE.**

De gegevens van bewerkingstijden per product en omschrijvingen van processen zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Managementsamenvatting

Demcon Metal Injection Molding (DMIM) is een onderneming die zich bezig houdt met het spuitgieten van kleine metalen onderdelen. Dit onderzoek staat in dienst van het verhogen van de productie aantallen van het MIM proces. Daarom is het doel van dit onderzoek om de informatie te verzamelen op grond waarvan de bottlenecks in het productieproces kunnen worden geïdentificeerd, alsmede bepaald kan worden in welke mate deze bottlenecks optimalisatie van het productieproces in de weg staan.

Demcon ziet graag dat het productieproces in kaart wordt gebracht en dat er wordt bepaald waar in de productie de bottleneck zit. Er moet een strategie worden bedacht hoe de bottleneck(s) kunnen worden weggenomen. Op basis hiervan is de volgende onderzoeksvraag opgesteld:

‘Waar in het MIM proces ontstaan bottlenecks naarmate de productie stijgt en hoe kunnen deze worden weggenomen?’

Het onderzoek begint met het analyseren van de huidige productie. De uitkomst van de analyse is dat de hoeveelheid productie het beste kan worden weergegeven in gewicht per tijdseenheid. Vervolgens zijn alle productiestappen in kaart gebracht met historische en zelf gemeten data.

In het theoretisch kader is onderzocht dat de maximale productiecapaciteit kan worden bepaald door randvoorwaarden aan de productie te stellen. In dit onderzoek zijn het huidig aantal machines en aantal werknemers twee belangrijke randvoorwaardes. Verder is er in de literatuur gezocht naar een methode om de bottleneck op te sporen en weg te nemen. De voordelen gebruiksgemak, validatie en tijd geven de doorslag om simulatie te gebruiken in het onderzoek. Theory of Constraints blijkt een nuttige achtergrond theorie te zijn voor het optimaliseren van een productie.

Op basis van de analyse van de huidige situatie en in aanloop naar het simulatiemodel is een conceptueel model opgezet. Hierin worden onder andere de kritieke prestatie indicatoren (KPI's) weergegeven. De KPI's voor dit onderzoek zijn benutting productiecapaciteit per onderdeel (%), aantal kilo product spuitgegoten per week, aantal kilo product verzonden per week, aantal uren gewerkt per week en aantal minuten arbeidstijd per kilo. Op basis van deze indicatoren wordt verbetering gemeten.

Dit simulatiemodel is gevalideerd en is bevonden als een juiste benadering van de werkelijkheid om haar doel te bereiken. Uit een eerste bottleneck analyse komt naar voren dat de productie haar capaciteit voor XX% benut en dat de werknemers de bottleneck vormen. Er is in dit onderzoek op vier verschillende methodes onderzocht hoe de productie kan worden verhoogd: door capaciteit toe te voegen in de vorm van machines en personeel, door de manier van handelen aan te passen, door capaciteit toe te voegen in de vorm van werktijden en door de planning aan te passen met een uitgebreid simulatiemodel.

In de bottleneck matrix wordt er extra capaciteit toegevoegd aan de stap met de hoogste bezettingsgraad, de bottleneck. Na de toevoeging wordt er door middel van simulatie berekend hoeveel er met de nieuwe capaciteit kan worden geproduceerd en welk productie onderdeel op dat moment de bottleneck vormt. Deze procedure wordt herhaald tot de productie meer dan verdubbeld is. Uit de bottleneck matrix kan worden afgelezen dat de bottleneck werknemers wordt afgewisseld door de spuitgietmachines als bottleneck tot de maximale capaciteit van de waterbakken wordt bereikt. Een belangrijke opmerking bij de bottleneck matrix is dat de productie alleen stijgt door het verhogen van de capaciteit van het in de bottleneck matrix aangegeven productieonderdeel.

Er zijn vier interventies opgesteld om de productie te verhogen door de manier van handelen aan te passen.

Beschrijving interventies weggelaten wegens geheimhouding.

Als alle vier de interventies worden ingevoerd blijkt dat de bezetting van de arbeidcapaciteit is gedaald van XX naar XX procent. De werknemers hebben nog de hoogste bezettingsgraad, dus blijven de bottleneck in de productie. Er is wel XX uur per week minder nodig om dezelfde planning van XX kilo te halen.

Er wordt gekeken hoe de productie verhoogd kan worden door capaciteit toe te voegen in de vorm van werktijden. In een experiment waarbij zes werknemers steeds verspreider op de dag werken, blijkt dat de productie niet hoger wordt. Als er echter met zeven of acht personen wordt gewerkt heeft deze interventie wel effect. Als de extra kosten voor arbeid worden meegerekend blijkt dat het optimaal is om geen overlap tussen de twee shifts te hebben en te werken in twee groepen op de tijden 06:00 – 14:30 uur & 15:00 – 23:30 uur. De productie bij zeven en acht personen stijgt respectievelijk 10 en 20 procent door de interventie.

Bij de laatste groep van experimenten wordt er gekeken naar het effect op de productie van het aanpassen van de planning voor de werknemers. Hiervoor wordt het simulatiemodel uitgebreid. Er blijkt dat het best twee personen ingepland kunnen worden voor het overstapelen, in plaats van drie of vier personen. Er kan worden geconcludeerd dat er meer wordt geproduceerd als de arbeidsstappen van het debinden worden ingepland en als bundel van taken wordt uitgevoerd. Als beide interventies worden ingevoerd kan er bij een productie van 138 kilo 34.5 minuten per week worden bespaard.

We hebben de volgende aanbevelingen voor Demcon MIM:

Aanbevelingen weggelaten wegens geheimhouding.

Voorwoord

Voor u ligt mijn Bacheloropdracht 'Optimalisatie van het MIM proces bij Demcon'. Het onderzoek richt zich op het inzichtelijk maken van de productie van Demcon Metal Injection Molding, het vinden van de bottleneck in de productie en het wegnemen van deze bottleneck. Voor het onderzoek heb ik een periode van 10 weken intern gewerkt bij Demcon MIM in Oldenzaal. Deze periode liep van begin november 2017 tot eind januari 2018.

Tijdens het onderzoek heb ik geleerd om de kennis uit de boeken toe te passen in de praktijk. Op het gebied van simuleren heb ik een hoop bijgeleerd. Vooral tijdens het opbouwen van het model, wat tijdens de studie vaak al is gebeurd. Daarnaast was het samenwerken met collega's erg waardevol, zij hebben mij een goed beeld gegeven hoe het werken in een bedrijf eruit ziet.

Het geeft een goed gevoel om te zien dat ik als student een bijdrage kan leveren aan het verbeteren van een bestaande productie. Ik hoop dat de aanbevelingen een ondersteunende rol in de productie gaan spelen.

Mijn dank gaat uit naar mijn begeleiders Erik Dietrich (Demcon) en Martijn Mes (Universiteit Twente). Beide hebben ze mij van erg nuttige feedback voorzien en mij in de goede richting kunnen sturen als dat nodig was. De discussies over mogelijke verbeteringen voor de productie waren erg waardevol in het denkproces.

Daarnaast wil ik graag mijn collega's Rob Egbrink, Jochem Aarnink, Olaf Rave en Jeroen Wagenaar bedanken voor de gezellige sfeer op de werkvloer en het vrijmaken van hun tijd om naar mijn ideeën te luisteren.

Als laatste gaat mijn dank uit naar vrienden en familie voor de interesse in de voortgang van mijn onderzoek. Dit hielp erg bij de motivatie en het succesvol afronden van het onderzoek.

Veel leesplezier!

Guus Dubbink

Enschede, 2 februari 2018

1 Inhoudsopgave

Managementsamenvatting.....	V
Voorwoord	VIII
1 Inleiding.....	13
1.1 Bedrijfsbeschrijving Demcon	13
1.2 Aanleiding tot het onderzoek	13
1.3 Probleemidentificatie	13
1.4 Onderzoeksdoel	16
1.5 Stakeholders	16
1.6 Hoofdvraag en onderzoeksvragen	16
1.6.1 Hoofdvraag.....	16
1.6.2 Deelvragen	16
2 Het huidige productieproces: Metal Injection Molding.....	18
2.1 Productiestappen.....	18
2.2 Bereik van de productiestappen	19
2.3 Indeling van de productie	19
2.4 Gegevens over de productie	20
2.4.1 Productiestap: Spuitgieten.....	20
2.4.2 Productiestap: Waterdebinden	27
2.4.3 Productiestap: Thermisch debinden	28
2.4.4 Productiestap: Overstapelen	28
2.4.5 Productiestap: Sinteren	29
3 Theoretisch kader	31
3.1 Bottleneck	31
3.2 Productiecapaciteit	32
3.3 Kritieke Prestatie Indicatoren	33
3.4 Simulatie	34
3.5 Optimalisatie van het arbeidsproces	36
4 Het model	38
4.1 Conceptueel model	38
4.2 Data voor het model	45

4.3	Geïmplementeerd simulatiemodel	46
4.3.1	Software	46
4.3.2	Code achter het model	46
4.3.3	Vereenvoudigingen in het model.....	48
4.3.4	Weergave van het model	48
4.4	Validatie en verificatie	49
4.4.1	Data validatie	49
4.4.2	White box validatie en verificatie model	49
4.4.3	Black box validatie model	49
4.4.4	Conclusie	52
4.5	Warm-up time, Runlength & Replicaties	53
4.5.1	Warm-up period.....	54
4.5.2	Run length	54
4.5.3	Replicaties	55
4.6	Gevoeligheidsanalyse.....	56
5	Bottleneck en interventies.....	57
5.1	Ontwerp experimenten	57
5.2	Benutting productiecapaciteit	58
5.3	Bottleneck matrix.....	59
5.4	Interventie type 1.....	61
5.4.1	Interventie 1 – Platen opsparen bij spuitgieten.....	62
5.4.2	Interventie 2 – Dagplanning ophangen.....	62
5.4.3	Interventie 3 – Per rack in de waterbak.....	62
5.4.4	Interventie 4 – Overstapelen voorkomen.....	62
5.4.5	Resultaat interventies 1 t/m 4	62
5.5	Interventie type 2.....	62
5.5.1	Interventie 5 – Schuiven met shifttijden.....	62
5.6	Interventie type 3.....	62
5.6.1	Meer detail in het simulatiemodel	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
5.6.2	Interventie 6 – Plannen met bottleneck centraal	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
6	Conclusie en aanbevelingen	63
6.1	Conclusie	63

6.2	Aanbevelingen	65
7	Bronnen.....	66
	Bijlage A: De productiehal.....	67
	Bijlage B: Afstanden tussen productiestappen	68
	Bijlage C: Tabellen over aantal en gewicht van week 14 t/m 17	69
	Bijlage D: Gemeten data spuitgieten	70
	Bijlage E: Kansverdeling	71
	Bijlage F: Fracties en bewerkingstijden.....	72
	Bijlage G: Spuittijden uit logboeken.....	73
	Bijlage H: S.M.A.R.T. beoordeling voor KPI's	74
	Bijlage I: Procestijden van de productiestappen	75
	Bijlage J: Productie weken 43 t/m 49 (2017)	76
	Bijlage K: Code simulatiemodel	77
	Bijlage L: Gewerkte uren per maand	78
	Bijlage M: Output data bottleneck matrix	79
	Bijlage N: Nieuwe overstapeltijden (interventie 4)	80
	Bijlage O: Arbeidskosten per kilo product (interventie 5)	81

1 Inleiding

In de inleiding wordt een bedrijfsbeschrijving, de aanleiding voor het onderzoek, de probleemidentificatie, het onderzoeksdoel en de hoofd- en deelvragen beschreven.

1.1 Bedrijfsbeschrijving Demcon

Demcon is een Enschedees' bedrijf dat technologische systemen en producten ontwikkeld voor industriële en medische toepassingen. Het bedrijf is in 1993 gestart als ingenieursbureau en sindsdien uitgegroeid tot een van de grotere bedrijven in Enschede. De groei van Demcon is voornamelijk het resultaat van dat Demcon kleinere ondernemingen onder haar hoede neemt. In deze samenwerkingsconstructie blijven deze ondernemingen zelfstandig en ieder met hun eigen specialisatie. De gelijkenis is dat alle sub-ondernemingen hun kennis en kunde waar mogelijk bij Demcon halen. Er is in ieder geval standaardisatie op terreinen als HR, boekhouding en marketing.

Een van die ondernemingen is Demcon Metal Injection Molding (DMIM). Deze onderneming houdt zich bezig met de productie van kleine metalen onderdelen door middel van spuitgieten (denk bijvoorbeeld aan ringetjes of ventielen). De specifieke methode die wordt gebruikt is bedacht aan de Universiteit Delft. Hieruit is een spin-off ontstaan en die is overgenomen door Demcon. De DMIM onderneming is verplaatst naar Oldenzaal, zodat het in de buurt van het moederbedrijf Demcon is gelegen.

Het proces is met de kennis van Demcon verder ontwikkeld. DMIM is zo een winstgevende onderneming geworden. Er blijkt een grote vraag naar haar producten. Een bijkomend voordeel van de samenwerking met Demcon is dat de metalen onderdelen ook gebruikt kunnen worden voor andere producties van Demcon.

1.2 Aanleiding tot het onderzoek

Hoewel DMIM een winstgevend bedrijf is, begonnen enkele managers zich gaandeweg 2016-2017 vragen te stellen bij de huidige productiewijze. Is het wel (voldoende) efficiënt? En kan de capaciteit van de productiehal niet omhoog? Aangezien de vraag naar het product nog niet lijkt verzadigd, is de productieverhoging interessant, zeker als dit binnen de bestaande hal en dezelfde capaciteit kan worden bereikt. Specifieke zaken die men reeds constateerde waren onder andere dat er in de huidige situatie niet specifiek wordt gekeken wanneer de productie het beste kan beginnen, hoeveel personeel er het beste ingezet kan worden of hoeveel machines er moeten draaien. Deze aantallen worden geschat op basis van ervaring en zijn niet gebaseerd op theorie of onderzoek. Alle reden dus om een onderzoek te laten starten naar de optimalisatie van het MIM proces.

1.3 Probleemidentificatie

Voordat het onderzoek wordt gestart is het van belang om de problemen duidelijk in kaart te brengen. Een manier om dat te doen is door de methode van het boek 'Geen Probleem' te volgen (Heerkens, 2012). In dit boek wordt in vier stappen het kernprobleem bepaald. Deze vier stappen zijn als volgt:

1. Inventariseer welke problemen er zijn
2. Geef aan wat oorzaken en gevolgen zijn en zet ze in een probleemkluwen
3. Kies het kernprobleem dat je gaat aanpakken
4. Maak je probleem meetbaar

In deze paragraaf doorloop ik deze stappen. Bij de eerste stap dienen de problemen nog niet te worden gefilterd. Het is juist de bedoeling alle mogelijke problemen naar boven te halen. De problemen zijn naar boven gekomen bij het observeren van de productie en in de gesprekken met de werknemers van DMIM.

De productie voldoet niet aan de verwachtingen van het management

Zoals in de aanleiding van het onderzoek is aangegeven voldoet de efficiëntie van de productie niet aan de verwachtingen van het management. Het management denkt dat er per tijdeenheid meer geproduceerd kan worden. Dit kan liggen aan een lage benutting van de gegeven maximale capaciteit of aan een structureel te lage maximale capaciteit.

De bottlenecks in het productieproces zijn onbekend

Het is niet bekend waar in het systeem de bottleneck zit. Het management wil graag het MIM proces verbeteren, maar weet niet welke productiestap verbeterd moet worden om meer te kunnen produceren. Pas als deze informatie bekend is, kan worden nagedacht over de vraag hoe deze stap efficiënter kan verlopen. De reden dat de bottleneck niet bekend is; is aan de ene kant dat er tot nu toe niemand naar heeft gekeken en aan de andere kant dat de benodigde informatie nog niet voor het oprapen ligt.

Er is twijfel over de standaard van maximale productie bepaling

Om te komen tot een optimalisatie van de productie moet er eerst bekend zijn hoe de (maximale) productiecapaciteit het beste kan worden bepaald. Hierover bestaat onzekerheid op twee niveau's. Allereerst is het onduidelijk hoe de (maximale) capaciteit het best kan worden gemeten of bepaald. De productiecapaciteit kan worden gemeten in het totaal aantal producten geproduceerd per tijdseenheid of in het totale gewicht aan producten geproduceerd per tijdseenheid. De keuze tussen aantal producten of het gewicht moet nog onderzocht worden, dat hangt af van hoe de verschillende soorten producten variëren in productietijd over een periode. Dat wordt gemeten per tijdseenheid staat al wel vast, omdat men graag wil zien dat er meer in dezelfde tijd produceert kan worden. De informatie die nodig is om de capaciteit te berekenen brengt ons bij het volgende probleem.

Twee problemen weggelaten wegens geheimhouding.

Aan het begin van de dag komt de productie moeizaam op gang

Als de productiedag begint duurt het enkele minuten voordat de werknemers aan het werk zijn. Dit oorzaak hiervoor is dat het niet meteen bekend is welke taak een ieder krijgt toebedeeld. De manager geeft deze taken mondeling door en dit neemt even tijd in beslag.

De productieplanning is niet voldoende uitgewerkt

De productieplanning wordt per week gemaakt in een tool die is gebaseerd op aannames en ervaring. De tool is nooit volledig afgemaakt, maar wordt gebruikt omdat het een ruwe inschatting kan geven van hoeveel personeel er nodig is in de komende week. De planning geeft aan hoeveel er van de verschillende producten gemaakt moet worden per machine, maar deze inschatting komt zelden uit.

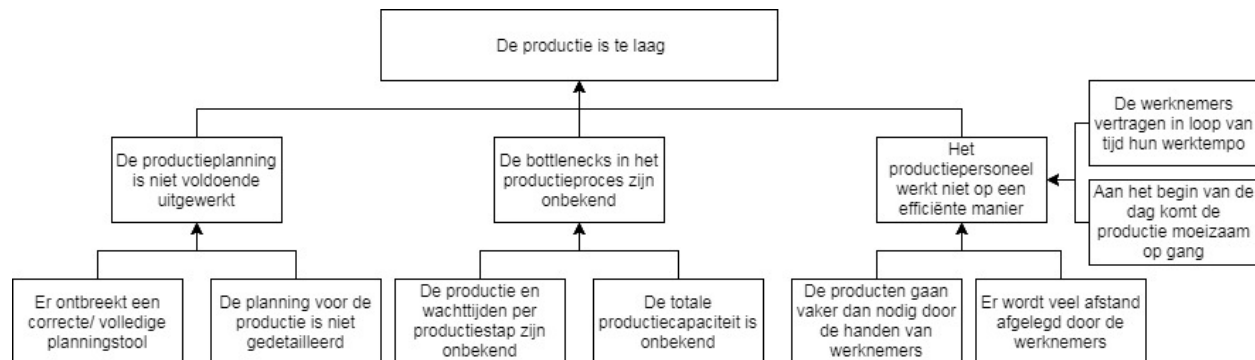
De producten gaan vaker dan nodig door de handen van werknemers

Het valt op dat één enkel product erg vaak op verschillende plekken in het proces moet worden verplaatst of worden behandeld. Overbodige handelingen in een productie zijn tijdrovend en niet gewenst, daarnaast zijn de producten breekbaar en kunnen door aanraking stuk gaan.

Er wordt veel afstand afgelegd door de werknemers om producten te verplaatsen

De producten worden door de werknemers na afloop van een productiestap opgetild en verplaatst naar de plek van de volgende productiestap. Dit kost veel tijd.

Nu de problemen op basis van observatie en gesprekken in kaart zijn gebracht is het volgens 'Geen Probleem' goed om de oorzaken en gevolgen tussen de problemen weer te geven. Dit is gedaan door de problemen weer te geven in een probleemkluwen (zie Figuur 1).



Figuur 1 - Probleemkluwen

Op dit moment heeft het management van Demcon het idee dat er meer geproduceerd kan worden, maar dat er te weinig informatie is om tot een oplossing te komen. Het kernprobleem is dat de productie te laag is en daar zal het onderzoek over gaan. De laatste stap van 'Geen Probleem' is het meetbaar maken van het probleem. Het meetbaar maken is alleen mogelijk met gegevens over de productie, die in dit stadium nog niet beschikbaar zijn en daarom zal deze stap worden overgeslagen.

1.4 Onderzoeksdoel

Dit onderzoek staat in dienst van het verhogen van de productie van het MIM proces. Daarom is het doel van dit onderzoek om de informatie te verzamelen op grond waarvan de bottlenecks in het productieproces kunnen worden geïdentificeerd, alsmede bepaald kan worden in welke mate deze bottlenecks optimalisatie van het productieproces in de weg staan.

Een complicatie die zich hierbij voordoet is dat het wegnemen van de ene bottleneck, per definitie een nieuwe bottleneck doet ontstaan. Daarom vereist een algemeen onderzoek naar de optimalisatie van een productieproces het opstellen van een bottleneck matrix, die inzichtelijk maakt hoe een keten van steeds nieuwe bottlenecks ontstaat door het wegnemen van oude bottlenecks. Dit proces eindigt met het bepalen van 'absolute bottlenecks': bottlenecks die alleen kunnen worden weggenomen door inspanningen die niet meer worden gedekt door opbrengsten (gegeven algemene randvoorwaarden, zoals de stand van de technologie).

1.5 Stakeholders

In dit onderzoek zijn, naast de auteur, meerdere mensen betrokken:

- *Management*
Het management bestaat uit vier personen die samen de productie leiden en ondersteunen. Het draaien van de productie bestaat voornamelijk uit contact onderhouden met (potentiële) klanten, het ontwerpen van matrijzen en het aansturen van het personeel. Voor het onderzoek vormen ze een bruikbare bron van kennis over het proces.
- *Productiepersoneel*
Het productiepersoneel is een groep van uitzendkrachten die samen alle arbeidsbehoevende taken in de MIM productie uitvoeren. De groep bestaat momenteel uit vier tot zes personen. Het productiepersoneel is te benaderen voor vragen over de dagelijkse gang van zaken in de productie. Eventuele veranderingen in het proces zullen ook met hen worden afgestemd.

1.6 Hoofdvraag en onderzoeksvragen

1.6.1 Hoofdvraag

Demcon ziet graag dat het productieproces in kaart wordt gebracht en dat er wordt bepaald waar in de productie de bottleneck zit. Zoals al bij het onderzoeksdoel beschreven, moet er dan strategie worden bedacht hoe de bottleneck(s) worden opgelost. Op basis hiervan is de volgende onderzoeksvraag opgesteld:

'Waar in het MIM proces ontstaan bottlenecks naarmate de productie stijgt en hoe kunnen deze worden weggenomen?'

1.6.2 Deelvragen

De hoofdvraag is niet in één keer te beantwoorden, hiervoor missen gegevens en kennis. Om dit behapbaar te maken zijn er vijf deelvragen opgesteld, met elk sub-deelvragen. Uiteindelijk vormen zij samen een antwoord op de hoofdvraag. Achter elke deelvraag staat de paragraaf weergegeven waarin de vraag wordt beantwoord.

1. *Hoe ziet de huidige situatie bij Demcon MIM eruit?*.....\$2
 De eerste deelvraag is gesteld om er achter te komen hoe de productie er op dit moment uit ziet. Er wordt hierbij een nul meting gedaan, wat een belangrijke basis is om het proces te kunnen verbeteren. Deze deelvraag wordt opgedeeld in drie sub-onderdelen: de globale stappen, de tijd per stap en de vraag vanuit de klant. Samen geeft dit een volledig beeld van de huidige productie. Per onderdeel is de vraag als volgt geformuleerd:
 - *Hoe zien de productiestappen in het MIM proces eruit?*\$2.1
 - *Wat is de hoeveelheid tijd die er per productiestap in een product wordt gestoken?*.....\$2.4
 - *Hoe groot is de vraag vanuit de klant naar het product?*.....\$2.4

2. *Welke kennis uit de literatuur kan bijdragen aan dit onderzoek en de situatie van MIM?*\$3
 Op het gebied van procesverbetering is veel literatuur te vinden. Er zal worden onderzocht welke literatuur geschikt is voor de specifieke situatie van dit onderzoek. Geschikte literatuur draagt bij aan het onderzoek door achtergrond informatie te verschaffen of methodes te bieden waarmee oplossingen kunnen worden bedacht.

3. *Hoe kan het proces worden weergegeven in een model?*\$4
 Om tot een antwoord op de hoofdvraag te kunnen komen moet er worden gerekend aan de productie. Dit gebeurt in een zogenoemd model. Later in het onderzoek zal duidelijk worden hoe een model eruit ziet en wat de mogelijkheden ervan zijn. Uitleg van het model vindt later plaats omdat hiervoor meer achtergrond informatie nodig is. De vragen die dan worden beantwoord zijn:
 - *Wat is het doel van het model?*.....\$4.1
 - *Wat zijn de in- en output variabelen van het model?*\$4.1
 - *Welke onderdelen van de productie worden meegenomen in het model?*.....\$4.1

4. *Wat is de huidige capaciteit en waar ontstaat de bottleneck in het MIM proces?*\$5.1
 Met behulp van de kennis uit de huidige productie, de literatuur en met model kan de bottleneck in het systeem worden bepaald. Hiervoor wordt eerst de maximale productiecapaciteit bepaald en gekeken welk percentage wordt benut. Vervolgens wordt de bottleneck van de huidige productie vastgesteld.
 - *Wat is de maximale productiecapaciteit van het productieproces en welk percentage wordt momenteel benut?*.....\$5.2
 - *Wat is de bottleneck van de huidige productie?*\$5.2

5. *Hoe kunnen de stappen waar bottlenecks ontstaan in het MIM proces worden geoptimaliseerd?*\$5.3 - \$5.6
 Als een bottleneck is gevonden zal er een manier worden gezocht om deze weg te nemen om de productie te verhogen. Ontstaat er dan een nieuwe bottleneck dan zal hetzelfde worden gedaan.

2 Het huidige productieproces: Metal Injection Molding

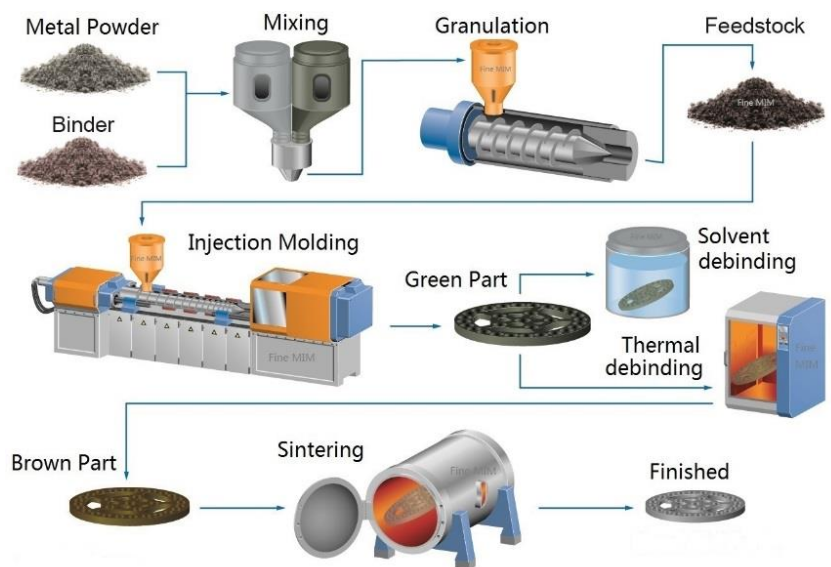
In hoofdstuk 2 zal het productieproces worden beschreven en daarnaast zal de huidige status van de productie worden bekeken aan de hand van verkregen en verzamelde data. De volgende vragen zullen in dit hoofdstuk worden beantwoord:

- Hoe zien de productiestappen in het MIM proces eruit?
- Wat is de hoeveelheid tijd die er per productiestap in het product wordt gestoken?
- Hoe groot is de vraag vanuit de klant naar het product?

2.1 Productiestappen

Metal Injection Molding (MIM) is een proces waarbij metaal wordt spuitgegoten tot kleine metalen voorwerpen. Metaal spuitgieten op basis van louter metaal werkt niet goed, omdat metaal pas bij erg hoge temperaturen vloeibaar wordt. Hier is iets op gevonden: door metaalpoeder te mengen met kunststof is de benodigde temperatuur lager en kan het spuitgieten gemakkelijk gebeuren. Vervolgens moet de kunststof wel weer uit het product worden gehaald. Het volledige proces gebeurt op de volgende manier:

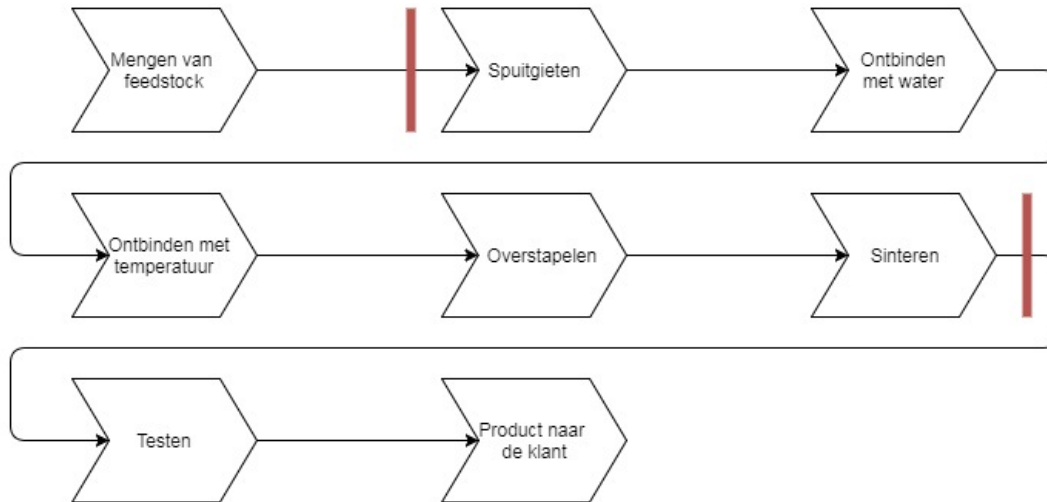
1. Metaalpoeder wordt gemengd met kunststof, dit mengsel wordt vermalen tot korrels. Het tussenproduct wordt 'feedstock' genoemd. (Figuur 2: 'Mixing' & 'Granulation')
2. De korrels worden verwarmd en in een matrijs gespoten. De matrijs is verschillend voor elk product en wordt al eerder ontwikkeld. De tussenproducten worden op platen gelegd, zodat ze gemakkelijk verplaatst kunnen worden. Het tussenproduct wordt 'groenling' genoemd. (Bijlage A: Foto 3, Figuur 2: 'Injection Molding')
3. Het eerste deel van de kunststof wordt verwijderd door het tussenproduct te spoelen met water. (Bijlage A: Foto 4, Figuur 2: 'Solvent debinding')
4. De resterende kunststof wordt verwijderd door het product te verwarmen tot de smelttemperatuur van kunststof (lager dan het smeltpunt van metaal). Het tussenproduct wordt 'bruinling' genoemd. (Bijlage A: Foto 5, Figuur 2: 'Thermal debinding')
5. De producten worden overgestapeld op hitte bestendige platen. (Bijlage A: Foto 6)
6. Het brosse metalen onderdeel wordt verwarmd tot nét onder de smelttemperatuur van metaal. Het metaal smelt aan elkaar (krimpt) tot een solide stuk metaal. (Bijlage A: Foto 7, Figuur 2: 'Sintering')
7. Het onderdeel wordt gecontroleerd op de eisen van de klant met betrekking tot de afmetingen en/of eigenschappen van het materiaal.



Figuur 2 - Productiestappen Metal Injection Molding

2.2 Bereik van de productiestappen

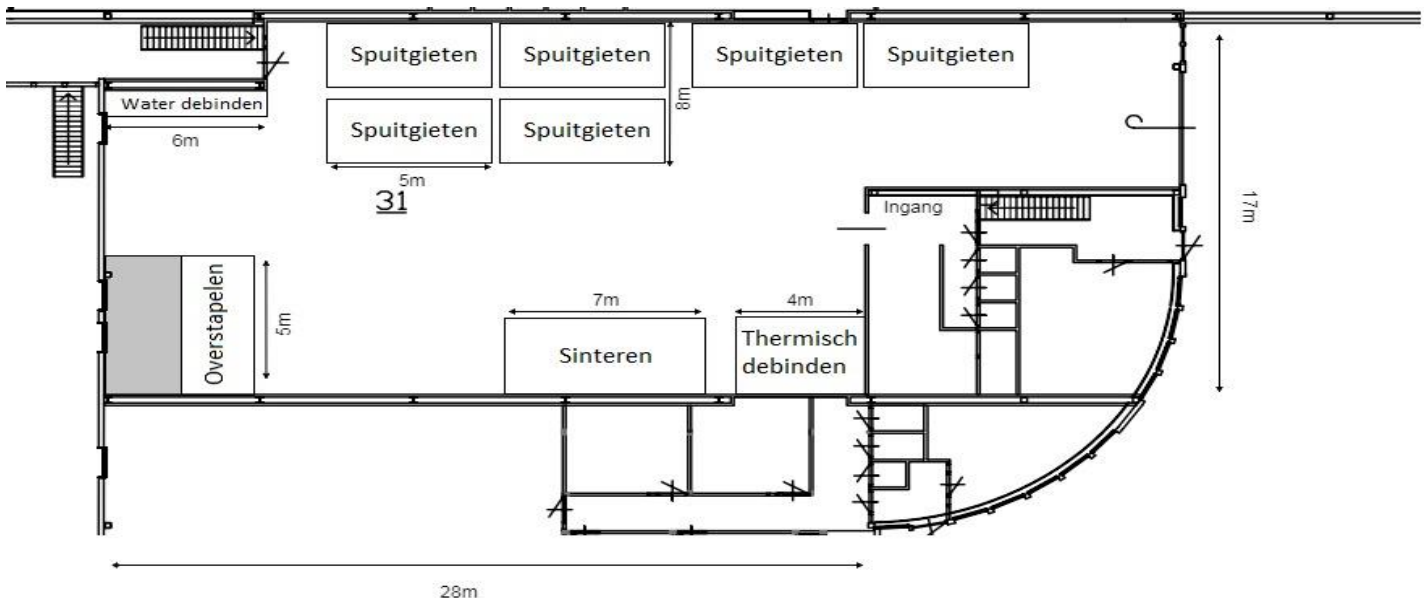
In dit onderzoek zullen niet alle stappen van het productie proces worden onderzocht. De eerste stap 'mengen' en de laatste stap 'testen' worden in de nabije toekomst uitbesteed aan een derde partij. Vooruitlopend hierop worden deze stappen buiten beschouwing gelaten. In Figuur 3 staan de productiestappen in een stroomdiagram met de afbakening van het bereik.



Figuur 3 - Stroomdiagram van het proces

2.3 Indeling van de productie

Om een beeld te geven van de indeling van de productiehal is een schets gemaakt van het bovenaanzicht (zie Figuur 4). In bijlage A is de productiehal beter in beeld gebracht, het bekijken van deze foto's geeft een idee van de omvang van de productiehal. In bijlage B staan de loopafstanden tussen de productiestappen gegeven.



Figuur 4 - Bovenaanzicht productiehal

2.4 Gegevens over de productie

Om dit onderzoek te kunnen doen, zijn er gegevens nodig met betrekking tot de capaciteit. Deze gegevens en de beste manier om ze te bemachtigen zijn niet aanwezig. In paragraaf 2.4 worden beide in samenhang ontwikkeld. Er wordt een methode ontwikkeld om deze gegevens te verzamelen en vervolgens worden de kerngegevens met deze methode bepaald.

2.4.1 Productiestap: Spuitgieten

De eerste stap die wordt bekeken is het spuitgieten van de producten. Er zijn zes spuitgietmachines aanwezig in de productiehal. Spuitgieten is een complexe stap om te beschrijven, omdat er meerdere soorten producten worden gemaakt met elk een verschillende bewerkingstijd. Deze bewerkingstijd verschilt door meerdere factoren:

- Gewicht: een product met meer gewicht bevat meer metaal. De machines staan ingesteld op een bepaalde inspuitsnelheid van massa per seconde, dus een product met een grotere massa heeft meer tijd nodig.
- Vorm: hoe complexer de vorm, hoe lastiger het is om een product uit de matrijs te halen na het spuitgieten.
- Kwaliteit matrijs: de kwaliteit van de matrijs maakt uit voor het percentage succesvol spuitgegoten producten. Bij een hogere kwaliteit zal het minder tijd kosten om hetzelfde aantal producten te produceren.

Als een product uit de spuitgietmachine komt wordt het door een werknemer geïnspecteerd, eventueel bijgewerkt en op een plaat gelegd. Om deze reden moet er altijd een werknemer bij de machine zitten. De bewerkingstijd van de werknemer is echter korter dan de spuittijd van de machine, dus de bewerkingstijd van de werknemer hoeft niet te worden berekend.

2.4.1.1 Uitdrukken in aantal of gewicht?

Om diverse redenen verschilt het per week hoeveel er van een product wordt gemaakt. Vanwege genoemde factoren is het weinigzeggend om de productie uit te drukken in het aantal gemaakte producten. Er moet daarom worden gezocht naar een goede manier om de capaciteit van de productie in uit te drukken.

Om dit te vinden wordt er gekeken naar een aantal productieweken in 2017 waarvan het geproduceerd aantal producten goed is bijgehouden (zie bijlage C). In de tabellen wordt onderscheid gemaakt in het tussenproduct 'groen' dat alleen nog maar is spuitgegoten en het eindproduct 'gereed' wat alle stappen heeft doorlopen. De gegevens van de productieweken zijn weergegeven in Grafiek 1 en Grafiek 2.

Grafieken weggelaten wegens geheimhouding.

Het eerste wat opvalt is dat het aantal producten dat wordt geproduceerd in een week uiteen loopt. Dit kan als oorzaak hebben dat er die week minder machines hebben gedraaid, maar wat ook mee speelt is dat kleinere producten sneller worden geproduceerd dan grotere producten. Dit is duidelijker te zien als de twee grafieken worden gecombineerd (Zie Grafiek 3). Hierdoor liggen de uitersten voor gewicht dichter bij elkaar dan de uitersten voor de produceerde aantallen (er is minder spreiding op de y-as). Om deze reden is er verder onderzoek gedaan naar het verband tussen de productietijd en het gewicht van een product.

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Grafiek 3 - Aantal producten en gewicht van producten (periode van week 14 tm 17 2017)

De huidige productieplanning wordt gebaseerd op historische data van spuitgegoten producten. De werknemers vullen hun dagproductie in op een logboek en het management gebruikt deze gegevens om de bewerkingstijd van de producten bij te werken. Als deze waardes voor de bewerkingstijd van de producten tegen hun gewicht worden uitgezet wordt er een trend zichtbaar. De grafiek met het spreidingsdiagram is te zien in Grafiek 4.

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Grafiek 4 - Spreidingsdiagram spuittijd tegen gewicht per product (data uit productieplanning)

Naast dat er op het oog een verband lijkt kan dit verband worden aangetoond door middel van een statistische F-toets.

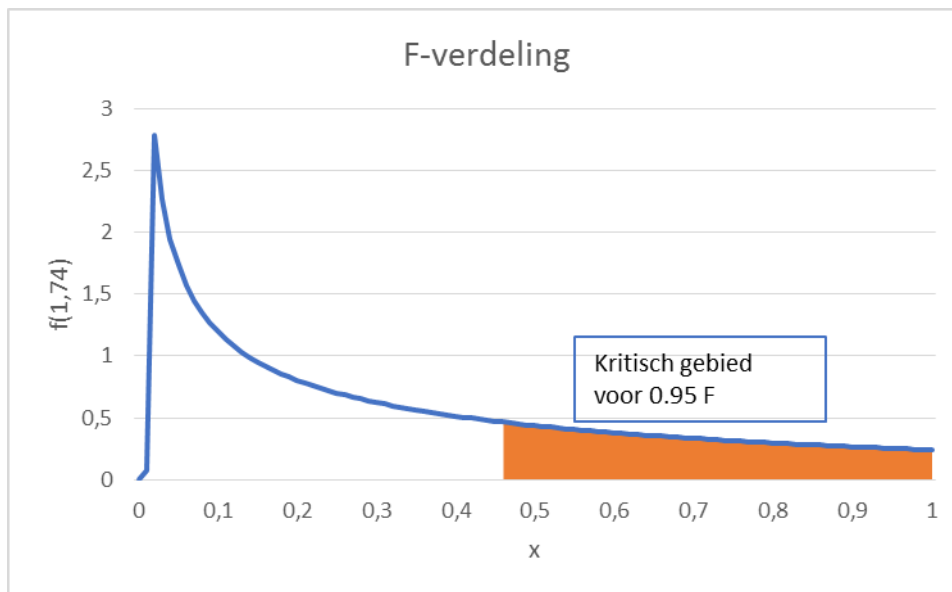
1. Het regressiemodel krijgt de volgende vorm: $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$ met onafhankelijke storingen ε die $N(0, \sigma^2)$ -verdeeld zijn. Y is hierin de spuittijd en X het gewicht.
2. $H_0: \beta_1 = 0$ wordt getoetst tegen $H_1: \beta_1 \neq 0$
3. H_0 wordt verworpen als $F_0(\text{berekende } F) \geq F_c(\text{tabelwaarde } F)$ met een significantie van $\alpha = 5\%$. F_0 wordt berekend met $F_0 = \frac{SS_1 / df_1}{SS_2 / df_2}$ en F_c wordt op basis van de vrijheidsgraden en de significantie bepaald uit de F-verdeling (zie Grafiek 5).
4. Met behulp van MS Excel wordt een Anova analyse uitgevoerd.
5. F_0 heeft een hogere waarde dan F_c , dus H_0 wordt verworpen.
6. We achten bewezen, bij een significantieniveau van 5%, dat er een verband bestaat tussen de variabelen gewicht en spuitgietsijd.

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Column 1	38	565,488	14,88126	131,6343
Column 2	38	1654,704	43,54484	1007,949

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	15610,41	1	15610,41	27,39669	1,49E-06	0,459439
Within Groups	42164,59	74	569,7918			
Total	57775	75				



Grafiek 5 - F-verdeling met kritisch gebied

Deze analyse toont aan dat er een verband bestaat tussen het gewicht en de spuitgietsijd van de producten. Dit betekent dat er op basis van het gewicht van een product kan worden bepaald wat de bijbehorende spuitijd is.

2.4.1.2 Zelf opmeten van productietijden

De vorige berekening van de spuitgietsijd heeft een nadeel. De bewerkingstijd kan vervuild zijn door allerlei ruisfactoren zoals het kapotgaan van de machine, het bijvullen van feedstock, het wegbrengen van producten en mogelijke ineffectiviteit van de werknemers die allemaal in onbekende mate invloed hebben. Daarom wordt de spuitgietsijd in een apart onderzoek nog eens zelf opgemeten om te zien wat het effect is op de conclusies als wordt geprobeerd de ruisfactoren buiten te sluiten.

Bij het verzamelen van nieuwe data zal er worden gelet op drie onderdelen: geldigheid, betrouwbaarheid en uitvoerbaarheid. Volgens Cooper en Schindler (2014) zijn precies deze zaken van belang. Als de data niet geldig en betrouwbaar is, neemt de kwaliteit van het onderzoek af. De uitvoerbaarheid is belangrijk in de gaten te houden om de metingen in de toekomst te kunnen herhalen. Cooper en Schindler (2014) beschrijven de begrippen als volgt:

- *Geldigheid*: voldoet de meting aan dat wat we daadwerkelijk wilde meten?
- *Betrouwbaarheid*: Een meting is betrouwbaar als het consistente resultaten laat zien. Dit houdt in dat een meting op verschillende momenten van meten in tijd, dezelfde resultaten laat zien.
- *Uitvoerbaarheid*: Op verschillende vlakken moet de wetenschappelijke kwaliteit worden afgewogen tegen praktische zaken. De mate van uitvoerbaarheid hangt van de volgende aspecten.
 - Financieel: data verzamelen kost tijd en daarmee geld.
 - Gemak: de verzamelde data moet te verwerken zijn
 - Interpreteerbaar: niet alleen de makers van de meting moeten de resultaten kunnen aflezen, maar ook andere onderzoekers.

De spuitgiettijd van enkele producten (A t/m F) is op verschillende dagen over een periode van enkele weken verzameld (zie bijlage D). De metingen laten een consistente lijn zien (zie Grafiek 6). De minimale steekproefgrote kan worden berekend met formule 1.

$$n \geq \frac{z^2}{e^2} * \left(\frac{s}{\mu}\right)^2 \quad (1)$$

Waarbij n = steekproefgrootte, z = z-waarde voor betrouwbaarheid, e = foutmarge, s = standaardafwijking en μ = gemiddelde. Voor een 95% betrouwbaarheid en een nauwkeurigheidsmarge van plus of min 5% zijn de waardes voor z en e respectievelijk 1.96 en 0.05 (geaccepteerde percentages voor onderzoek). De minimale steekproefgrotes voor de producten zijn weergegeven in Tabel 1. De standaardafwijking en gemiddeldes worden later in het verslag benoemd.

Product	AK	AA	AD	AO	X	E
n	XX	XX	XX	XX	XX	XX
Werkelijk	XX	XX	XX	XX	XX	XX

Tabel 1 – Minimale en werkelijke steekproefgrootte per product (vertaling letters naar productnamen achterin bijlage D)

Zoals in Tabel 1 te zien liggen de steekproefgrotes allemaal ruim boven het minimum, behalve voor product B. Voor dit product is de betrouwbaarheid dus lager. Als extra toets is overleg gevoerd met de managers. Hen lijken de metingen betrouwbaar en de uitkomsten interpreteerbaar. Het meten en verwerken nam redelijk wat tijd in beslag, maar is zeker te herhalen. Op basis van bovenstaande bevindingen is de meting geldig, betrouwbaar en uitvoerbaar bevonden.

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Grafiek 6 - Gemeten data spuitgiettijden

2.4.1.3 Bepaling van kansverdeling spuitgiettijden

In deze paragraaf wordt er gekeken of er een theoretische kansverdeling bij de gemeten spuitgiettijden past. De gemeten spuittijd van het product E wordt uitgezet tegen een normaalverdeling, exponentiële verdeling en een weibull-verdeling in een *Probability Plot* (zie bijlage E). Hoe dichter de datapunten van spuitgiettijden bij de rechte lijn van de verdeling liggen, hoe groter de kans is dat het deze verdeling volgt. In de grafiek met de normaalverdeling liggen de datapunten het dichtst bij de verdelingslijn. De producten E en AO worden ook uitgezet tegen een normaalverdeling (zie bijlage E). Er blijkt dat bij deze producten de datapunten van de spuitgiettijden en de verdelingslijn ook redelijk samenvallen. Er kan met zekerheid worden gesteld dat er een normaalverdeling wordt gevolgt als de P waarde (in de legenda van de grafiek) boven de 0.05 uit komt. Dit is niet het geval, maar dit is ook niet te verwachten met een dergelijke hoeveelheid data. Doordat de datapunten van de producten de normaalverdeling benaderen, wordt er in dit onderzoek aangenomen dat de spuitgiettijden een normaalverdeling volgen.

Voor een normaalverdeling zijn het gemiddelde en de standaard afwijking nodig. De formules voor de het gemiddelde en de standaard afwijking staan weergegeven in formules 2 en 3 en de uitkomsten per product staan in Tabel 2.

$$\text{Gemiddelde:} \quad \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

$$\text{Standaard afwijking:} \quad \sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (3)$$

Product	AK	AA	AD	AO	X	E
μ	XX	XX	XX	XX	XX	XX
σ	XX	XX	XX	XX	XX	XX

Tabel 2 - Gemiddeldes en standaardafwijkingen gemeten producten (vertaling letters naar productnamen achterin bijlage D)

In een periode van enkele weken worden niet alle producten gemaakt, dus als zodanig is de hoeveelheid data te beperkt om er statistisch met een hoge betrouwbaarheid verbanden uit af te kunnen leiden. Nemen we echter de conclusies van de vorige meting mee en nemen we aan dat er een verband is tussen gewicht en bewerkingstijd (aangetoond in paragraaf 2.4.1.1), kan er een nieuwe trend worden bepaald (zie Grafiek 7). De trendlijn wordt bepaald op basis van de gemiddelde spuittijd per product, berekend met formule 2.

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Grafiek 7 - Spreidingsdiagram spuittijd tegen gewicht per product (data uit metingen)

De lineaire formule waarmee de spuittijd per gewicht kan worden geschat is weergegeven in formule 4. Hiermee is voor elk product de spuittijd berekend en weergegeven in bijlage F.

$$\text{Geschatte gemiddelde spuittijd} = (XX * \text{gewicht}) + XX \quad (4)$$

De standaard afwijking voor de spuittijd is te schatten door de afstanden tussen de datapunten en trendlijn te bekijken en komt uit op XX seconden.

2.4.1.4 Gewogen gemiddelde op basis van vraag

Nu een duidelijk verband is geconstrueerd tussen spuittijd en gewicht kan er worden gedacht om de productie per tijdeenheid aan te duiden in gewicht in plaats van in aantal producten. Als de productie namelijk wordt aangeduid in aantal producten, dan moet telkens rekening worden gehouden met het soort product. Deze complicatie raken we kwijt door met gewicht per seconde te gaan werken. De vraag is dus: als de productie wordt aangeduid in aantal kilo, wat is dan de productietijd per tijdeenheid?

Die vraag kan worden beantwoord door te kijken naar de vraag van het product. Op dit moment kan de fabriek de vraag aan, dus de vraag kan gelijk worden gesteld aan de geproduceerde hoeveelheid producten. De vraag in het jaar 2017 staat weergegeven in Grafiek 8, gerangschikt op hoeveelheid.

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Grafiek 8 - Aantal producten verkocht in 2017 (vertaling letters naar productnamen achterin bijlage D)

Op basis van de verdeling van de vraag kan het gewogen gemiddelde van het gewicht worden berekend. Dit gebeurt met formule 5 (zie bijlage F voor gewichten en fracties).

$$\text{Gewogen gemiddeld gewicht} = \sum_{i=1}^{i=n} \text{gewicht}(i) * \text{vraagfractie}(i) = XX \text{ gram} \quad (5)$$

Een kilo product bestaat dus gemiddeld uit $1000 \text{ (gram)} / XX \text{ (gram per product)} = XX$ producten. Dit gemiddelde gewicht heeft een spuittijd die kan worden berekend met de eerder opgestelde lineaire functie (zie formule 6).

$$\text{Spuittijd} = (XX * XX) + XX = XX \text{ seconden} \quad (6)$$

Hiermee komt de spuittijd voor een kilo product op XX seconden. De methode die hier is gebruikt voor de spuitgietspuittijd kan in de andere stappen in de productie ook worden toegepast.

2.4.1.5 Feedstock bijvullen

Het mengsel van metaal en kunststof waarvan de producten worden gemaakt wordt feedstock genoemd. De nieuwe feedstock voor het spuitgieten moet handmatig worden bijgevuld. Per keer kan er 15 kilo feedstock in de machine, hiervan wordt 50% product en 50% restproduct. Het restproduct kan worden hergebruikt door het te vermalen en terug in de machine te doen. Er gaan gemiddeld $7500 / 9.3 = 806$ producten in 7.5 kilo (50% van 15 kilo), dus elke 806 producten wordt er bijgevuld. Uit gesprekken met het productiepersoneel is af te leiden dat de benodigde tijd voor het bijvullen afhangt van de te recylen hoeveelheid product, maar dat het gemiddeld genomen 5 minuten duurt met een uitwijking naar de 4 en 6 minuten. Er is gekozen om de bijvultijd te stellen op een normaalverdeling met $\mu = 5$ en $\sigma = 1$ minuten. In Tabel 3 worden alle gegevens van het spuitgieten samengevat.

Spuitgieten	
Aantal machines	6
Productietijd	Norm. Dist. $\mu = XX$ sec, $\sigma = XX$ sec
Bijvultijd	Norm. Dist. $\mu = 5$ min, $\sigma = 1$ min [min: 4, max: 6]

Tabel 3 - Gegevens Spuitgieten

2.4.2 Productiestap: Waterdebinden

Voor de stap waterdebinden zijn vier waterbakken beschikbaar. De producten zijn in de vorige stap (spuitgieten) op platen gelegd en worden per plaat in de waterbakken gedaan. De platen worden 'debinderplaten' genoemd. Het aantal platen per waterbak hangt een klein beetje af van de hoogte van de producten op de plaat en ligt rond de 12 platen. De hoeveelheid producten per debinderplaat hangt sterk af van de grootte en de vorm van het product. Het gewogen gemiddeld aantal producten per plaat kan op dezelfde manier berekend worden als bij de productiestap spuitgieten is gedaan. De berekening hiervoor is weergegeven in formule 7 en de aantallen producten per plaat en vraagfracties zijn weergegeven in bijlage F.

Gewogen gemiddeld producten per debinderplaat =

$$\sum_{i=1}^{i=n} \text{product per plaat}(i) * \text{vraagfractie}(i) = XX \text{ producten per plaat} \quad (7)$$

De platen moeten drie dagen in het water blijven. Het in- en uitladen kost volgens het personeel allebei gemiddeld tussen de 10 en 20 minuten per keer, maar meestal rond de 15 minuten. In een steekproef deed een werknemer er 16 minuten over, dus dat leek te kloppen. Een verdeling waarbij een gemiddelde het vaakst voorkomt en de afstand tot het gemiddelde een maat is voor de verkleining van de kans is de normaalverdeling. Dit kan echter niet worden bewezen, maar wordt aangenomen op basis van de gelijkens. De arbeidstijd van de waterbakken is gesteld op een normaalverdeling met $\mu = 15$ minuten, $\sigma = 5$ minuten en de uitersten zijn 10 en 20 minuten. In Tabel worden alle gegevens van de waterdebinder stap samengevat.

Water debinden	
Aantal machines	4
Productietijd	3 dagen
Platen per machine	12
Producten per plaat	494
In- en uitlaad tijd	Norm. Dist. μ = XX min, σ = XX min [min: XX, max: XX]

Tabel 4 - Gegevens Water Debinden

2.4.3 Productiestap: Thermisch debinden

Voor de productiestap thermisch debinden is één machine beschikbaar. De stap lijkt wat betreft procestijden erg op de productiestap waterdebinden. De platen zijn hetzelfde, dus er passen ook evenveel producten op per plaat. De in- en uitlaad tijden van de producten is ook hetzelfde als bij waterdebinden. Alleen het aantal platen dat tegelijkertijd in de machine kan en de productietijd zijn anders, respectievelijk 24 platen en 15 uur. In Tabel 4 worden alle gegevens van de thermisch debindenstep samengevat.

Thermisch debinden	
Aantal machines	1
Productietijd	XX uur
Platen per machine	XX
Producten per plaat	XX
In- en uitlaad tijd	Norm. Dist. μ = XX min, σ = XX min [min: XX, max: XX]

Tabel 4 - Gegevens Thermisch Debinden

2.4.4 Productiestap: Overstapelen

Het overstapelen van de producten is een stap die nodig is, omdat de debinderplaten niet bestendig zijn tegen de hitte van de sinteroven. De producten worden overgestapeld op platen van een bepaald hitte bestendig materiaal ('sinterplaten'). Deze zijn qua oppervlak ongeveer drie kwart van de debinderplaten. Het overstapelen gebeurt op tafels waarbij plek is voor vier werknemers. De tijd nodig voor het overstapelen hangt af van de omstandigheid of de producten bij het spuitgieten al op keramische plaatjes zijn gelegd. Als dat zo is, dan kan een sinterplaat van negen plaatjes volgens de werknemers in ongeveer 3 minuten gevuld worden. Als de producten nog op keramische plaatjes moeten worden gelegd dan kost het volgens de medewerkers iets meer dan 20 minuten per plaat van 180 producten. De reden dat het bij de eerste optie per plaat gaat is dat het niet uit maakt hoeveel producten er op een keramisch plaatje liggen, de tijd om een keramisch plaatje te verplaatsen blijft gelijk en er gaan altijd negen keramische plaatjes op een sinterplaat. De overstapeltijd per product kan bij deze omstandigheid worden berekend door de overstapeltijd per plaatje te delen door het aantal producten per plaatje.

De tijden zoals aangegeven door de werknemers zijn geverifieerd door steekproefsgewijs een eigen meting te doen. Vastgesteld is dat het overstapelen van een plaat met 180 producten in totaal 22.5 minuten duurde. De snelheid van handelen bleek daarbij constant. Vanwege deze constante snelheid kan er gesteld worden dat het overstapelen gemiddeld 7.5 seconde per product kost met een afwijking van 0.1 seconde.



Foto 1 - Producten op debinderplaat

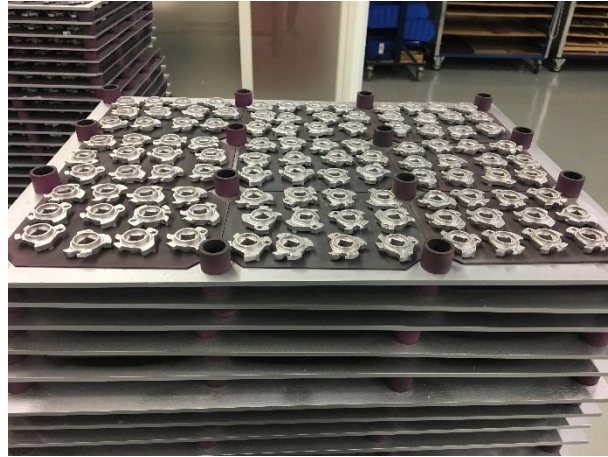


Foto 2 - Producten op sinterplaat en keramische plaatjes

Het verschilt per product of de producten al op een keramisch plaatje liggen. De reden hiervoor is dat de producten die niet op een keramisch plaatje liggen naast het plaatje meer keramiek nodig hebben om van elkaar te scheiden. Keramiek is een duur materiaal, dus daarom wordt dat pas bij het overstapelen toegevoegd. De gegevens over welke producten al eerder op een keramisch plaatje worden gelegd en wat daardoor de overtapeltijd is, staan in bijlage F. Van deze waardes is het gewogen gemiddelde berekend in formule 8.

Gewogen gemiddelde overstapeltijd =

$$\sum_{i=1}^{i=n} \text{overstapeltijd}(i) * \text{vraagfractie}(i) = 5.18 \text{ seconde} \quad (8)$$

Overstapelen	
Aantal machines	4 plekken
Productietijd	Norm. Dist. $\mu = 5.18 \text{ sec}$, $\sigma = 0.1 \text{ sec}$

Tabel 5 - Gegevens Overstapelen

2.4.5 Productiestap: Sinteren

Bij de productiestap sinteren wordt de brosse metaalstructuur ineen gesmolten in een oven. Er zijn twee ovens beschikbaar met beide plek voor 30 sinterplaten. De sinterplaten zijn kleiner dan de debinderplaten, waardoor er minder producten op passen. Het aantal producten per plaat is gegeven in bijlage F. Als het gewogen gemiddelde wordt genomen op basis van de vraagfractie kan het aantal producten per plaat worden berekend, zie formule 9. Het inladen van de ovens duurt tussen de 25 en 35 minuten met een gemiddelde van 30 minuten, het uitladen van de ovens duurt tussen de 15 en 25 minuten met een gemiddelde van 20 minuten en de productietijd van de oven is constant 24 uur.

Gewogen gemiddeld producten per sinterplaat =

$$\sum_{i=1}^{i=n} \text{product per plaat}(i) * \text{vraagfractie}(i) = 265 \text{ producten per plaat} \quad (9)$$

Sinteren	
Aantal machines	2
Productietijd	XX uur
Platen per machine	XX
Producten per plaat	XX
Inlaad tijd	Norm. Dist. $\mu = 30$ min, $\sigma = 5$ min [min: 25, max: 35]
Uitlaad tijd	Norm. Dist. $\mu = 20$ min, $\sigma = 5$ min [min: 15, max: 25]

Tabel 6 - Gegevens Sinteren

3 Theoretisch kader

In hoofdstuk 3 wordt uitgelegd binnen welk theoretisch kader het onderzoek naar mogelijkheden tot productieverhoging zal worden uitgevoerd. Dit theoretisch kader zal ook worden verantwoord. Het theoretisch kader wordt ontleend aan de literatuur. De onderwerpen die worden behandeld worden zijn bottleneck, capaciteit, kritieke prestatie indicatoren, simulatie en optimalisatie van het arbeidsproces. In dit hoofdstuk zal de vraag worden beantwoord:

- *Welke kennis uit de literatuur kan bijdragen aan dit onderzoek en de situatie van MIM?*

3.1 Bottleneck

Wat is een bottleneck?

In de hoofdvraag zit het begrip *bottleneck* verwerkt, dus het is goed om dit begrip duidelijk te hebben. Slack (2013) beschrijft bottleneck op de volgende manier: ‘the capacity-constraining stage in a process; it governs the output of the whole process’. De bottleneck is dus capaciteit bepalende stap in een productieproces, in negatieve zin. Het is de stap in een proces die de minste producten kan verwerken. Dat een bottleneck bij een bepaalde stap ontstaat, kan verschillende oorzaken hebben. Bijvoorbeeld: de machine heeft niet genoeg capaciteit, gaat vaak kapot of de productiemedewerkers hebben betere training nodig.

Hoe is een bottleneck te herkennen? (Markgraf, 2017)

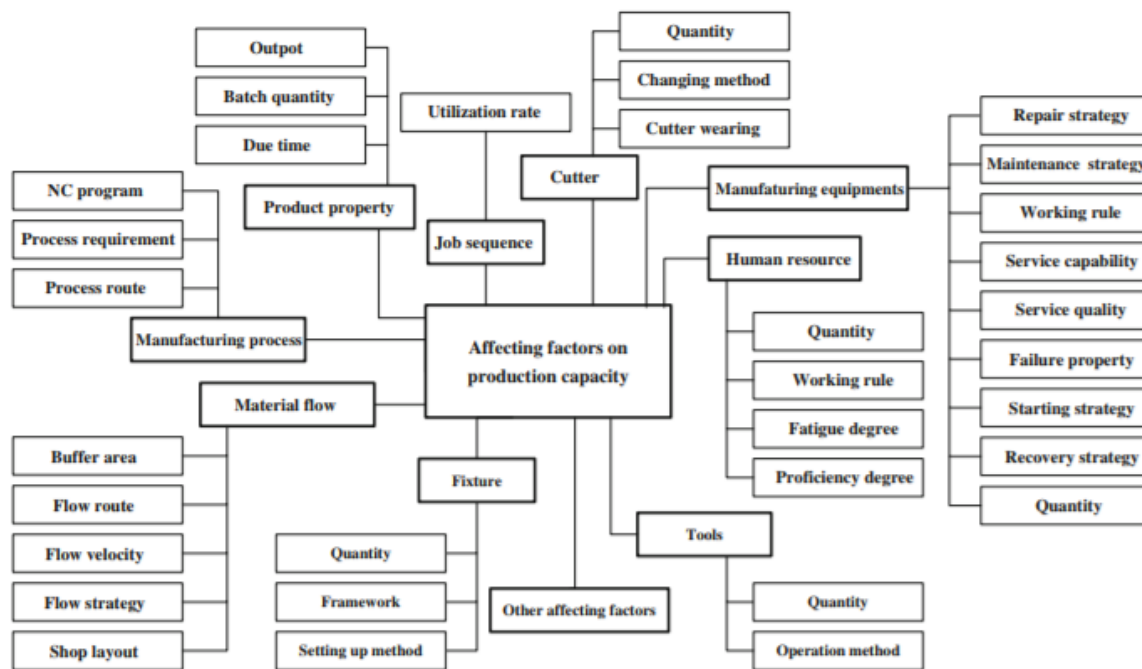
- Ophoping van rijen
De productiestap waarbij de langste rij ontstaat, is vaak de bottleneck. Dit is vooral duidelijk te zien bij een productielijn met een enkele stroom aan producten waarbij de productiestappen onafhankelijk van elkaar werken, zoals in de MIM productie.
- Doorstroom
De doorstroom van een productielijn staat in direct verband met de output van de bottleneck. Als de doorstroom per productiestap wordt verhoogd, zal de stap met het grootste effect op de totale doorstroom de bottleneck zijn.
- Capaciteit
Elke machine heeft een maximale capaciteit en werkt op een bepaald percentage van die capaciteit. Het geheel van machines die samen een stap vormen dat op het hoogste percentage van haar totale capaciteit werkt is de bottleneck.
- Wachttijden
De bottleneck kan ook herkend worden door de wachttijden (wachten op nieuw product) van productiestappen te bekijken. Als alle wachttijden worden bekeken is de productiestap vóór (terug in het proces) de stap met de hoogste wachttijden de bottleneck. Deze stap houdt dan de productie op en de stap erna kan dan niet continu werken.

3.2 Productiecapaciteit

Wat is productiecapaciteit?

In deelvraag 4 wordt er gekeken naar de *benutting van de totale productiecapaciteit* van de MIM productie. Dit vergt een beschrijving van het begrip capaciteit. Bing Chen c.s. geeft een duidelijke definitie van capaciteit: 'Production capacity is defined as the maximum output of production line with all the manufacturing materials in a certain period.' (Bing Chen, Ting Yang, Kai Liu and Shan Li, 2013) De productiecapaciteit is de hoeveelheid die kan worden geproduceerd in een bepaalde tijd als al het beschikbare materiaal wordt ingezet.

De productiecapaciteit wordt beïnvloed door veel verschillende factoren. Bing Chen (2013) heeft de factoren geïnventariseerd die van invloed zijn op de capaciteit (Figuur 5). De theorie van Chen is bruikbaar voor mijn onderzoek, omdat in het MIM proces de gestelde factoren ook allemaal invloed op de productiecapaciteit (behalve 'cutter' en 'fixture' welke specifiek zijn voor de casus in de bron).



Figuur 5 - Factoren die van invloed zijn op de capaciteit (Bing Chen, Ting Yang, Kai Liu en Shan Li, 2013)

In het overzicht geeft Chen aan dat er nog meer factoren kunnen zijn, door het vakje 'other affecting factors' toe te voegen. In het MIM-proces is het specifiek dat het aantal en soort matrijzen van invloed is op de productiecapaciteit.

Theoretische en daadwerkelijke capaciteit

De capaciteit die door Chen wordt beschreven is de daadwerkelijke capaciteit van een productieproces. Vaak is het zo dat er nog meer geproduceerd zou kunnen worden, onder bepaalde geïdealiseerde aannames, zoals bijvoorbeeld dat de machine minder vaak kapot gaat, werknemers veel meer dan acht uur kunnen werken of oneindig veel geld beschikbaar is voor technische innovatie. In dit onderzoek zien we af van dit soort geïdealiseerde omstandigheden.

In dit onderzoek wordt theoretische capaciteit beschreven als de maximale benutting gegeven randvoorwaarden in termen van beschikbare machines en personeel. De aantallen voor machines en personeel zijn al deels besproken in hoofdstuk 2 en worden verder besproken in hoofdstuk 4.

3.3 Kritieke Prestatie Indicatoren

Wat is een kritieke prestatie indicator?

Zoals besproken in hoofdstuk 1, is het doel van het onderzoek het verbeteren van het productieproces bij Demcon. Om de voorstellen tot verbetering die er worden gedaan te kunnen beoordelen zullen er een aantal specifieke prestatie indicatoren in de gaten worden houden. Een prestatie indicator is een variabele waarvan de waarde voortvloeit uit de productie. De prestatie indicator geeft (dus) informatie over de status van de productie. De set specifieke prestatie indicatoren, die in dit onderzoek relevant is noemt de literatuur Kritieke Prestatie Indicatoren (KPI's). David Boddy beschrijft KPI als volgt: *'Key Performance Indicators are a summarized set of the most important measures of performance that inform managers how well an operation is achieving organizational goals'* (Boddy, 2011). Een KPI is dus een variabele waarvan de waarde voortvloeit uit een proces en kan worden gebruikt om de prestatie van een proces te beoordelen. Zo kan na het onderzoek worden geanalyseerd of de voorgestelde veranderingen een positief of negatief zouden kunnen hebben gehad op de productie.

Waar moet een prestatie indicator aan voldoen?

Volgens Doran (1981) moet een KPI voldoen aan de S.M.A.R.T. criteria. Dit zijn vijf criteria waarmee de KPI's kunnen worden beoordeeld op bruikbaarheid voor een onderzoek.

- Specifiek: het te meten doel moet duidelijk zijn
- Meetbaar: de waarde van de indicator moet te meten zijn
- Acceptabel: de indicator moet van belang zijn voor de organisatie of het onderzoek
- Realistisch: de indicator moet realistisch en haalbaar zijn
- Tijdsgebonden: de indicator moet te meten zijn in een bepaalde tijd

In hoofdstuk 4 worden de KPI's opgesteld en beoordeeld op de S.M.A.R.T. criteria.

3.4 Simulatie

Wat is simulatie?

Een methode om een bottleneck op te sporen is door simulatie van het productieproces. Winston beschrijft het begrip simulatie op de volgende manier: 'Simulation may be defined as a technique that imitates the operation of a real-world system as it evolves over time' (Winston, 2003) Robinson (2004) geeft een uitgebreidere definitie van simulatie: 'Experimentation with a simplified imitation (on a computer) of an operations system as it progresses through time, for the purpose of better understanding and/or improving the system'. Een simulatie is dus een nabootsing van de werkelijkheid over een periode van tijd, met het doel om het systeem beter te begrijpen of het te verbeteren. Een simulatie kan worden gedaan met behulp van een simulatiemodel. Een simulatiemodel is een schematische weergave van de werkelijkheid waarin wiskundige of logische relaties worden gebruikt tussen objecten. Een simulatie kan worden uitgeschreven op papier, maar wordt meestal uitgevoerd op een computer. Hiervoor is verschillende software beschikbaar.

Er zijn verschillende soorten simulatie, in dit onderzoek worden discrete en continue simulatie van elkaar onderscheiden:

- Discreet: waarin de staat van variabelen alleen veranderen op bepaalde momenten in de tijd
- Continu: waarin de staat van variabelen continu veranderen in de tijd

Als het MIM proces wordt gesimuleerd zal daar een discrete simulatie voor worden gebruikt. Deze methode werkt beter, omdat elke machine met afgeronde deelproducten werkt. Een dergelijke afronding kan worden gezien als een verandering van de status van het product op een bepaald moment in de tijd.

Voordeel van simulatie en alternatieven

Het grote voordeel van simulaties is dat de huidige software het mogelijk maakt interventies te analyseren met behulp van verschillende scenario's. Is een bottleneck eenmaal gevonden, dan kan een bedachte optimalisatie meteen ook worden getest in hetzelfde model. Bovendien past simulatie goed in dit onderzoek, omdat een opgesteld simulatiemodel vaker kan worden gebruikt voor meerdere experimenten met verschillende parameters, interventies en scenario's.

Simulatie is niet de enige methode die in dit onderzoek kan worden gebruikt. Het zou ook mogelijk zijn om te experimenteren in de werkelijkheid, te rekenen met Excel of een algoritme te ontwikkelen. Het probleem met de reken en algoritme alternatieven is dat de systemen al snel te complex worden, waardoor er veel aannames gedaan moeten worden om te kunnen rekenen. Het experimenteren in de werkelijkheid kost veel tijd en geld voor een enkele test. Robinson (2004) vergelijkt rekenen met een spreadsheet (bijvoorbeeld Excel), een algoritme en een simulatie met elkaar op verschillende onderdelen in Tabel 7.

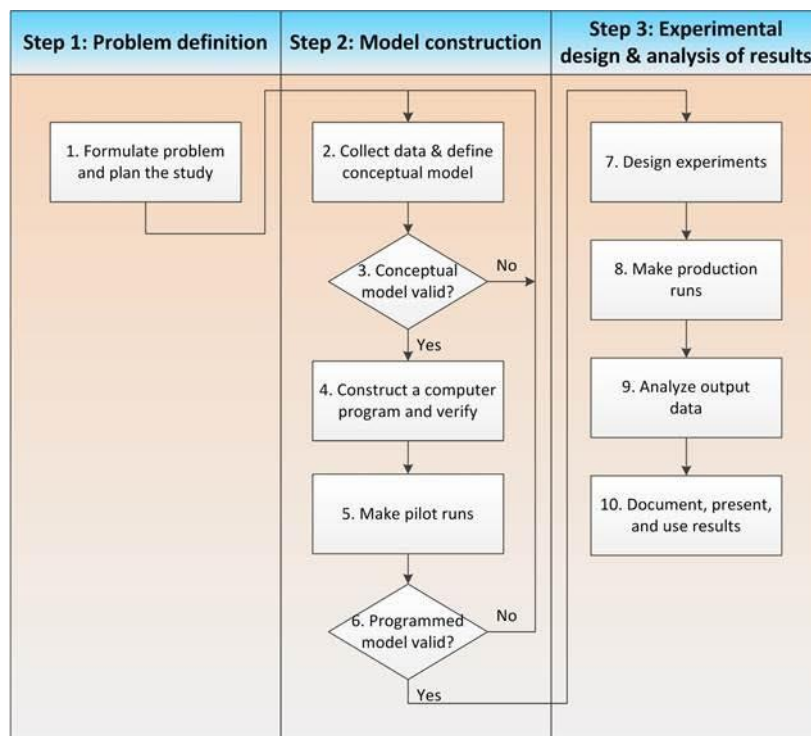
Feature	Spreadsheet	Programming language	Specialist simulation software
Range of application	Low	High	Medium
Modelling flexibility	Low	High	Medium
Duration of model build	Medium	Long	Short
Ease of use	Medium	Low	High
Ease of model validation	Medium	Low	High
Run-speed	Low	High	Medium
Time to obtain software skills	Short (medium for macro use)	Long	Medium
Price	Low	Low	High

Tabel 7 - Vergelijking spreadsheet, algoritme en simulatie (Robinson, 2004)

Robinson noemt de kosten als grootste nadeel van simulaties. Dat probleem speelt niet in dit onderzoek vanwege de afspraken vanuit de Universiteit Twente. De voordelen gebruiksgemak, validatie en tijd spelen wel een grote rol en geven dan ook de doorslag voor de keuze om een simulatie te gebruiken.

Werken met simulatie

Om een situatie te simuleren moeten er een aantal stappen worden doorlopen. Law (2014) onderscheidt drie stappen. Een schematische weergave van Law's werkwijze is gegeven in Figuur 6. De werkwijze van Law zal in dit onderzoek als rode draad fungeren. Vooruitlopend op de inzet op simulatie is in hoofdstuk 1, de eerste stap 'Problem definition' reeds behandeld.



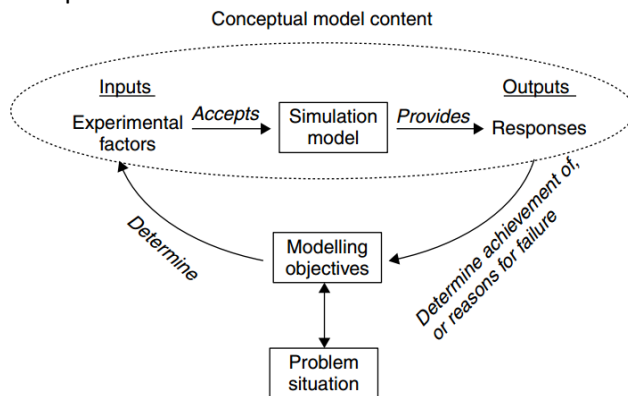
Figuur 6 - Stappenplan simulatie (Law, 2014; Aangepast door Mes, 2017)

In stap 2 van het stappenplan wordt een *conceptueel model* geïntroduceerd. Robinson (2004) beschrijft een conceptueel model als een versimpelde weergave van de werkelijkheid, waarbij nog geen software wordt gebruikt. Het doel van een conceptueel model is een basis vormen voor het te maken simulatiemodel. Als deze basis mist, is de kans op fouten in het simulatiemodel groter en kost het veel tijd deze fouten te herstellen.

Law benadrukt het belang van het opstellen van een conceptueel model. Hij stelt (1991): 'Conceptual modeling is almost certainly the most important aspect of the simulation modelling process'. Ward (1989) bevestigt het belang van het opstellen van een conceptueel model: 'What sets truly successful modellers apart is their effectiveness in conceptual modelling'. Er kan worden geconcludeerd dat er voldoende aandacht en tijd besteedt moet worden aan het conceptuele model van de simulatiestudie.

Robinson (2014) geeft een beschrijving van de inhoud van een adequaat conceptueel model. De inhoud is weergegeven in Figuur 7. Enkele punten komen als belangwekkend naar voren:

- Begrijp wat het probleem in de situatie is
- Bepaal wat het doel is van de simulatie
- Bepaal de in- en outputvariabelen van de simulatie
- Bepaal de inhoud van het model



Figuur 7 - Inhoud conceptueel model (Robinson, 2004)

Met behulp van de vergaarde kennis over simulatie kan er in hoofdstuk 4 een conceptueel model worden opgesteld en kan in hoofdstuk 5 de simulatiestudie worden voortgezet.

3.5 Optimalisatie van het arbeidsproces

Introductie: Theory of Constraints

Als de bottleneck is gevonden moet er een aanpassing worden toegepast zodat het proces wordt geoptimaliseerd. Hiervoor wordt er opnieuw gekeken naar theorie over bottlenecks. Deze theorievorming beschrijft hoe een bottleneck het beste kan worden aangepakt. In het bijzonder wordt hier gekeken naar *Theory of Constraints (TOC)*. Deze theorie vertelt hoe kan worden geoptimaliseerd, gegeven bottlenecks. Volgens de theorie is een uur winnen op de bottleneck een uur winnen voor het volledige proces. Een uur winnen op een andere productiestap is verloren inspanning (Goldratt, 1990). Alles draait daarom om het aanpakken van de bottlenecks.

Er zijn vijf focusstappen opgesteld door Goldratt, de bedenker van Theory of Constraints:

1. Identificeer de beperkingen in het proces
2. Bepaal hoe de beperking kan worden gebruikt
3. Zorg dat alle andere stappen de beperkende stap ondersteunen
4. Vergroot de capaciteit van de beperkende factor
5. Als er na de vorige stappen een nieuwe bottleneck is, begin dan bij stap 1

Toepassing binnen TOC: Drum, buffer, rope concept

Goldratt heeft met Theory of Constraints als basis een concept bedacht om de gehele productie om de bottleneck te laten draaien. Dit wordt het drum, buffer, rope concept genoemd. Het drum, buffer, rope concept stelt dat een bottleneck het ritme van de productie bepaalt. Daarom wordt deze de *drum* genoemd. Vanwege de laagste capaciteit van dit onderdeel, produceert het altijd. Om dit onderdeel altijd te laten werken wordt er een *buffer* opgebouwd voor het productieonderdeel, zodat het onderdeel altijd iets heeft om aan te werken. Vervolgens moet er vanuit de buffer gecommuniceerd worden naar het begin van de productielijn hoeveel er meer of minder geproduceerd moet worden om de buffer op peil te houden, dit wordt de *rope* genoemd (Slack, 2013).

Deze toepassing van Theory of Constraints is in theorie toepasbaar in de situatie van de MIM productie. Als de bottleneck is geïdentificeerd kan daar een buffer voor worden opgebouwd, waardoor de machine altijd kan werken. Wat betreft de geschiktheid van de TOC voor dit onderzoek is het belangrijk te onderstrepen dat DMIM een relatief klein bedrijf is. Door de kleinschaligheid van de productie en de centrale aansturing moet het mogelijk zijn om de huidige situatie van de bottleneck te communiceren naar het begin van de productielijn. Dit stuk literatuur is daarom bruikbaar voor verder onderzoek naar het zoeken van oplossingen.

Ervaringen met Theory of Constraints

Steun voor het gebruik van TOC voor dit onderzoek kan ook worden gevonden in de literatuur. Balderstone en Mabin (1999) hebben een algemene review geschreven op basis van 100 geanalyseerde casussen waar Theory of Constraints werd geïmplementeerd. Hieruit kwamen enkele interessante bevindingen:

- In geen van de 100 casussen werd een tegenvallend resultaat gerapporteerd bij de implementatie
- Gemiddeld zijn de voorraden met 50% gereduceerd, de productietijden verbeterd met 60% en de financiële maatregelen zijn met 80% verbeterd.
- In de casussen waar TOC door middel van simulatie werd vergeleken andere bekende optimalisatie methodes (MRP, JIT) werd TOC nooit als slechter bestempeld en vaak als beter.
- De grootste moeilijkheid in de implementatie van TOC is het veranderen van het gedrag van mensen en de weerstand tegen verandering.

Na afloop van het onderzoek concluderen Balderstone en Mabin (1999) dat het implementeren van Theory of Constraints in een organisatie een positief effect heeft en dat het geen wondermiddel is, maar een manier van denken die helpt met een weg naar succes.

4 Het model

In hoofdstuk 4 wordt het simulatiemodel opgebouwd. De volgende onderwerpen worden besproken: conceptueel model, data voor het model, code voor het model, validatie, verificatie, run length, warm-up periode, replicaties en gevoeligheidsanalyse. In dit hoofdstuk zal de vraag worden beantwoord:

- *Hoe kan het proces worden weergegeven in een model?*

4.1 Conceptueel model

In deze paragraaf worden de volgende aspecten van het conceptueel model behandeld: doel van de simulatie, in- en output variabelen, bereik van het model, aannames en vereenvoudigingen.

4.1.1.1 Doel van de simulatie

Het doel van de simulatie is inzicht krijgen in het productieproces van DMIM en bepalen waar de bottleneck zit. Door middel van interventies kan het simulatiemodel worden gebruikt om te onderzoeken hoe deze bottleneck kan worden opgelost. Naar mate de productie stijgt zal er een nieuwe bottleneck ontstaan en deze wordt op dezelfde manier benaderd.

4.1.1.2 In- en output variabelen

De in- en output variabelen zijn respectievelijk de invoer en de uitkomst van het simulatiemodel. De inputwaarden kunnen worden opgedeeld in twee types: vaste en de variabele input. De vaste input betreft de gegevens over de productie die niet zullen worden gewijzigd, zoals de procestijden van de machines. De variabele input zijn de waarden waarmee wordt geëxperimenteerd in de simulatie. De output van de simulatie zijn de indicatoren aan de hand waarvan wordt bepaald of een verandering van de experimentele factor een positief of negatief effect heeft (KPI's). De in- en output variabelen zijn weergegeven in Tabel 8.

Input – Experimentele factoren	Output – Uitkomsten
Grootte transportbatch	Benutting productiecapaciteit per onderdeel (%)
In- en uitlaad tijden	Aantal kilo spuitgegoten per week
Shifttijden	Aantal kilo verzonden per week
Volgorde van processtappen	Aantal uren gewerkt per week
Prioriteiten van processtappen	Aantal minuten arbeidstijd per kilo

Tabel 8 - In- en output variabelen

Het opbouwen van een model vereist dat input factoren worden gekozen. Voor de keuze van deze inputfactoren is er gebruik gemaakt van gesprekken met de managers en de productiemedewerkers. Daarnaast zijn eigen observaties en intuïties omtrent optimaliseringskansen belangrijk geweest. Het is voor het opbouwen van het model niet erg dat de methodiek hier enigszins arbitrair en intuïtief lijkt. Het model geeft juist de mogelijkheid de intuïties te testen. Gedurende de onderzoeksperiode zijn er potentiële verbeteringen opgeschreven en daarvan is aan het begin van de experimentele fase een selectie gemaakt. Hieronder is deze selectie toegelicht.

- **Grootte transportbatch**
Na de spuitgietmachine worden de producten op een plaat gelegd en zodra deze vol is wordt deze weggebracht. Er zal worden geëxperimenteerd met het aantal platen dat in één keer weggebracht kan worden.
- **In- en uitlaad tijden**
De waterbakken worden op dit moment met de hand in en uitgeladen. Er zal worden geëxperimenteerd om te zien of dit proces sneller kan verlopen door de handling te automatiseren.
- **Shifttijden**
De shifttijden van de werknemers staan voor elke dag in de week vastgesteld. Er zal worden geëxperimenteerd met het schuiven van deze tijden. Het aantal gewerkte uren op een dag blijft hierbij gelijk.
- **Volgorde van processtappen**
Een deel van de handling in de stap 'overstapelen' zou al eerder in het proces kunnen, wat mogelijk een tijdsbesparing oplevert. Er zal worden geëxperimenteerd met het naar voren halen van deze arbeidsintensieve stap.
- **Prioriteiten van processtappen**
De beslissing welke taak als eerste wordt uitgevoerd in de productie (bijvoorbeeld eerst spuitgieten of eerst overstapelen) is gebaseerd op intuïtie. Er zal worden geëxperimenteerd met de volgorde van prioriteitstelling.

De output variabelen zijn zo gekozen dat ze gebruikt kunnen worden om te kunnen bekijken welk effect de experimentele input variabelen geven.

- **Benutting productiecapaciteit per onderdeel (%)**
De benutting van de productiecapaciteit wordt per productieonderdeel bekeken. In het theoretische kader zijn er enkele methodes besproken om de bottleneck te bepalen. Uiteindelijk is hier gekozen om te kijken naar de bezetting per productieonderdeel. De eerste reden hiervoor is dat er door de oneindige hoeveelheid feedstock geen rij kan ontstaan voor de spuitgietmachines, of dat het eigenlijk een oneindige rij heeft. Daarmee valt deze optie voor het kijken naar wachtrijen af. Een tweede reden is dat bij de methode voor bezettingsgraad de productiecapaciteit ook berekend kan worden voor de werknemers, waardoor zij ook een bottleneck kunnen vormen. Het productieonderdeel met de hoogste bezettingsgraad wordt gezien als de bottleneck.
- **Aantal kilo spuitgegoten per week**
Deze KPI geeft aan hoeveel kilo product er per week wordt spuitgegoten. In een normale situatie zullen het aantal spuitgegoten producten en het aantal verzonden producten over een lange periode gelijk zijn, met als verschil het aantal producten dat nog in het systeem zit. Aan dit verschil is dus te zien hoeveel producten zich in het systeem bevinden. In verband met ruimte en kosten voor platen kan dit niet te hoog worden.

- Aantal kilo verzonden per week

De variabele ‘aantal kilo product verzonden per week’ laat zien hoeveel productie de fabriek aan kan met de ingestelde parameters. Het doel van het onderzoek is het verhogen van de capaciteit en daarvan is deze KPI de meeste directe afspiegeling.

- Aantal uren gewerkt per week

Deze variabele geeft het totaal aantal gewerkte uren in een week aan. Zoals aangegeven in de probleemkluwen is arbeid een punt van aandacht in de MIM productie. Er wordt verwacht dat verbetering hierop een bijdrage zal leveren aan het verhogen van de capaciteit.

- Aantal minuten arbeidstijd per kilo

Door de hoge arbeidstijd per product stijgt het aantal gewerkte uren door de werknemers mee met het aantal kilo verzonden producten. Om producties met een afwijkende hoeveelheid verzonden producten te kunnen vergelijken op arbeidstijd is er voor gekozen om deze laatste KPI toe te voegen.

In het theoretisch kader is de S.M.A.R.T. methode geïntroduceerd om een KPI te kunnen beoordelen. In bijlage H is per KPI aangegeven hoe het scoort op elke S.M.A.R.T. criteria, met een bondige verklaring.

4.1.1.3 Bereik van het model

Zoals in hoofdstuk 2 aangegeven wordt er in dit onderzoek het bereik aangehouden van het spuitgieten tot en met het sinteren. Als er per stap verder wordt ingezoomd zijn er meer onderdelen waarvan het discutabel is of ze een rol moeten spelen in de simulatie. In Tabel 9 wordt de vraag beantwoord:

- Welke onderdelen in de productie worden meegenomen in het simulatiemodel?

Onderdeel	Wel/ niet meenemen	Argumentatie
<i>Productiestappen:</i>		
Mengen	Niet	Deze stap wordt binnenkort uitbesteed aan een externe partij
Spuitgieten	Wel	Essentiële stap in de doorloop
Rangschikken	Wel	Essentiële stap in de doorloop
Water ontbinden	Wel	Essentiële stap in de doorloop
Temperatuur ontbinden	Wel	Essentiële stap in de doorloop
Sinteren	Wel	Essentiële stap in de doorloop
Testen	Niet	Uitgevoerd door een externe partij
Verzenden	Niet	Gebeurd door het management
<i>Arbeid:</i>		
Productiepersoneel	Wel	Nodig voor de productiestappen en hebben een werkrooster
Matrijs vervangen	Niet	Gebeurd door management buiten werktijden

Onderhoud	Niet	Gebeurd door management buiten werktijden
<i>Transportbatch:</i> Per productiestap	Wel	De grootte van de batch die per keer wordt verplaatst heeft invloed op de benodigde tijd
Type product:	Wel	Gewicht en vorm hebben invloed op de productie, het gewogen gemiddelde product wordt gebruikt.

Tabel 9 - Bereik van het model

Per onderdeel zal er gedetailleerder worden gekeken naar de variabelen in Tabel 10. Na de tabel worden de aannames en vereenvoudigingen toegelicht.

Onderdeel	Detail	Wel/ niet meenemen	Opmerking
Productiestappen Spuitsieten	Productietijd	Wel	Machine: normaalverdeling Werknemer: korter dan machinetijd
	Opstart tijd	Niet	Vereenvoudiging 4
	Fractie mislukt	Wel	Aanname 3
	Machine stuk	Wel	Aanname 3
	Schoonmaken	Wel	Aanname 3
	Bijvullen	Wel	Normaalverdeling
Water Debinden	Productietijd	Wel	Constant
	Opstart tijd	Wel	Normaalverdeling
	Fractie mislukt	Niet	Aanname 1
	Machine stuk	Niet	Aanname 1
	Schoonmaken	Niet	Aanname 1
Thermisch Debinden	Productietijd	Wel	Constant
	Opstart tijd	Wel	Normaalverdeling
	Fractie mislukt	Niet	Vereenvoudiging 2
	Machine stuk	Niet	Vereenvoudiging 2
	Schoonmaken	Niet	Vereenvoudiging 2
Overstapelen	Productietijd	Wel	Normaalverdeling
	Fractie mislukt	Niet	Laag percentage en weinig over bekend
Sinteroven	Productietijd	Wel	Constant
	Opstart tijd	Wel	Normaalverdeling
	Fractie mislukt	Niet	Vereenvoudiging 3
	Machine stuk	Niet	Vereenvoudiging 2
	Schoonmaken	Niet	Vereenvoudiging 2

Productiepersoneel	Aantal	Wel	Vereenvoudiging 5 Standaard inclusief pauzes Aanname 1 Aangenomen dat bij de handelingen de effectiviteit snel constant wordt Aanname 4
	Shifttijden	Wel	
	Effectiviteit	Wel	
	Ervaring	Niet	
Transportbatch	Snelheid	Wel	Vereenvoudiging 1 Dure platen met een maximaal aantal Verschilt tussen green en brown
	Aantal green	Niet	
	Aantal brown	Wel	
Type product	Oppervlakte plaat	Wel	Vast gewicht per product Aantal te produceren per type
	Gewicht	Wel	
	Aantal	Wel	

Tabel 10 - Detail bereik van het model

4.1.1.4 Aannames en vereenvoudigingen

In het model zijn enkele aannames en vereenvoudigingen toepast. Het verschil tussen een aanname en een vereenvoudiging is dat bij een aanname de werkelijke situatie niet exact bekend is en bij een vereenvoudiging wel. Bij de aannames is er wegens praktische redenen (vaak gebrek aan data) geen mogelijkheid om de exacte waarde vast te stellen. Bij vereenvoudigingen is de reden voor de afwijking van de realiteit om het model simpel te houden. Robinson (2014) zegt: 'In general the aim should be: keep the model as simple as possible to meet the objectives of the simulation study.' Daarnaast geeft hij enkele voordelen van een simpele modellen: ze zijn sneller te ontwikkelen, zijn flexibeler, hebben minder data nodig en de uitkomst is vaak beter te begrijpen.

De volgende aannames worden gedaan:

1. De werknemers hebben een effectiviteit van 80% en deze is bij alle werknemers gelijk.
De werknemers zijn tijdens hun werkzaamheden niet 100% van hun tijd effectief aan het werk. Buiten de pauzes om moet er wel eens iemand naar het toilet, wordt er even een praatje gemaakt of is er een andere afleiding. In overleg met het management is de effectiviteit gesteld op 80 procent.
2. De water toevoer bij de waterbakken wordt niet onderbroken en de bakken gaan niet kapot.
Er wordt aangenomen dat de waterbakken altijd beschikbaar zijn. Dat wil zeggen dat er altijd water is en de metalen bakken niet vervangen hoeven worden.
3. De spuitgietmachines hebben een beschikbaarheid van 60%.
De spuitgietmachines zijn niet 100% van hun tijd effectief aan het gieten. Na een wisselend aantal producten te hebben gegoten moet de machine worden schoongemaakt. Ook een factor is dat, afhankelijk van de kwaliteit van de matrijs, de spuitgietmachine kan vastlopen. Door de logboeken met de werkelijk gemeten tijden te vergelijken is de beschikbaarheid gesteld op 60 procent. Tijdens de 40% downtime is er een werknemer nodig om de machine te 'repareren', net zoals in de werkelijkheid.
4. De werknemers lopen met een constante snelheid van 1.5 m/s.
De werknemers moeten een aantal keer per dag de productiehal doorlopen. Er wordt aangenomen dat elke werknemer altijd met een constante snelheid van 1.5 m/s loopt. Dit is omgerekend 5 km per uur, wat de vuistregel voor wandelen is.

5. Er is altijd feedstock aanwezig.

Er wordt aangenomen dat er altijd feedstock aanwezig is. In de werkelijkheid is ook nooit een probleem ervaren dat er niet geproduceerd kan worden door gebrek aan feedstock.

De volgende vereenvoudigingen worden toegepast op het model:

1. Debinderplaten zijn oneindig beschikbaar.

Debinderplaten zijn de platen waarop de producten liggen als ze de debinderstappen doorlopen (water en thermisch debinden). In de werkelijkheid zijn er niet oneindig veel debinderplaten, maar volgens een medewerker zou de afwezigheid geen reden zijn om niet meer te produceren. In het geval dat ze niet meer beschikbaar zijn worden de producten tijdelijk in een kartonnen doos gelegd en zijn er de volgende dag nieuwe platen.

2. De ovens zijn altijd beschikbaar.

Het komt heel af en toe voor dat de ovens kapot zijn of vervangen moeten worden. Hoe vaak dit gebeurt is lastig te stellen. Om het model werkbaar te houden wordt er gesteld dat de ovens altijd beschikbaar zijn.

3. De producten uit de sinteroven zijn nooit mislukt.

In de werkelijkheid is niet elk product uit de sinteroven bruikbaar om te verkopen. Door nog deels onbekende redenen gaat een fractie van de producten in de oven stuk. De kwaliteitstest waar wordt bepaald of de producten verkocht mogen worden valt buiten dit onderzoek, zoals beschreven in paragraaf 2.2. Om deze reden wordt er gesteld dat de fractie mislukt nul is.

4. De matrijzen worden altijd buiten de werktijden (08:00 – 16:30 uur) verwisseld.

Elk product wordt geproduceerd met een andere matrijs. Tijdens het vervangen van de matrijzen kan de spuitgietmachine niet worden gebruikt. Meestal worden de matrijzen buiten de werkshifts verwisseld, maar niet altijd. Voor de vereenvoudiging wordt er gesteld dat dit *altijd* buiten de shifttijden gebeurt.

5. Er werken altijd zes personen tegelijkertijd.

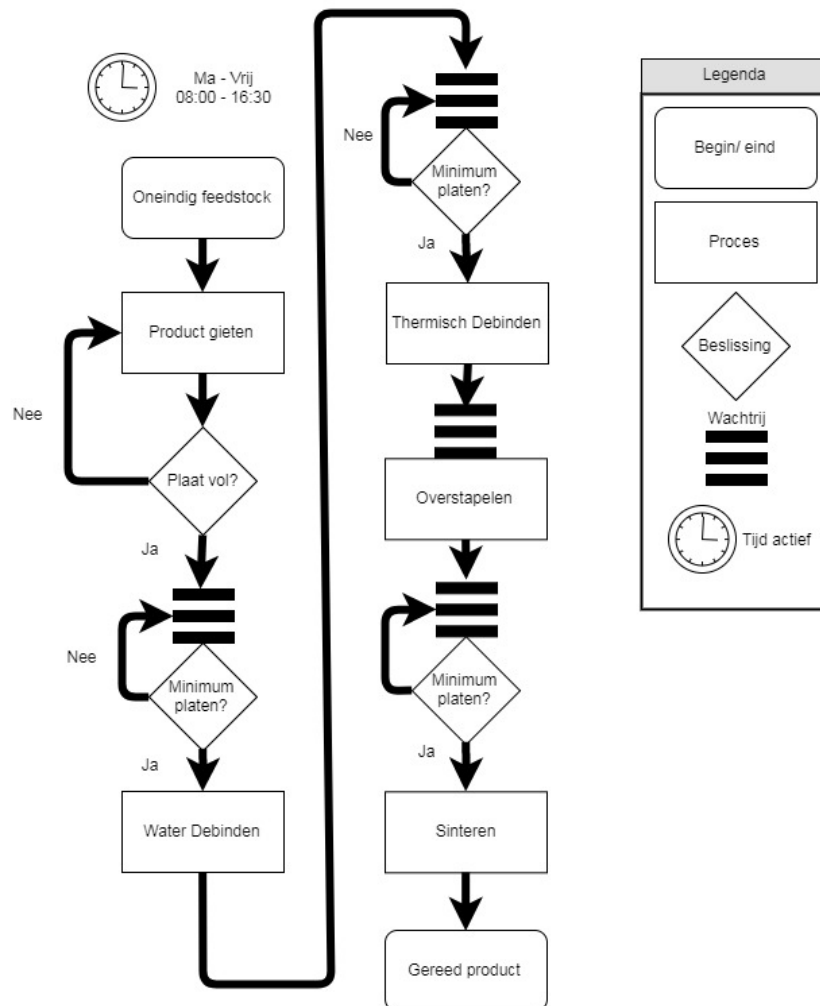
Afhankelijk van de planning van de managers en eventueel uitval van mensen werken er meer of minder mensen tijdens een shift. Meestal is dit aantal zes personen, dus voor de vereenvoudiging wordt dit aangehouden in het model.

6. De prioriteiten van de stappen zijn vastgesteld.

Met een prioriteit voor een productiestap wordt bedoeld welke taak er als eerste wordt uitgevoerd als twee taken op hetzelfde moment vrij komen. In een gesprek met de manager bleek dat de prioriteiten voor productiestappen op intuïtie worden bepaald. Een variabele intuïtie is lastig te simuleren, dus er wordt in overleg een vaste volgorde van prioriteiten vastgesteld (1 is hoog): ovens en waterbakken: 1, overstapelen: 2 en spuitgieten 3.

4.1.1.5 Stroomdiagram van het model

In Figuur 8 is het stroomdiagram van het model weergegeven. Het diagram is vrij eenvoudig, omdat het een enkele lijn aan stappen bevat. Voor elke stap wordt er gewacht tot het minimaal aantal platen om een machine te vullen aanwezig is, dan pas zal er een werker komen om de machine in te laden.



Figuur 8 - Stroomdiagram van het model

4.2 Data voor het model

Voor het model is data nodig wat dient als input. Een deel van de data is al verzameld in hoofdstuk 2 paragraaf 'Gegevens over de productie' en samengevat in bijlage I. Hiernaast is er nog andere data nodig, wat wordt verzameld in deze paragraaf.

Aantal kilo producten geproduceerd

Om de huidige situatie van de productie te bekijken is het nodig om te weten hoeveel kilo product er per week wordt geproduceerd. In dit onderzoek wordt de week productie bepaald door het gemiddelde te nemen van zeven weken in 2017, voorafgaand aan de start van het onderzoek. Dit is volgens het management een goede afspiegeling van hoe de productie er nu voor staat. De geplande productie van week 42 tot en met 47 staat gegeven in bijlage J. Het totaal aantal kilo product per week staat weergegeven in Tabel 11.

Weeknummer	Totaal per week (kilo)
43	XX
44	XX
45	XX
46	XX
47	XX
48	XX
49	XX
Gemiddeld	XX

Tabel 11 - Aantal kilo product per week (Week 43 tm 49 2017)

Het gemiddelde per week fluctueert sterk doordat de arbeidstijd in sommige weken anders is ingedeeld. In het algemeen gesproken kunnen er diverse redenen voor deze verschillen zijn. Het kan bijvoorbeeld zijn dat er een hele week lang alle werknemers achter de spuitgietmachines hebben gezeten en een andere week vier werknemers constant hebben overgestapeld. Wat hier is weergegeven is het aantal producten dat er gepland is om te gaan produceren, in tegenstelling tot het aantal producten wat klaar is om te verzenden (wat door uitval niet hetzelfde is). De geplande productie voor het model zal XX kilo per week zijn.

Aantal werknemers

Het aantal werknemers is niet constant, maar stond in de weken die zijn bekeken (43 tot en met 49) bijna altijd op zes personen.

Werktijden

De werktijden van de werknemers zijn maandag tot en met vrijdag van 08:00 tot 16:30 uur. Er wordt totaal een uur pauze gehouden, wat verdeeld is over twee momenten van een kwartier en één keer een half uur. In een jaar worden er 50 van de 52 weken gewerkt, de overige dagen zijn nationale feestdagen zoals kerst. Bij het observeren van de productie blijkt het dat het opstart proces 's ochtends langer duurt dan er werd aangenomen. De werknemers komen om 08:00 uur de productiehal binnen, maar gaan dan niet gelijk aan de slag. De manager moet naar beneden komen om te vertellen welke taak elke werknemer moet vervullen. Op verschillende productiedagen waren de werknemers om 08:10 uur effectief aan het werk.

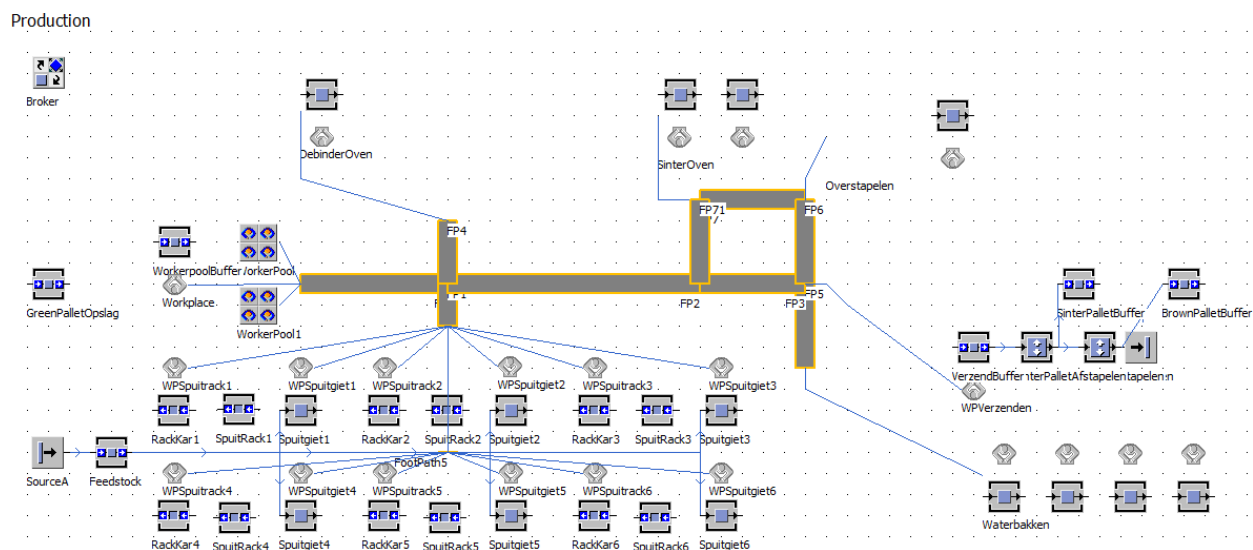
4.3 Geïmplementeerd simulatiemodel

4.3.1 Software

Om de simulatie te laten draaien door een computer moet er code worden geschreven in een softwareprogramma. De code voor de simulatie is geschreven in het softwareprogramma Plant Simulation van Siemens. De keuze voor dit programma vloeit voort uit de samenwerking tussen Siemens en Universiteit Twente. De colleges over simulatie worden ondersteund door de software van Siemens.

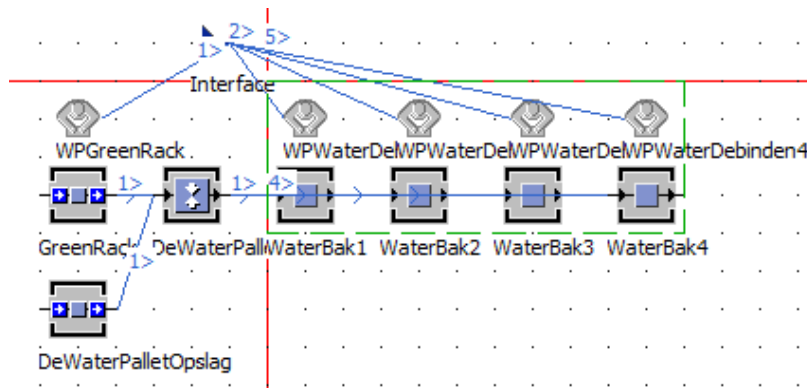
4.3.2 Code achter het model

In deze paragraaf zal een beschrijving worden gegeven van het gebruikte model in Plant Simulation. Het model is te zien in Figuur 9. Links onderin staan de zes spuitgietmachines, met elk een bijbehorende buffer die de debinderplaat moet voorstellen. De waterbakken, ovens en overstapeltafels zijn gemaakt in aparte *frames* binnen het model. Een frame kan gebruikt worden om een sub-proces te simuleren. Enkel de in- en output van het frame is zichtbaar op het 'hoofdframe', dit houdt het geheel overzichtelijk.



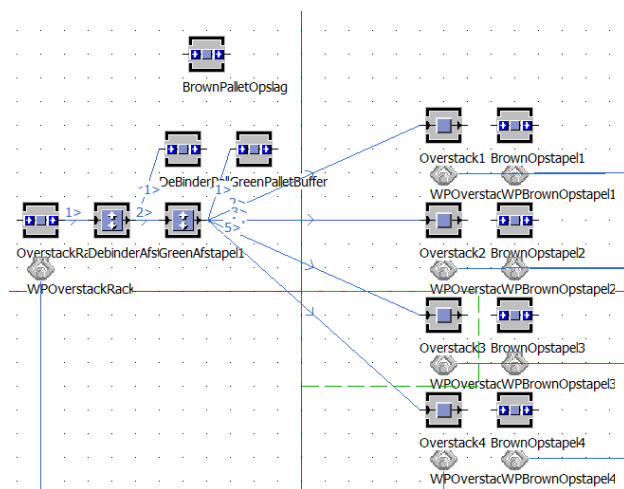
Figuur 9 - Hoofdframe model in Plant Simulation

Binnen de frames worden de platen op racks geplaatst, zodat de platen niet per stuk in de machine gaan. Als een rack vol is, wordt er een werknemer aangeroepen om de machine te vullen. Een goed voorbeeld hiervan is het frame van de waterbakken, zie Figuur 10.



Figuur 10 - Frame Waterbakken in Plant Simulation

Het model is gemaakt om niet alleen het gewogen gemiddelde product te kunnen produceren, maar ook een variatie aan producten. Om die reden moesten de productietijden van de spuitgietsmachines afhankelijk van het type product gemaakt worden. Als een product de spuitgietsmachine binnen komt wordt er een methode aangeroepen die de spuitgietsijd aanpast (zie bijlage K). Dit zelfde geldt voor de overstapeltijd. Hierbij worden alle producten van de platen afgestapeld, om ze vervolgens weer op te stapelen (zie Figuur 11).



Figuur 11 - Frame Overstapelen in Plant Simulation

Dit opstapelen gebeurt net zoals bij het spuitgieten met een methode. Elk type product heeft een ingesteld maximaal aantal producten per plaat (in Plant Simulation *User Defined Attribute*). De methode bekijkt of dit aantal is bereikt en stuurt op dat moment de werknemer aan om de plaat weg te brengen (zie bijlage K).

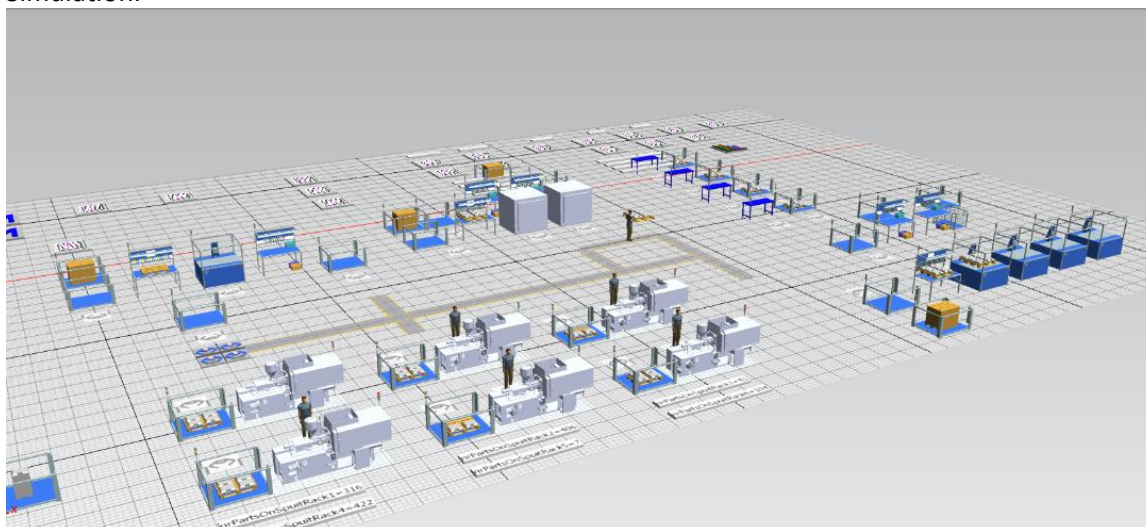
4.3.3 Vereenvoudigingen in het model

In paragraaf 4.1 zijn enkele vereenvoudigingen gegeven in het conceptueel model. Dit is gedaan om het model relatief snel te ontwikkelen en flexibel te houden. Bij het programmeren van het model komen er om dezelfde reden meer vereenvoudigingen bij. Enkele voorbeeld hiervan zijn:

- De werknemers lopen in rechte lijnen door de productiehal, in werkelijkheid wijken de looppaden enigszins af.
- In het model komt elk nieuw product uit een centrale bak (*buffer*). Zoals aangegeven heeft elke spuitgietsmachine in de werkelijkheid een eigen voorraad van 15 kilo. Om het bijvullen hiervan te simuleren wordt er na een ingesteld aantal producten gewacht door de werknemer, wat de tijd voor het bijvullen nabootst.
- Bij het overstapelen en het spuitgieten wordt het bewerken van elk los product gezien als nieuwe taak. De werknemers in het model, die werken op volgorde van binnenkomende taken, liepen heen en weer in de productiehal om het overstapelen en spuitgieten om en om uit te voeren. Op deze manier werd er meer gelopen dan gewerkt, wat in de werkelijkheid natuurlijk niet zo is. Om dit te juist na te bootsen is er een stuk code geschreven die de werknemer de taak spuitgieten niet laat accepteren, als er nog werk te doen is bij het overstapelen (zie bijlage K). Op deze manier wordt het overstapelen van de producten altijd eerst afgemaakt voordat er weer aan het spuitgieten begonnen wordt.

4.3.4 Weergave van het model

Aan het eind van het onderzoek is het simulatiemodel gepresenteerd aan het management waarmee door het onderzoek heen is samengewerkt, maar ook aan personen die nog onbekend zijn met simulatie. Law en McComas (1990) geven aan dat voor personen die onbekend zijn met simulaties de visuele weergave een belangrijk middel is om hun vertrouwen te wekken. Het kan soms lastig zijn om voor te stellen hoe een simulatiemodel eruit ziet, doordat de gebruikte icoontjes in Figuur 9 niet voor zich spreken. Om beter te laten zien hoe het simulatiemodel eruit ziet, is er een 3D versie van het model gemaakt. Het 3D model is te zien in Figuur 12. Deze 3D versie komt overeen met hoe de productiehal er in de werkelijkheid uit ziet, doordat dezelfde indeling is gebruikt en er 3D tekeningen van de machines zijn geïmporteerd in Plant Simulation.



Figuur 12 - 3D weergave van het model in Plant Simulation

4.4 Validatie en verificatie

Het doel van validatie is bepalen of het simulatiemodel een representatieve weergave is van de werkelijkheid. Het doel van verificatie is bepalen of het simulatiemodel overeen komt met het conceptuele model. De resultaten uit de experimenten zijn pas betrouwbaar als het gebruikte model overeen komt met de werkelijkheid. Er worden verschillende vormen van validatie behandeld:

4.4.1 Data validatie

Volgens Law en McComas (1990) is een erg belangrijk onderdeel van de validatie de presentatie van aannames aan de sleutelfiguren in de organisatie. De aannames voor procestijden die worden gebruikt in het model zijn daarom gepresenteerd aan het volledige management. Ze hadden geen aanmerkingen hierop, mede doordat de meeste aannames in overleg zijn opgesteld. De gebruikte data kan dus als valide worden beschouwd.

4.4.2 White box validatie en verificatie model

In de white-box validatie wordt elk onderdeel apart onder de loep genomen met de vraag: komt dit onderdeel voldoende overeen met de werkelijkheid om het doel van de simulatie te bereiken? Bij verificatie wordt hetzelfde gedaan, maar dan in vergelijking met het conceptuele model. Zowel de validatie als verificatie op dit onderdeel is gedaan door tijdens het proces van het coderen goed de logica in de gaten te houden en regelmatig het proces stap voor stap door te lopen. Als laatste toets werd uiteindelijk het model samen met een manager stap-voor-stap doorlopen terwijl de onderzoeker elke stap vertellend voorspelde. Dit ging foutloos, waarop gesteld kon worden dat het model op het gebied van logica goed in elkaar zat.

4.4.3 Black box validatie model

In de black-box validatie wordt het model als geheel bekeken met de vraag: komt het model voldoende overeen met de werkelijkheid om het doel van de simulatie te bereiken? Om dit te bepalen is het simulatiemodel met drie aspecten vergeleken: een deterministisch model, historische productie aantallen en historische werkuren.

Deterministisch model

Als alle variabelen zoals breakdowns en set-ups worden verwijderd en de werknemers zeven dagen in de week werken, kan de doorstroom worden berekend met formule 10.

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Run length} * \text{Batch size} * \text{Machines}}{\text{Longest cycle time}} \quad (10)$$

De waterbakken hebben de langste cycle time (3 dagen), dus de verwachte doorstroom over 60 dagen kan deterministisch worden bepaald met de stap water debinden (zie formule 11).

$$\text{Throughput (60 dagen)} = \frac{60 \text{ dagen} * XX \text{ platen} * XX \text{ producten} * 4 \text{ machines}}{3 \text{ dagen}} \quad (11)$$

$$\text{Throughput (60 dagen)} = XX \text{ producten}$$

In het simulatiemodel (met een warmup-periode van 98 dagen) komt hier een waarde van XX uit. Dit is gelijk aan de berekende doorstroom. De verwachte doorstroom komt dus overeen met de doorstroom uit het model.

Historische data: logboeken spuitgieten

De historische data per product is alleen beschikbaar voor de stap spuitgieten. Deze data zijn afkomstig van de logboeken die zijn ingevuld door de werknemers (zie bijlage G). De validatie zal worden gedaan op basis van vier producten waarvan data zijn gemeten én in de logboeken voldoende beschikbaar was. De data uit de logboeken zijn geplot tegen de uitkomsten van het simulatiemodel in grafiek 9 tot en met 12. In Tabel 12 staat de samenvatting van de testen.

		Logboeken		Simulatiemodel	
Product	Aantal dagen	μ	σ	μ	σ
X	XX	XX	XX	XX	XX
AO	XX	XX	XX	XX	XX
AA	XX	XX	XX	XX	XX
E	XX	XX	XX	XX	XX

Tabel 12 - Samenvatting Historische data validatie

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Grafiek 11 - Validatie product: AO

Grafiek 10 - Validatie product: X

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Grafiek 9 - Validatie product: AA

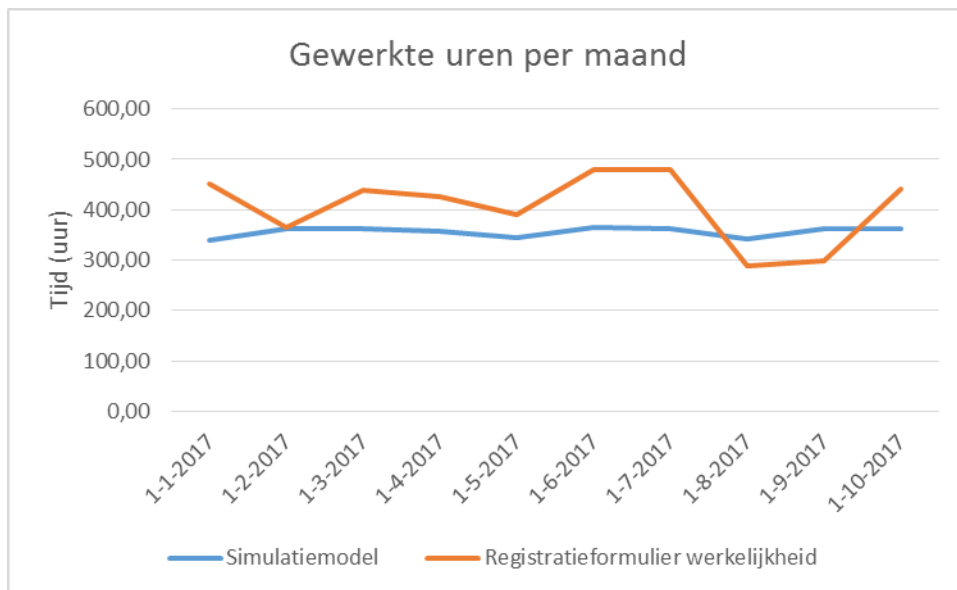
Grafiek 12 - Validatie product: E

In de samenvatting van de data valt op dat de variantie in het model een stuk lager is dan de variantie van de werkelijkheid. De vermoedelijke reden hiervoor is dat de productieaantallen uit de werkelijkheid geschat zijn en de hoeveelheid tijd is afgerond. Bijvoorbeeld dag 28 van product X is in het logboek genoteerd als 1 uur werk voor XX producten (omgerekend XX producten op een dag van XX uur zoals in Grafiek 10). Als er in de werkelijkheid onafgerond XX producten zijn geproduceerd in XX uur, dan zou er in de grafiek XX producten per dag staan. Dit ligt een stuk dichterbij het gemiddelde en verlaagt de variantie daarmee aanzienlijk. In het simulatiemodel wordt het exacte aantal minuten per exacte hoeveelheid tijd bijgehouden, dus daar is deze afwijking niet van toepassing.

Op basis van de vergelijking tussen de logboeken en het simulatiemodel kan er door de ruwe data niet worden geconcludeerd dat het model een afspiegeling is van de werkelijkheid. Er kan niet met een statistische betrouwbaarheid gesteld worden dat de gemiddeldes overeen komen. Dit zou ook niet te verwachten mogen zijn, gegeven de kleine hoeveelheid beschikbare data. Wel is te zien dat de gemiddeldes in de buurt komen van de werkelijkheid. Dit is op zichzelf nog geen juiste validatie, maar draagt wel bij aan de gehele validatie doordat het laat zien dat de gemiddeldes van de productieaantallen elkaar benaderen.

Historische data: gewerkte uren

Een derde methode om te bekijken of het model overeen komt met de werkelijkheid is door te kijken naar de gewerkte uren per maand. De werknemers houden door middel van een registratieformulier bij hoeveel uur ze op een dag besteden aan een handeling. Dit aantal uren is uitgezet tegen data uit het simulatiemodel in dezelfde periode van tijd, zie Grafiek 13. De data uit het simulatie model is verkregen door het gemiddelde te nemen uit vijf runs bij een productieplanning van XX kilo per week, wat de gemiddelde verkoop uit 2017 is. De uren afkomstig van het registratieformulier en het simulatiemodel zijn respectievelijk te vinden in bijlage L. Op het uren formulier wordt geen onderscheid gemaakt tussen de twee verschillende vormen van debinden en ook niet tussen het overstapelen en het in de oven plaatsen. Daarnaast is het opvallend dat er bij sommige maanden nul uur staat aangegeven bij het debinden. De vermoedelijke reden hiervoor is dat werknemers soms alle uren van de dag zetten op spuitgieten, als ze een kwartier tussendoor een andere taak hebben gedaan.



Grafiek 13 - Gewerkte uren per maand

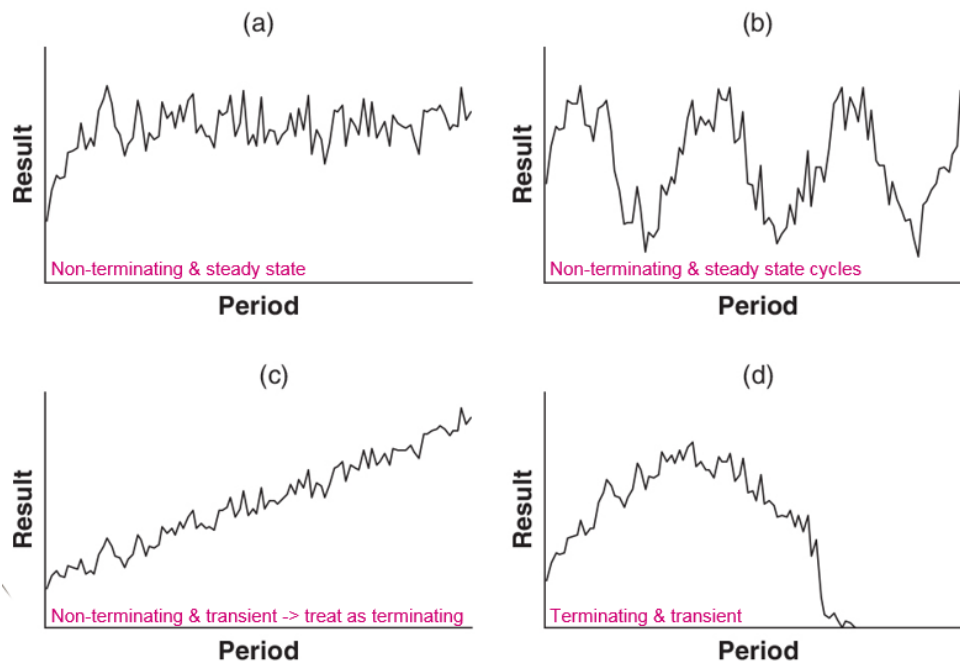
De gemiddeldes van de werkelijkheid en het simulatiemodel zijn respectievelijk 406,25 en 356,42 uren. In Grafiek 13 is te zien dat de lijnen elkaar redelijk overlappen. Er kan geen statistisch bewijs (5% significantie) worden geleverd dat er een verband is tussen de gemiddeldes, maar de waardes benaderen elkaar wel. Een reden voor het verschil in uren kan zijn dat het aantal kilo als input voor het simulatiemodel gebaseerd is op de verkoopcijfers van 2017, terwijl er daadwerkelijk meer geproduceerd kan zijn om een voorraad aan te leggen. Dit is niet vast te stellen, omdat de werkelijke productie per week niet wordt bijgehouden en daarom onbekend is.

4.4.4 Conclusie

Het doel van de simulatie is inzicht krijgen in het productieproces van DMIM en bepalen waar de bottleneck zit. Op basis van de data validatie, white-box validatie en verschillende black-box validaties kan er worden geconcludeerd dat het model geschikt is om het doel te bereiken. Door het verschil in gewerkte uren per maand (black box validatie: gewerkte uren) is het model nog niet 100 procent realistisch, maar dat is niet nodig in dit onderzoek.

4.5 Warm-up time, Runlength & Replicaties

Voordat er experimenten gedaan kunnen worden moet er worden bepaald hoe lang de simulatie draait, hoe vaak de simulatie draait en vanaf welk moment de statistieken over de simulatie worden bijgehouden. Om dit te bepalen moet er worden bekeken om welk type output het in dit onderzoek gaat. Er kunnen vier typen simulatie output worden onderscheiden. De twee hoofdtypen: eindige en oneindige simulaties zijn het belangrijkste om uit elkaar te houden. In het algemeen moeten bij een oneindige simulatie de initiële waarden van een run niet worden meegenomen en bij een eindige simulatie wel. Als de output van de MIM simulatie (Figuur 14) wordt vergeleken met de verschillende types (Figuur 13) is te zien dat het bij de simulatie om een non-terminating en steady state simulatie gaat.



Figuur 13 - Types output voor simulatie

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Figuur 14 - Simulatie output: Aantal producten per week

4.5.1 Warm-up period

Bij het starten van de simulatie bevinden zich geen producten in het programma, dit geeft in de eerste week andere output dan wanneer er al wel producten in het programma zijn. De warm-up periode geeft aan na hoeveel tijd het relevant is om statistieken bij te houden. Bij het bepalen van de warm-up periode gaat het om de afweging maken tussen het reduceren van de impact van de initiele waardes en een langer simulatieperiode. Er zijn verschillende methodes om de warm-up periode te bepalen, in dit onderzoek zal de Welch's graphical method worden toegepast.

4.5.1.1 Welch graphical method

Bij de Welch graphical method wordt het voortschrijdend gemiddelde (moving average) bekeken. Dit houdt in dat het aantal waardes waarover het gemiddelde wordt bepaald gelijk blijft en daarmee de bekeken waardes opschuiven. Bij de Welch method wordt het kleinste window genomen waarbij blijkt dat de lijn er consistent uitziet (Figuur 15). Zowel de lijn met window 5 als window 10 worden consistent bij 14 weken. Volgens de Welch methode kan de warm-up period op 14 weken (98 dagen) worden gezet.

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Figuur 15 - Uitkomst Welch graphical method

4.5.2 Run length

Om de output van experimenten betrouwbaar te maken wordt er gekeken naar de gemiddelde waarde van een KPI over een langere periode. Deze periode is de run length van een simulatie. Volgens Robinson (2014) is de vuistregel dat de run length minimaal tien keer zo groot is als de warm-up periode. Dit zou betekenen dat de simulatie minimaal 980 dagen moet lopen.

Een methode om de run length te bepalen is door te kijken naar de verandering van het gemiddelde naar mate de simulatie vordert. De simulatie heeft met zes werknemers en een productie van 138 kilo per week voor een extreem lange tijd gedraaid: 7000 dagen. Dit is drie keer gedaan en deze gegevens zijn uitgezet in Grafiek 14.

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Grafiek 14 - Cumulatief gemiddelde voor arbeid per kilo product (minuten)

Robinson (2014) geeft een methode om de run length te bepalen door te kijken naar het niveau van convergentie. Als een simulatie oneindig lang loopt, zal de convergentie tussen de verschillende replicaties nul worden. Dit lijkt ideaal, maar voor dit onderzoek is niet oneindig lang de tijd. Er zal een middenweg gezocht moeten worden. De convergentie wordt bepaald met de formule weergegeven in Figuur 16.

$$C_i = \frac{\text{Max}(\bar{Y}_{i1}, \bar{Y}_{i2}, \bar{Y}_{i3}) - \text{Min}(\bar{Y}_{i1}, \bar{Y}_{i2}, \bar{Y}_{i3})}{\text{Min}(\bar{Y}_{i1}, \bar{Y}_{i2}, \bar{Y}_{i3})}$$

where:

C_i = convergence at period i

$\bar{Y}_{ij}$ = cumulative mean of output data at period i for replication j

Figuur 16 - Formule voor convergentie

Het is gebruikelijk om de simulatie te laten lopen tot de convergentie onder de 5 procent is gezakt (Robinson, 2014). In dit onderzoek zijn de veranderingen soms alleen zo klein, dat het verschil dan niet goed zichtbaar wordt. Om deze reden wordt er een kleiner percentage (100x) gebruikt. Na 450 weken (3150 dagen) is de convergentie van de gemiddeldes onder de 0.05 procent zijn zakt. Inclusief de warm-up periode en naar boven afgerond wordt de run length gezet op 3500 dagen.

4.5.3 Replicaties

Zoals te zien in de grafiek van de run length (Grafiek 14) hebben verschillende replicaties weinig invloed op de KPI's. De vuistregel is tussen de drie en vijf replicaties (Law and McComas, 1990). Om te zorgen dat de lezer niet in twijfel wordt gebracht over de betrouwbaarheid van de experimenten wordt het aantal replicaties vastgesteld op vijf.

4.6 Gevoeligheidsanalyse

Robinson (2014) stelt dat een gevoeligheidsanalyse de betrouwbaarheid van een onderzoek verhoogt, zeker als de input waardes gebaseerd zijn op aannames. Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) geeft een duidelijke definitie voor een gevoeligheidsanalyse: 'Studie naar de invloed van variaties in modelparameters/ beginvoorwaarden ect. op de modeluitkomsten.' Daarnaast stelt ook het RIVM dat een gevoeligheidsanalyse met name belangrijk is in situaties waarbij deze grootheden (de input parameters) niet exact bepaald kunnen worden (Janssen, Slob, Rotmans, 1990).

Het doel van de gevoeligheidsanalyse is het beschouwen van de betrouwbaarheid van het model. Er wordt een Individuele Parameter Variatie studie (Janssen, Slob, Rotmans, 1990) uitgevoerd voor de efficiëntie van de werknemers. Bij deze gevoeligheidsanalyse wordt de KPI 'Aantal uur gewerkt per week' uitgezet tegen verschillende hoeveelheden kilo's geproduceerd per week. Voor elke hoeveelheid kilo's worden er drie scenario's van efficiëntie bekeken: huidig, huidig + 10% en huidig -10%.

Grafiek weggelaten wegens geheimhouding.

Grafiek 15 - Gevoeligheidsanalyse Worker Efficiency

In Grafiek 15 is het resultaat van de gevoeligheidsanalyse voor de effectiviteit van de werknemers weergegeven. In het model is aangenomen dat de effectiviteit 80 procent is, in deze analyse wordt de effectiviteit van 70 en 90 procent ook bekeken. De gewerkte uren per week lopen zichtbaar uit elkaar, dus er kan worden gesteld dat het model gevoelig is voor de invoerwaarde effectiviteit van de werknemer. De waarde van de effectiviteit is niet exact berekend in dit onderzoek en nu blijkt dat een relatief kleine verandering van de waarde een significant effect heeft, zal het lastig worden een exacte weergave van de werkelijkheid te geven met het model. Toch is dit niet desastreus voor dit onderzoek, omdat te zien is dat het effect constant is over het spectrum van aantal geproduceerde kilo's. Dit geeft aan dat een verandering in het model ook een verandering zal geven in de werkelijkheid, maar wellicht met een iets groter of kleinere impact afhankelijk van hoe accuraat de op aannames gebaseerde invoerwaardes precies zijn.

5 Bottleneck en interventies

In hoofdstuk 5 wordt er geëxperimenteerd met het opgebouwde simulatiemodel. Door middel van de experimenten wordt de huidige bottleneck bepaald. Er wordt onderzocht hoe de productie kan stijgen door de maximale capaciteit te vergroten. Daarnaast wordt onderzocht hoe de productie kan stijgen zonder capaciteit toe te voegen; dat wil dus zeggen door de bestaande capaciteit beter te benutten. In dit hoofdstuk wordt er antwoord gegeven op de volgende deelvragen:

- Wat is de maximale productiecapaciteit van het productieproces en welk percentage wordt momenteel benut?
- Waar in het MIM proces ontstaat de bottleneck?
- Hoe kan de stap waar bottleneck ontstaat in het MIM proces worden geoptimaliseerd?

5.1 Ontwerp experimenten

Hoofdstuk 5 bestaat uit een verzameling experimenten waarmee ik (een aantal van) mijn ideeën ter verhoging van de productie van Demcon MIM test op nut en bruikbaarheid. Ik heb deze ideeën omgezet naar via het model te testen veranderingen in het productieproces. Als zodanig noem ik ze interventies. In paragraaf 5.2 wordt de huidige benutting van de productiecapaciteit berekend ten opzichte van het theoretisch maximum, gegeven een aantal randvoorwaarden. Vervolgens wordt in paragraaf 5.3 gekeken hoeveel de productie kan stijgen wanneer het aantal machines of het aantal werknemers wordt vergroot. Er wordt ook onderzocht hoe de bottleneck zich verplaatst in geval van een verandering. In paragraaf 5.4 tot en met paragraaf 5.6 is gekeken hoe de productie kan stijgen zonder vergroting van het aantal machines of het aantal werknemers.

Paragraaf titel	Interventies
5.2 Benutting productiecapaciteit	-
5.3 Bottleneck matrix Productie verhogen door capaciteit toe te voegen in de vorm van extra machines en personeel	8 arbeidscapaciteits verhogingen 5 spuitgietscapaciteit verhogingen 1 waterbakcapaciteit verhoging
5.4 Interventie type 1 Productie verhogen door de manier van handelen aan te passen	<i>Interventies weggelaten wegens geheimhouding.</i>
5.5 Interventie type 2 Productie verhogen in de vorm van werktijden	<i>Interventies weggelaten wegens geheimhouding.</i>
5.6 Interventie type 3 Productie verhogen door de planning aan te passen met een uitgebreid simulatiemodel	<i>Interventies weggelaten wegens geheimhouding.</i>

In dit hoofdstuk wordt er onderscheid gemaakt tussen twee soorten experimenten: experimenten met een geplande productie van XX kilo per week en experimenten zonder geplande maximum productie. In de experimenten met een geplande productie houden de werknemers op met werken als de geplande hoeveelheid is behaald en als er geen geplande productie is werkt het personeel de gehele arbeidstijd. In paragraaf 5.4 bij interventie 1, 3 en 4 wordt er met een planning van XX kilo per week geproduceerd en bij alle anderen zonder geplande maximum productie. De reden voor deze aanpak is dat bij de interventies

voor 138 kilo per week het interessant is om het effect te meten bij een gelijke grootte van productie. Bij de andere interventies is het juist interessant om te zien hoeveel kilo de productie per week kan stijgen door invloed van de interventie.

5.2 Benutting productiecapaciteit

Het is nuttig om de benutting ten opzichte van de maximale capaciteit te berekenen, omdat het management dan op de hoogte is hoe het productieproces er voor staat en hoeveel er gegroeid kan worden. Om de benutting van de productiecapaciteit te berekenen, wordt gekeken welk percentage van de maximale (of theoretische) capaciteit wordt benut. Zoals in het theoretisch kader beschreven (paragraaf 3.2) hangt de productiecapaciteit van vele factoren af. De maximale productiecapaciteit is alleen te bepalen binnen gestelde randvoorwaarden. Deze randvoorwaarden zijn het huidig aantal machines, werknemers en werktijden zoals beschreven in paragraaf 4.2. Om de maximale capaciteit te berekenen zal een simulatie worden gedraaid zonder geplande productie hoeveelheid en een productie die elke dag om 08:00 uur begint.

Maximale (of theoretische) capaciteit 6 personen -- 08:00 – 16:30 uur -- 2x 15 min & 1x 30 min pauze					
KPI	Gemiddeld	Afwijking	KPI	Gemiddeld	Afwijking
Kilo per week spuitgegoten	202,83	0,04	Bezetting Water Debinden	0,46	0,00
Kilo per week verzonden	202,84	0,08	Bezetting Thermisch Debinden	0,37	0,00
Arbeid per week (uren)	225,26	0,00	Bezetting Overstapelen	0,26	0,00
Arbeid per kilo (minuten)	66,63	0,03	Bezetting Sinteren	0,28	0,00
Bezetting Spuitgieten	0,80	0,00	Bezetting Werknemers	1,00	0,00

Tabel 13 - Maximale capaciteit huidige situatie

In tabel 13 is te zien dat de productie bij maximale capaciteit 201.91 kilo is. In paragraaf 4.2 is bepaald dat de gemiddelde productie in de huidige situatie 138 kilo per week is. Als de huidige productie wordt gedeeld door de maximale productie kan worden berekend dat de benutting van de capaciteit 68.04 procent is (zie formule 12).

$$\text{Benutting productiecapaciteit} = \frac{\text{Huidige productie}}{\text{Maximale productie}} * 100 = \frac{138}{202.84} = 68.04 \% \quad (12)$$

Als er verder in het onderzoek wordt geëxperimenteerd met de gestelde randvoorwaarden, kan het voorkomen dat de maximale capaciteit wordt overschreden. Dit kan worden gezien als het plaatsen van een extra machine, waarbij het logisch is dat de maximale capaciteit stijgt.

5.3 Bottleneck matrix

In hoofdstuk 3 is de Theory of Constraints geïntroduceerd. Volgens deze theorie kan enkel door het wegnemen van de bottleneck de productie worden verhoogd. In deze paragraaf is volgens dit principe gewerkt. De bottleneck wordt gevonden door de benutting per onderdeel in de productie bekijken. In Tabel 14 staan de gemiddeldes en afwijking van vijf runs zonder geplande hoeveelheid met de specificaties van de huidige situatie zoals beschreven in hoofdstuk 4.

Huidige situatie van Demcon MIM 6 personen -- 08:10 – 16:30 uur -- 2x 15 min & 1x 30 min pauze					
KPI	Gemiddeld	Afwijking	KPI	Gemiddeld	Afwijking
Kilo per week spuitgegoten			Bezetting Water Debinden		
Kilo per week verzonden			Bezetting Thermisch Debinden		
Arbeid per week (uren)			Bezetting Overstapelen		
Arbeid per kilo (minuten)			Bezetting Sinteren		
Bezetting Spuitgieten			Bezetting Werknemers		

Tabel 14 – Uitkomst simulatie huidige situatie

Uit het experiment (zie Tabel 14) blijkt dat de werknemers op de hoogste bezetting van hun capaciteit werken. We kunnen dus de conclusie trekken dat de werknemers in de huidige situatie de bottleneck in de productie vormen. Om de productie te verhogen wordt in het volgende experiment de capaciteit van de bottleneck vergroot tot de bottleneck verschuift. Als de bottleneck verschuift wordt de capaciteit van de nieuwe bottleneck vergroot. Als men kijkt naar de ontwikkeling van de bottlenecks dan valt op dat ze in de vorm van een matrix zijn te presenteren. Door de verschillende vergrotingen van de capaciteit weer te geven in een matrix is het geheel overzichtelijk voor het management. Deze matrix is in dit onderzoek benoemd tot *bottleneck matrix*. De bottleneck matrix is weergegeven in Tabel 15 en bevat de gemiddeldes per KPI van de uitgevoerde experimenten per capaciteitsvergroting.

De bottleneck in de productie is voor elk experiment gemarkeerd. De managers van Demcon MIM kunnen uit de matrix aflezen hoeveel de productie stijgt bij het verhogen van de capaciteit. De afwijking, overige KPI's en aantal machines per experiment zijn weergegeven in bijlage M.

KPI	Huidig	+ 1 persoon	+ 1 persoon	+ 1 XX	+ 1 persoon	+ 1 XX	+ 1 persoon	+ 1 persoon
Productie per week (kilo)	198,24	211,38	222,54	258,45	290,53	294,95	306,87	332,08
Bezetting Spuitgieten	0,78	0,83	0,87	0,87	0,98	0,87	0,90	0,98
Bezetting Water Debinden	0,45	0,48	0,51	0,59	0,66	0,67	0,70	0,75
Bezetting Thermisch Debinden	0,36	0,38	0,40	0,47	0,53	0,54	0,56	0,60
Bezetting Overstapelen	0,26	0,27	0,29	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43
Bezetting Sinteren	0,27	0,28	0,30	0,35	0,39	0,40	0,42	0,45
Bezetting Werknemers	0,98	0,89	0,82	0,96	0,96	0,97	0,91	0,89

(Bottleneckmatrix wordt vervolgt op de volgende bladzijde)

KPI	+ 1 XX	+ 1 persoon	+ 1 XX	+ 1 persoon	+ 1 XX	+ 1 persoon	+ 1 XX	Totaal: 14 personen
Productie per week (kilo)	345,19	373,55	383,18	415,01	421,29	441,02	456,48	
Bezetting Spuitgieten	0,90	0,98	0,90	0,98	0,90	0,98	0,98	
Bezetting Water Debinden	0,78	0,85	0,87	0,94	0,96	1,00	0,83	11 XX
Bezetting Thermisch Debinden	0,63	0,68	0,70	0,75	0,76	0,80	0,83	
Bezetting Overstapelen	0,44	0,48	0,49	0,54	0,54	0,57	0,59	5 XX
Bezetting Sinteren	0,47	0,51	0,52	0,56	0,57	0,60	0,62	
Bezetting Werknemers	0,93	0,92	0,95	0,94	0,96	0,96	0,97	

Tabel 15 - Bottleneck matrix

Uit de bottleneck matrix kan worden afgelezen dat de spuitgietmachines en de werknemers elkaar blijven afwisselen als bottleneck tot de waterbakken hun maximale capaciteit bereiken. Een belangrijke conclusie uit bottleneck matrix is dat de productie niet stijgt door het verhogen van de capaciteit van de waterbakken, debinderoven of sinteroven tot er een productie van 441,02 kilo per week is bereikt.

5.4 Interventie type 1

Het toevoegen van extra machines of werknemers is niet de enige manier op de productie te verhogen. In paragraaf 5.4 tot en met 5.6 wordt onderzocht hoe de productie kan stijgen zonder de capaciteit (van mensen of machines) te laten toenemen. In deze paragraaf (5.4) kijken we naar de mogelijkheden tot productie verhoging door wijzigingen in de manier van handelen.

In paragraaf 5.3 is bepaald dat de werknemers de bottleneck zijn voor een situatie zonder geplande productie hoeveelheid. Er wordt nu bekeken of dit ook het geval is voor een productie met een geplande hoeveelheid per week van 138 kilo, zoveel als er in de werkelijkheid ook wekelijks wordt ingepland.

Huidige situatie van Demcon MIM 6 personen -- 08:10 – 16:30 uur -- 2x 15 min & 1x 30 min pauze					
KPI	Gemiddeld	Afwijking	KPI	Gemiddeld	Afwijking
Kilo per week spuitgegoten			Bezetting Water Debinden		
Kilo per week verzonden			Bezetting Thermisch Debinden		
Arbeid per week (uren)			Bezetting Overstapelen		
Arbeid per kilo (minuten)			Bezetting Sinteren		
Bezetting Spuitgieten			Bezetting Werknemers		

Tabel 16 - Bottleneck analyse 1

Uit het experiment (zie Tabel 16) blijkt dat in de huidige situatie de werknemers nog steeds het onderdeel zijn die op de hoogste bezetting van hun capaciteit werken en daarmee worden gezien als de bottleneck. Er zijn een viertal interventies bedacht die de benutting de capaciteit van de werknemers mogelijk verhogen. Alle interventies zijn op dezelfde manier opgebouwd:

1. Huidige manier van handelen
2. Idee
3. Benodigd
4. Verwachte besparing
5. Berekende besparing
6. Positieve en negatieve bijeffecten van de interventie
7. Gevoeligheidsanalyse (eventueel)
8. Conclusie

Na afloop van de vier interventies van type 1 zal het resultaat worden bekeken in de situatie dat al deze vier interventies worden toegepast.

5.4.1 Interventie 1

Interventie weggelaten wegens geheimhouding

5.4.2 Interventie 2

Interventie weggelaten wegens geheimhouding

5.4.3 Interventie 3

Interventie weggelaten wegens geheimhouding

5.4.4 Interventie 4 – Overstapelen voorkomen

Interventie weggelaten wegens geheimhouding

5.4.5 Resultaat interventies 1 t/m 4

Interventie weggelaten wegens geheimhouding

5.5 Interventie type 2

5.5.1 Interventie 5

Interventie weggelaten wegens geheimhouding

5.6 Interventie type 3

Interventie weggelaten wegens geheimhouding

6 Conclusie en aanbevelingen

In hoofdstuk 6 wordt de conclusie van dit onderzoek beschreven en worden op basis daarvan aanbevelingen gedaan voor Demcon MIM. De conclusie heeft de vorm van een antwoord op de hoofdvraag van dit onderzoek.

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

‘Waar in het MIM proces ontstaan bottlenecks naarmate de productie stijgt en hoe kunnen deze worden weggenomen?’

6.1 Conclusie

Het onderzoek is begonnen met het analyseren van de huidige situatie bij Demcon MIM. De eerste bevinding was dat het door de variatie aan producten lastig is een uniforme maat voor de productie te vinden, die te gebruiken is bij de optimalisatie van de productie. Er is een verband gevonden tussen gewicht en de bewerkingstijd van de producten. Op basis van dat verband is besloten om de grootte van de productie per tijdseenheid uit te drukken in aantal kilo product.

Volgens Robinson (2014) kunnen de bottlenecks het beste gevonden worden en aangepakt door gebruik te maken van simulatie. Een simulatie is een nabootsing van de werkelijkheid waarmee een proces geanalyseerd kan worden. Het effect van interventies kan worden bekeken. Door middel van interventies kan een simulatiemodel worden gebruikt om te onderzoeken hoe de bottleneck kan worden weggenomen. Voor dit onderzoek is een simulatiemodel opgezet waarin met meerdere interventies is geëxperimenteerd.

Uit mijn simulatiemodel bleek dat er in de huidige situatie op XX procent van de maximale capaciteit gewerkt wordt. Uit de eerste bottleneck analyse bleek dat in de huidige situatie de werknemers de bottleneck vormen van de productie. Er is in dit onderzoek op vier verschillende methodes onderzocht hoe de productie kan worden verhoogd: door capaciteit toe te voegen in de vorm van machines en personeel, door de manier van handelen aan te passen, capaciteit toe te voegen in de vorm van werktijden en door de planning aan te passen met een uitgebreid simulatiemodel.

Bij de experimenten die betrekking hebben op de capaciteitsverhoging met machines en personeel bleek dat de bottleneckfactor personeel werd afwisseld door de spuitgietmachines. We hebben dit weergegeven in een *bottleneck matrix*. Uit de bottleneck matrix kan worden afgelezen dat de spuitgietmachines en de werknemers elkaar blijven afwisselen als bottleneck tot de waterbakken hun maximale capaciteit van XX kilo per week bereiken. Een belangrijke conclusie uit de bottleneck matrix die kan worden afgelezen is dat de productie alleen kan stijgen door het vergroten van het aantal werknemers ofwel het aantal spuitgietmachines, afhankelijk welke van de twee op een bepaald moment de bottleneck is. Het toevoegen van capaciteit aan een ander onderdeel kan worden gezien als verspilling.

Bij een tweede groep experimenten is onderzocht of de bottleneck 'werknemers' kan worden weggelaten zonder extra werknemers toe te voegen. Hier gaat het dus om experimenten waarmee wordt onderzocht – gegeven het bestaande aantal werknemers – of door de verbetering van het arbeidsproces de productie kan worden verhoogd. Er is geëxperimenteerd met een viertal interventies.

Interventie weggelaten wegens geheimhouding

Als alle vier de interventies worden ingevoerd blijkt dat de bezetting van de arbeidcapaciteit is gedaald van XX naar XX procent. De werknemers hebben nog de hoogste bezettingsgraad, dus blijven de bottleneck in de productie. Er is wel XX uur per week minder nodig om dezelfde planning van XX kilo te halen.

Bij een volgende groep experimenten is onderzocht hoe de productie kan worden verhoogd door te schuiven met de werktijden van de werknemers. In plaats van 1 shift die voor alle werknemers gelijk is, is gekeken naar het effect van ongelijke shifts ('ploegendiensten'). Op deze manier kan het aantal werknemers gelijk blijven, maar kan hun inzet mogelijk sterk worden verbeterd. In een experiment waarbij zes werknemers (in twee groepen) steeds verspreider op de dag werken, blijkt dat de productie niet hoger wordt. Deze interventie heeft wel effect als met zeven of acht personen wordt gewerkt. Rekenen we de extra kosten voor arbeid mee, dan blijkt het optimaal om geen overlap te hebben tussen de twee shifts. Men kan het beste werken in twee groepen die als werktijden hanteren: 06:00 – 14:30 uur en 15:00 – 23:30 uur. De productie bij zeven en acht personen stijgt respectievelijk 10 en 20 procent door de interventie.

Bij de laatste groep van experimenten wordt er gekeken naar het effect op de productie van het aanpassen van de planning van de werknemers. Hiervoor wordt het simulatiemodel uitgebreid. Het blijkt dat er het beste twee personen ingepland kunnen worden voor het overstapelen, in plaats van drie of vier personen. Er kan worden geconcludeerd dat er meer wordt geproduceerd als de arbeidsstappen van het debinden worden ingepland en als bundel van taken wordt uitgevoerd. Als beide interventies worden ingevoerd kan er bij een productie van XX kilo XX minuten per week worden bespaard.

Al met al kan er worden geconcludeerd dat een verhoging van de productie mogelijk is door de bottleneck bij de factor 'werknemers' aan te pakken. Het antwoord op de hoofdvraag is:

De bottleneck in het huidige systeem is de factor 'werknemers'. Deze kan worden weggelaten door meer werknemers toe te voegen, zoals weergegeven in de bottleneck matrix. Door interventies 1, 2, 3, 4 en 6 te implementeren kan er meer worden geproduceerd met dezelfde hoeveelheid werknemers. Als de productie stijgt is de stap spuitgieten het eerste de materiële bottleneck. Deze kan worden weggelaten door interventie 5.

De hoeveelheid stijging van de productie per type interventie is weergegeven in Tabel 17.

	Huidige productie (kilo)	Productie met interventie (kilo)	Verschil
Manier van handelen aanpassen <i>Interventie 1 t/m 4</i>	XX	XX	XX
Werktijden aanpassen <i>Interventie 5</i>	XX	XX	XX
Planning aanpassen <i>Interventie 6</i>	XX	XX	XX

Tabel 17 - Productie stijging per type interventie

6.2 Aanbevelingen

Om een hogere productie te bereiken worden op basis van de simulatie in het onderzoek de volgende aanbevelingen gedaan:

Aanbevelingen weggelaten wegens geheimhouding

Een algemene aanbeveling is om per week bij te houden hoeveel producten er per stap worden gemaakt. Daarbij kan de productie het best worden uitgedrukt in gewicht, zoals dit onderzoek heeft aangetoond. Het bijhouden van de geproduceerde aantallen geeft inzicht in de prestaties van de productie en maakt vervolgonderzoek naar verbeteringen eenvoudiger.

Een mogelijkheid voor vervolgonderzoek om de bottleneckfactor werknemers verder weg te nemen, is te kijken naar een situatie waar er minder werknemers per spuitgietmachine werken. De cyclustijd van de werknemers is lager dan de cyclustijd van de spuitgietmachine. De hypothese is dat het tijd bespaard als er één persoon twee machines bedient en daar 100% van haar tijd aan besteed, in plaats van dat er twee personen op 75% van hun capaciteit werken. Het overgebleven werk (nabewerken) zou later gedaan kunnen worden, in de helft van de tijd.

7 Bronnen

1. Balderstone, S.J. Mabin, V.J. (1999). A Review of Goldratt's Theory of Constraints (TOC): Lessons from the international literature. Nevi.
2. Boddy, D. (2011, 5th edition). Management An Introduction. Pearson.
3. Bing Chen, Ting Yang, Kai Liu and Shan Li (2013) International Asia Conference on Industrial Engineering and Management (IEMI2012) proceedings: core areas of industrial engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
4. Donald R. Cooper, Pamela S. Schindler (2014, 12th edition). Business Research Methods. Mc Graw Hill.
5. Doran, G. T. (1981). There's a S.M.A.R.T. Way to Write Management's Goals and Objectives. Management Review
6. Goldratt, M. (1990). What is this thing called Theory of Constrains and how should it be implemented?
https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33740344/Theory_of_Constraints_Eliyahu_M._Goldratt.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1507315865&Signature=tD7uYd77%2FqUZSfMW3zxYTDxbnXU%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DTheory_of_Constraints_Eliyahu_M._Goldra.pdf
7. Heerkens, H. Van Winden, A. (2012). Geen Probleem. Een aanpak voor alle bedrijfskundige vragen en mysteries. Van Winden Communicatie (in opdracht van: Business School Nederland Buren).
8. Janssen, P. Slob, W. Rotmans, J. (1990). Gevoeligheidsanalyse en onzekerheidsanalyse: een inventarisatie van ideeën, methoden en technieken. Rijksinsituut voor Volksgezondheid en Mileuhygiene Bilthoven.
9. Law, A. (2014, 5th edition). Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill Education.
10. Law, A. McComas, M. (1990). Secrets of successful simulation studies. Institute of Industrial Engineers.
11. Markgraf, B. (2017). How to identify Bottlenecks in Manufacturing. Chron. Opgeroepen op 12 januari 2018:
<http://smallbusiness.chron.com/identify-bottlenecks-manufacturing-72465.html>
12. Robinson, S. (2004). Simulation: The Practice of Model Development and Use. John Wiley & Sons.
13. Slack, N. Brandon-Jones, A. Johnston, R. (2013, 7th edition). Operations Management. Pearson.
14. Winston, W.L. (2003, 4th edition). Operations Research: Applications and Algorithms. Brooks/Cole.

Bijlage A: De productiehal



Foto 3 - Spuitgieten



Foto 4 - Water debinden



Foto 5 – Thermisch debinden



Foto 6 - Overstapelen



Foto 7 - Sinteren



Foto 8 - Opslag

Bijlage B: Afstanden tussen productiestappen

In bijlage B staan de afstanden tussen de productiestappen in de productiehal. Om het model eenvoudig te houden is van en naar de productiestappen met meerdere machines de gemiddelde afstand genomen. De afstanden zijn gegeven in meters.

	Ingang	Spuitsieten	Water Debinden	Thermisch Debinden	Overstapelen	Sinteren
Ingang	x	9	28	10	28	23
Spuitsieten		x	23	5	23	18
Water Debinden			x	24	8	13
Thermisch Debinden				x	22	19
Overstapelen					x	5
Sinteren						x

Bijlage C: Tabellen over aantal en gewicht van week 14 t/m 17

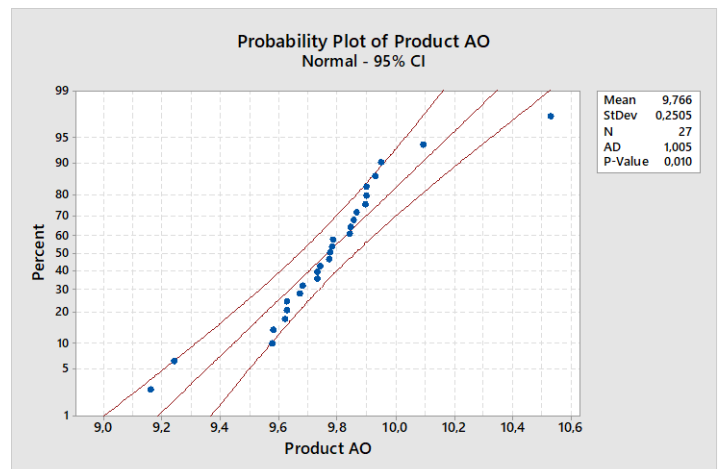
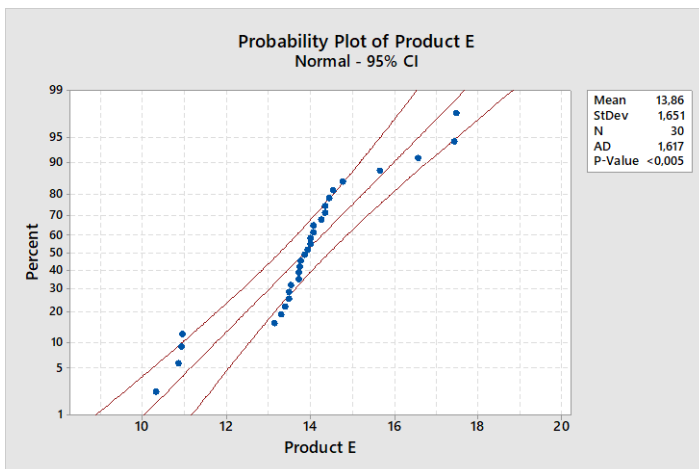
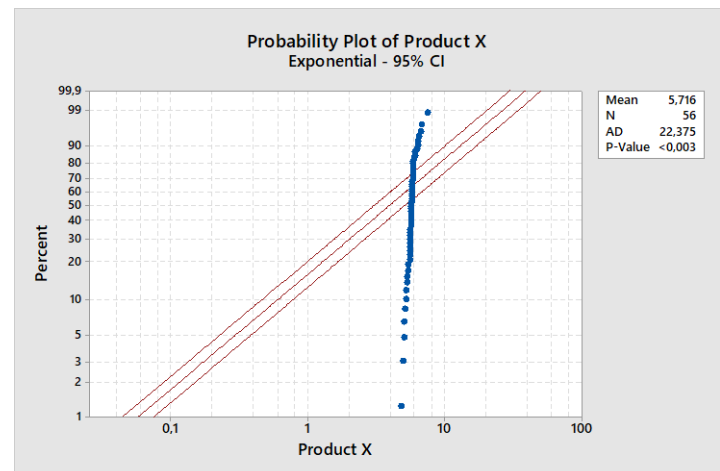
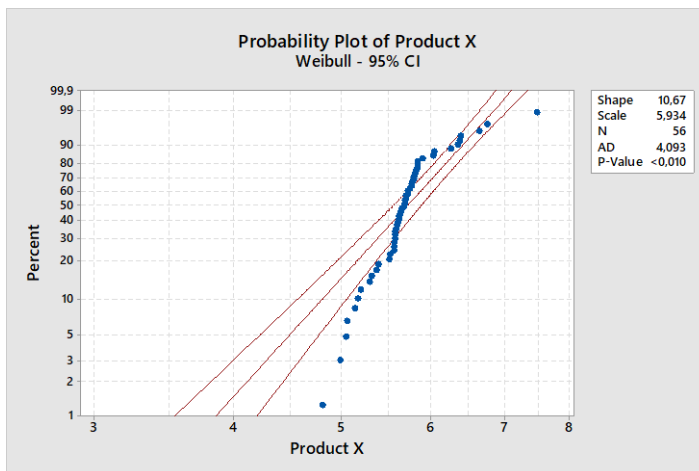
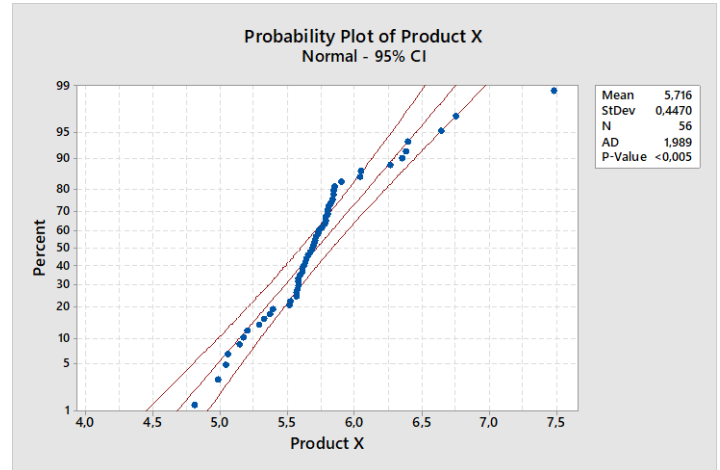
Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Bijlage D: Gemeten data spuitgieten

Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Bijlage E: Kansverdeling

De middelste rode lijn in elke grafiek geeft de verdelingslijn weer. De data punten zouden op deze lijn vallen als het een perfecte verdeling was waarop in die grafiek wordt getest. De twee lijnen aan de zijkant geven de grenzen aan van het 95% procent betrouwbaarheidsinterval.



Bijlage F: Fracties en bewerkingstijden

Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Bijlage G: Spuittijden uit logboeken

Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Bijlage H: S.M.A.R.T. beoordeling voor KPI's

	Score (-/+)	Verklaring
Benutting productiecapaciteit per onderdeel (%)		
Specifiek	+	Het bepaald de bottleneck
Meetbaar	+	Werkelijk gebruik / Maximaal gebruik * 100
Acceptabel	+	Bottleneck vinden staat in de hoofdvraag van het onderzoek
Realistisch	+	Elk productieonderdeel heeft altijd een benutting
Tijdsgebonden	+	Wordt een gemiddelde bepaald per week
Aantal kilo spuitgegoten per week		
Specifiek	+	Het laat de capaciteit en abnormaal gedrag zien van de productie
Meetbaar	+	Aantal kilo wordt per week opgeteld
Acceptabel	+	Verhoging van de capaciteit staat in het onderzoeksdoel
Realistisch	+	Eenvoudig bij te houden
Tijdsgebonden	+	Wordt een gemiddelde bepaald per week
Aantal kilo verzonden per week		
Specifiek	+	Laat de capaciteit zien van de productie
Meetbaar	+	Aantal kilo wordt per week opgeteld
Acceptabel	+	Verhoging van de capaciteit staat in het onderzoeksdoel
Realistisch	+	Eenvoudig bij te houden
Tijdsgebonden	+	Wordt een gemiddelde bepaald per week
Aantal uren gewerkt per week		
Specifiek	+	Het laat zien hoeveel arbeid er is besteed per week
Meetbaar	+	De uren van alle werknemers worden opgeteld
Acceptabel	+	Verlaging van arbeidstijd draagt bij aan het onderzoek
Realistisch	+	Eenvoudig bij te houden
Tijdsgebonden	+	Wordt een gemiddelde bepaald per week
Aantal minuten arbeidstijd per kilo		
Specifiek	+	Het laat zien hoeveel arbeid er is besteed per kilo
Meetbaar	+	Minuten arbeidstijd / Aantal kilo
Acceptabel	+	Verlaging van arbeidstijd draagt bij aan het onderzoek
Realistisch	+	Berekening moet regelmatig worden gedaan
Tijdsgebonden	+	Wordt een gemiddelde bepaald per week

Bijlage I: Procestijden van de productiestappen

Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Bijlage J: Productie weken 43 t/m 49 (2017)

Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Bijlage K: Code simulatiemodel

Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Bijlage L: Gewerkte uren per maand

Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Bijlage M: Output data bottleneck matrix

Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Bijlage N: Nieuwe overstapeltijden (interventie 4)

Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.

Bijlage O: Arbeidskosten per kilo product (interventie 5)

Deze gegevens zijn in dit rapport omwille van geheimhouding weggelaten.