

**Vertrouwelijk: Machine Learning voor het verlagen van
buffervoorraden**



Naam	Studentnummer	Eerste examiner	Bedrijf	Datum
S. A. Rang	1655299	Jos Schmeltz	EKB Houten	18-6-2018

VOORWOORD

MANAGEMENTSAMENVATTING

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Managementsamenvatting	3
Figuren- en Tabellenlijst	6
Afkortingenlijst	6
Begrippenlijst	7
1 Inleiding	8
2 Organisatorische Context	9
2.1 Het bedrijf	9
2.2 Bedrijfsgegevens	10
2.3 Persoonsgegevens	10
3 De Opdracht	11
3.1 De kwestie	11
3.2 De afstudeeropdracht in het kort	11
3.3 Doelstelling	11
3.4 Hoofdvraag en deelvragen	12
3.5 Onderzoeksmethoden	12
4 Theoretisch Kader	13
4.1 Tsubaki Nakashima	13
4.1.1 Rollenfabriek lay-out	13
4.1.2 Buffervoorraden	14
4.1.3 Omstellingen	14
4.2 EKB Manufacturing Intelligence	14
4.2.1 Overall Equipment Effectiveness	14
4.3 Theory of Constraints	16
4.3.1 Overeenkomsten met LEAN	17
4.4 Machine Learning	18
4.4.1 De perceptron	18
4.4.2 Neural Networks	18
4.4.3 Activation Functions	19
4.4.4 Genetic algorithms	20
4.4.5 Neuro Evolution of Augmenting Topologies	21
5 Onderzoek	23
5.1 Data onderzoek	23
5.1.1 Basis gegevens	23
5.1.2 Data uit EKB Manufacturing Intelligence	23
5.1.3 Uitzonderingen	24
5.1.4 Externe data	24
5.1.5 Conclusie	25
5.2 Simulatie onderzoek	26

5.2.1	Simulatiesoftware keuze	26
5.2.2	JaamSim	27
5.2.3	Conclusie.....	29
5.3	Theory of Constraints onderzoek	30
5.3.1	Drum-Buffer-Rope	30
Literatuur		31
Bijlagen		34
Bijlage A: Plan van Aanpak.....		34
Bijlage B: Simulatiesoftware requirements onderzoek		61

FIGUREN- EN TABELLENLIJST

FIGUUR 1: EKB ORGANOGRAM	9
FIGUUR 2: LAY-OUT ROLLENFABRIEK TSUBAKI NAKASHIMA.....	13
FIGUUR 3: EMI MODULES VAN DE ROLLENFABRIEK VAN TSUBAKI NAKASHIMA.....	14
FIGUUR 4: EMI OEE ANALYSE VAN DE ROLLENFABRIEK VAN TSUBAKI NAKASHIMA.....	15
FIGUUR 5: EMI OEE STATUS CATEGORIEËN VAN DE ROLLENFABRIEK VAN TSUBAKI NAKASHIMA.....	15
FIGUUR 6: DE VIJF FOCUSSTAPPEN VAN TOC	16
FIGUUR 7: AGILE SOFTWARE DEVELOPMENT CYCLE.....	17
FIGUUR 8: DE VIJF FASEN VAN LEAN	17
FIGUUR 9: PERCEPTRON.....	18
FIGUUR 10: PERCEPTRON OUTPUT FORMULE	18
FIGUUR 11: NEURAL NETWORK.....	19
FIGUUR 12: STANDAARD SIGMOÏD FORMULE	19
FIGUUR 13: PLOT VAN DE SIGMOÏD FORMULE.....	19
FIGUUR 14: PLOT VAN DE STANDAARD RELU	20
FIGUUR 15: PLOT VAN DE LEAKY RELU.....	20
FIGUUR 16: BASIS STRUCTUUR EN TERMINOLOGIE VAN GA'S.....	21
FIGUUR 17: AANVULLENDE MUTATIEMOGELIJKHEDEN VAN HET NEAT ALGORITME	22
FIGUUR 18: DATA UIT DE EMI DATABASE EN EXTERNE BRONNEN	24
FIGUUR 19: JAAMSIM GUI.....	27
FIGUUR 20: JAAMSIM CONTAINER OBJECTEN	29
FIGUUR 21: DRUM BUFFER ROPE-SCHEMA VAN DE TOC-IMPLEMENTATIE VAN COSTAS ET AL. (2015)	30
TABEL 1: BEDRIJFSGEGEVENS VAN EKB.....	10
TABEL 2: PERSOONSGEGEVENS VAN BETROKKENEN.....	10
TABEL 3: METHODEN MATRIX	12
TABEL 4: SIMULATIESOFTWARE REQUIREMENTS.....	26

AFKORTINGENLIJST

AFKORTING	UITLEG
EKB	Elektro Kasten Bouwen Industriële Automatisering is het afstudeerbedrijf. EKB heeft vestigingen in Houten, Beverwijk, Someren, Drachten en Haaksbergen. De afstudeerder heeft gewerkt bij de vestiging in Houten (voor meer informatie zie hoofdstuk 2.1)
EMI	EKB Manufacturing Intelligence is het software pakket van EKB waarmee gebruikers inzicht krijgen in de productiviteit en kwaliteit van industriële productieprocessen (voor meer informatie zie hoofdstuk 4.2)
GA	Genetic algorithm (voor de definitie zie paragraaf 4.4.4)
ML	Machine learning (voor de definitie zie hoofdstuk 4.4)
NEAT	Neuro Evolution of Augmenting Topologies (voor de definitie zie paragraaf 4.4.5)
OEE	Overall Equipment Effectiveness (voor de definitie zie paragraaf 4.2.1)
TN	Tsubaki Nakashima is een klant van EKB en heeft een rollenfabriek in Veenendaal die als business case voor deze afstudeerstage is gebruikt (voor meer informatie zie hoofdstuk 4.1)
TOC	Theory of Constraints (zie voor de definitie hoofdstuk 4.3)

BEGRIPPENLIJST

BEGRIJP	DEFINITIE
Buffervoorraden	De voorraad van producten of halffabricaten die staat te wachten tussen twee productielijnen tot ze verder verwerkt kunnen worden (voor meer informatie zie paragraaf 4.1.2)
Constraint	De zwakste schakel van een proces. Dit kan een productielijn, maar ook een beleid of werknemer zijn die de rest van de processen ophoudt.
Fitness	De score van een individu van een population
Population	De bevolking van een GA
Productielijn	Een serie geschakelde verzameling machines waarmee in een fabriek producten worden geproduceerd
Rol	Een stalen cilinder van variabele lengte en diameter die in de rollenfabriek van TN wordt geproduceerd
Stilstand	Een tijdsperiode waarin een productielijn niet kan produceren
Uitval	Geproduceerde producten die zijn afgekeurd en niet verkocht kunnen worden

1 INLEIDING

2 ORGANISATORISCHE CONTEXT

In dit hoofdstuk wordt het afstudeerbedrijf geïntroduceerd en wordt de rol van de afstudeerder binnen de organisatie beschreven. Daarnaast zijn de bedrijfs- en persoonsgegevens opgenomen.

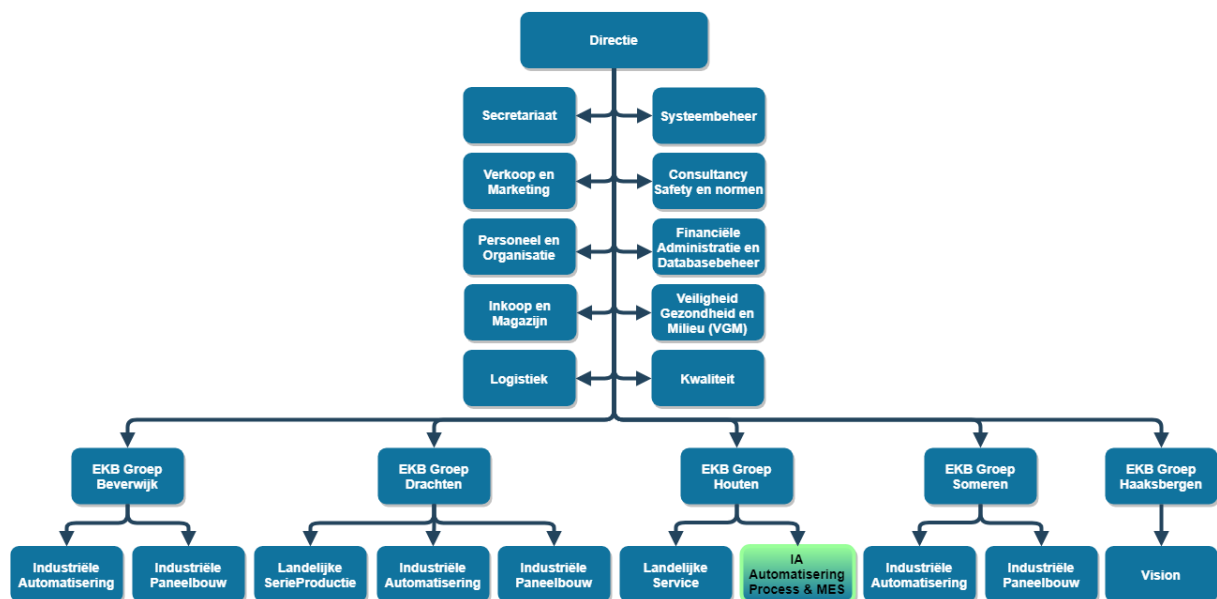
2.1 Het bedrijf

Elektro Kasten Bouwen Industriële Automatisering (EKB) is actief op het gebied van industriële automatisering en richt zich vooral op het aaneensluiten en implementeren van processen hierbinnen.

Met 200 medewerkers verdeeld over vijf vestigingen bieden zij automatiseringsoplossingen voor de Nederlandse industrie.

EKB realiseert industriële automatiseringsprojecten voor de Nederlandse eindgebruikers en machinebouwers. EKB is vooral actief in de sectoren metaal, voedingsmiddelen, offshore en fijn chemie.

Het organogram van EKB is weergegeven in Figuur 1. Binnen de organisatie werkt de afstudeerder op de Manufacturing Execution Systems (MES) afdeling van software engineering in Houten. Andere onderdelen van EKB zijn industriële automatisering, industriële paneelbouw, service en vision. Deze onderdelen worden voornamelijk bij de andere vestigingen (Drachten, Someren, Haaksbergen en Beverwijk) tot uitvoer gebracht.



Figuur 1: EKB organogram

Noot. Aangepast van "EKB Groep (Totaal)", door EKB, 2017, 21 februari. Geraadpleegd op 24 mei 2018, van <http://intranet.ekb.nl/Documenten%20Personeelszaken/Organogrammen%20EKB%20Groep.pdf>

2.2 Bedrijfsgegevens

Tabel 1: Bedrijfsgegevens van EKB

NAAM	ADRES	POSTCODE	TELEFOON	WEBSITE
EKB	Meidoornkade 19	3992 AG Houten	+31 30 711 14 80	http://www.ekb.nl/nl/home/

2.3 Persoonsgegevens

Tabel 2: Persoonsgegevens van betrokkenen

NAAM	FUNCTIE	E-MAILADRES	TELEFOON	LINKEDIN
S. A. Rang	Afstudeerder	stefan.rang@student.hu.nl	+31 6 34 10 04 29	https://www.linkedin.com/in/stefan-rang-8b0635101/
J. Schmeltz	Eerste examiner	jos.schmeltz@hu.nl	onbekend	onbekend
F. Verbruggen	Docentbegeleider/ Tweede examiner	frank.verbruggen@hu.nl	+31 6 12 20 22 74	https://www.linkedin.com/in/frank-verbruggen-5080a720/
A. Roelofsen	Bedrijfsbegeleider	a.roelofsen.ekb.nl	+31 6 20 96 48 14	https://www.linkedin.com/in/auke-roelofsen-273b7918/
M. de Lange	Product owner	m.de.lange@ekb.nl	+31 6 51 83 97 90	https://www.linkedin.com/in/michiel-de-lange-a1b04b3/
G. Bargeman	Contactpersoon Tsubaki Nakashima	ger.bargeman@europe.tsubaki-nakashima.com	+31 6 24 36 58 85	https://www.linkedin.com/in/ger-bargeman-b3332a14/
M. Kok	Software engineer	m.kok@ekb.nl	+31 6 12 60 62 73	https://www.linkedin.com/in/maarten-kok-316374109/

3 DE OPDRACHT

Een afstudeeropdracht ontstaat vaak uit een probleem of te benutten kans van een bedrijf. In het geval van deze afstudeeropdracht gaat het om een probleem van een klant van EKB.

3.1 De kwestie

Sinds 2009 ontwikkelt EKB een eigen softwarepakket genaamd EKB Manufacturing Intelligence (EMI), gericht op industriële toepassing. EMI is vooral bedoeld om inzicht te krijgen in de productiviteit en kwaliteit van industriële productieprocessen. Deze data worden op dit moment voornamelijk gebruikt om een overzichtelijk beeld te krijgen van de huidige situatie, maar nog niet om bepaalde productieprocessen te optimaliseren.

Vanaf de start van de ontwikkeling van EMI is er vanuit de industrie aangegeven dat er in toenemende mate beheer en sturing van interne buffervoorraden gewenst wordt. Hierbij wordt geëist dat Theory of Constraints (TOC) wordt toegepast in combinatie met machine learning (ML).

Als business case voor deze afstudeeropdracht wordt de data van de rollenfabriek van Tsubaki Nakashima (TN), een klant van EKB, te Veenendaal gebruikt. De buffervoorraden worden daar momenteel beheerd op basis van ervaring. Het is niet duidelijk hoe de buffervoorraden tussen de productielijnen zo afgestemd kunnen worden dat de voorraden verminderen terwijl de productie vergroot wordt. Dit is een van de doelen van TOC.

3.2 De afstudeeropdracht in het kort

Het verlagen van de buffervoorraden zorgt indirect voor kostenvermindering. Volgens Goldratt en Cox (2007) resulteert het verlagen van de voorraden echter alleen in een verhoging van de winst als ook de productie verhoogd wordt. Om dit te bereiken moeten dus zowel de verlaging van de buffervoorraden als de verhoging van de productie even zwaar meetellen.

Naast een verbredend en kritisch onderzoek naar TOC, ML en de huidige situatie bij TN welke EKB van de student eist, dient de student een werkend product op te leveren waarin daadwerkelijk TOC toegepast en aantoonbaar gemaakt is voor de gebruiker. De afstudeerstage betreft dan ook een productopdracht.

Omdat het onduidelijk is hoe zowel de buffervoorraden te verlagen als de productie te verhogen zal ML worden gebruikt om een algoritme tot stand te laten komen te op basis van een fabriekssimulatie de hoogtes van de buffervoorraden af kan wegen. Om dit te kunnen implementeren in EMI moet echter wel eerst worden onderzocht hoe de simulatie opgezet kan worden zodat deze generiek gebruikt kan worden voor andere klanten van EKB.

3.3 Doelstelling

De te bouwen uitbreiding van EMI moet ervoor gaan zorgen dat klanten van EKB hun buffervoorraden zo laag mogelijk kunnen houden terwijl de productie zo hoog mogelijk is.

Middels de beschikbare data in EMI, de simulatie en het ML algoritme moet het mogelijk worden de doorlooptijden van halffabricaten te verminderen. Hierdoor worden de voorraden tussen de verschillende productielijnen kleiner en verminderen de kosten per product.

3.4 Hoofdvraag en deelvragen

Uitgaande van de opdrachtschrijving van EKB is de volgende hoofdvraag geformuleerd:

Hoe kunnen machine learning algoritmes, gericht op Theory of Constraints, in EMI worden geïmplementeerd om de buffervoorraden van EKB klanten te verminderen?

Hoofdvraag decompositie

Om een ML algoritme te kunnen trainen zijn er allereerst een of meerdere relevante datasets nodig. Het is dus van belang dat er eerst onderzocht wordt welke data er nodig zijn. Om het eindproduct onafhankelijk van andere software te houden moet de data zoveel mogelijk uit de EMI database komen.

Om de ML algoritmes in de praktijk toe te kunnen passen moet de training worden gedaan in een simulatie. Hiervoor zullen meerdere simulatie-softwarepakketten worden vergeleken op requirements.

Voordat de simulaties met de verschillende algoritmes van start kunnen gaan moet eerst duidelijk worden hoe TOC toegepast kan worden. Hoe hebben andere bedrijven en afstudeerders de buffervoorraden proberen te verlagen met TOC? Met deze kennis kunnen de initiële parameters van de algoritmes worden ingesteld.

Voor en tijdens de implementatie in EMI zal er ook worden onderzocht welke architectuur het beste gebruikt kan worden. Na de implementatie kunnen de simulaties gestart worden. Deze simulaties resulteren in een verzameling van buffervoorraadgroottes die niet op basis van ervaring tot stand zijn gekomen, maar op basis van algoritmes.

De hieruit voortvloeiende deelvragen zijn als volgt:

- 1 Welke data uit EMI en externe data zijn er nodig om simulaties uit te kunnen voeren?
- 2 Welk simulatie-softwarepakket is het meest geschikt om in EMI te implementeren?
- 3 Hoe hebben anderen met Theory of Constraints de buffervoorraden verlaagd?
- 4 Welke soorten machine learning algoritmes zijn geschikt om in combinatie met Theory of Constraints toe te passen?
- 5 Welke architectuur is het meest geschikt om de machine learning algoritmes volgens de randvoorwaarden en requirements in EMI te implementeren?

3.5 Onderzoeksmethoden

Per deelvraag is in Tabel 3 vastgesteld welke onderzoeksmethoden gebruikt zullen worden.

Tabel 3: Methoden matrix

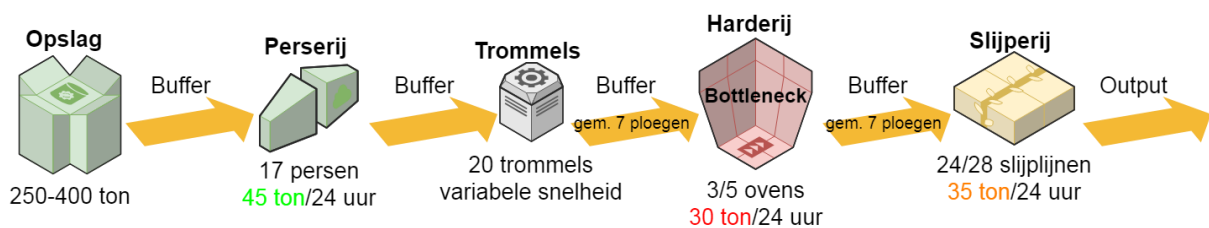
DEELVRAAG	KWALITATIEF OF KWANTITATIEF?	ONDERZOEKSMETHODE	RESULTAAT
Welke data uit EMI en externe data zijn er nodig om simulaties uit te kunnen voeren?	Kwantitatief	Deskresearch	Verzameling van data waar het algoritme op kan trainen
Welk simulatie-softwarepakket is het meest geschikt om in EMI te implementeren?	Kwalitatief	Exploratief onderzoek / veldonderzoek	Een simulatie-softwarepakket
Hoe hebben anderen met Theory of Constraints de buffervoorraden verlaagd?	Kwalitatief	Deskresearch	Een of meerdere toepassingen van TOC ter inspiratie voor dit onderzoek
Welke soorten machine learning algoritmes zijn geschikt om in combinatie met Theory of Constraints toe te passen?	Kwantitatief	Experimenteel onderzoek / laboratorium onderzoek / vergelijkend onderzoek	Een of meerdere algoritmes die gebruikt kunnen worden voor het eindproduct
Welke architectuur is het meest geschikt om de machine learning algoritmes volgens de randvoorwaarden en requirements in EMI te implementeren?	Kwalitatief	Deskresearch	Architectuur voor het eindproduct

4 THEORETISCH KADER

Dit hoofdstuk is bedoeld om meer inzicht te geven in onderwerpen die in dit onderzoek veelvoorkomend zijn. Zowel voorkennis als vergaarde kennis uit het vooronderzoek is hierin verwerkt.

4.1 Tsubaki Nakashima

Deze afstudeeropdracht is uitgevoerd met de data van de rollenfabriek van TN te Veenendaal. Deze rollenfabriek maakt stalen cilindrische lagers voor onder andere auto onderdelen en hydraulische apparaten en is onderverdeeld in vijf hallen zoals te zien is in Figuur 2. Dit figuur is het resultaat van meerdere gesprekken met de contactpersoon bij TN. Hieronder volgt een samenvatting van deze gesprekken (G. Bargeman, persoonlijke communicatie, 14 februari 2018, 22 februari 2018 en 2 maart 2018).



Figuur 2: Lay-out rollenfabriek Tsubaki Nakashima

4.1.1 Rollenfabriek lay-out

In de eerste hal wordt het staal in haspels opgeslagen met een totale capaciteit tussen de 250 en 400 ton staalhaspels.

In de tweede hal worden de staalhaspels in de zeventien parallelle persmachines geladen waar ze worden geperst in kleine cilinders met een gemiddelde snelheid van 45 ton per 24 uur. Elke persmachine heeft haar eigen marges met betrekking tot de lengte en diameter van deze cilinders en staalhaspels. Vanaf dit moment spreekt TN van 'rollen' in plaats van staalhaspels en cilinders. De rollen worden na de perserij vervoerd per 500 kg in containers waarvan de rollenfabriek er in totaal 475 bezit.

In de derde hal worden de rollen geschuurd in twintig zogeheten 'trommels' die net als de persmachines parallel draaien. Een trommel verwerkt per keer een batch van 500 kg rollen (een container per keer). De snelheid waarmee getrommeld wordt is variabel en afhankelijk van de lengte en diameter van de rol en de kwaliteit van de voorgaande persmachine. Deze twintig trommels zijn tot nu toe altijd in staat geweest de buffervoorraden tussen de persen en de trommels laag te houden en vormen dan ook geen probleem voor TN.

De vierde hal bevat vijf ovens waar de geschuurde rollen gehard worden op hoge temperatuur. Ook dit gebeurt per container van 500 kg. Ondanks dat de ovens niet serie geschakeld zijn en bijna elk type rol kunnen verwerken, zijn dit toch de constraints van de rollenfabriek vanwege de lage productiesnelheid. Daarnaast wordt er maar van drie van de vijf ovens data geregistreerd door EKB.

In de vijfde en laatste hal worden de containers geleegd in de slijperij en worden de rollen in de definitieve vorm geslepen door 28 slijplijnen. Deze productielijnen bestaan uit een aantal verschillende machines die serie geschakeld zijn, maar de slijplijnen als geheel zijn parallel geschakeld. Ook hebben de slijplijnen net als in de perserij ieder een marge voor bepaalde rollen.

4.1.2 Buffervoorraden

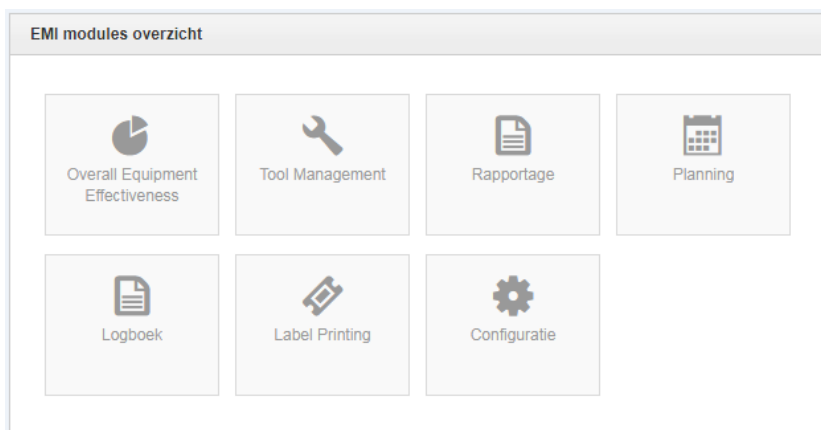
Tussen de hallen bevinden zich de buffervoorraden. Dit zijn voorraden van containers met rollen die nog verwerkt moeten worden door de volgende hal. In het geval van de buffervoorraden tussen de opslag en de perserij zijn dit echter geen containers maar staalhaspels. De buffervoorraden voor en na de harderij zijn in de huidige situatie gemiddeld zeven ploegen groot. Een ploeg is een maatstaf van TN die gebruikt wordt om aan te geven dat een bepaalde hoeveelheid rollen er acht uur over doet om verwerkt te worden in de slijperij. De gemiddelde buffervoorraad rollen die voor en na de harderij aanwezig zijn duren dus 56 uur om verwerkt te worden door de slijperij.

4.1.3 Omstellingen

Bepaalde productielijnen kunnen meerdere verschillende producten produceren. Door een productielijn om te stellen kan er een ander product worden geproduceerd. Een omstelling kan echter uren duren. Het is daarom voor TN van groot belang dat het aantal omstellingen minimaal is.

4.2 EKB Manufacturing Intelligence

EKB Manufacturing Intelligence is de applicatie waarin de software van deze afstudeeropdracht geïmplementeerd is. Het bevat de modules Overall Equipment Effectiveness (OEE), Tool Management, Rapportage, Planning, Logboek, Label Printing en Configuratie zoals te zien in Figuur 3.



Figuur 3: EMI modules van de rollenfabriek van Tsubaki Nakashima
Noot. Rang, S. A. (2018, 3 april). EMI modules van de rollenfabriek van Tsubaki Nakashima [Foto], Geraadpleegd van http://emi-demo.ekb.nl/EMI_NNN/Default.aspx¹

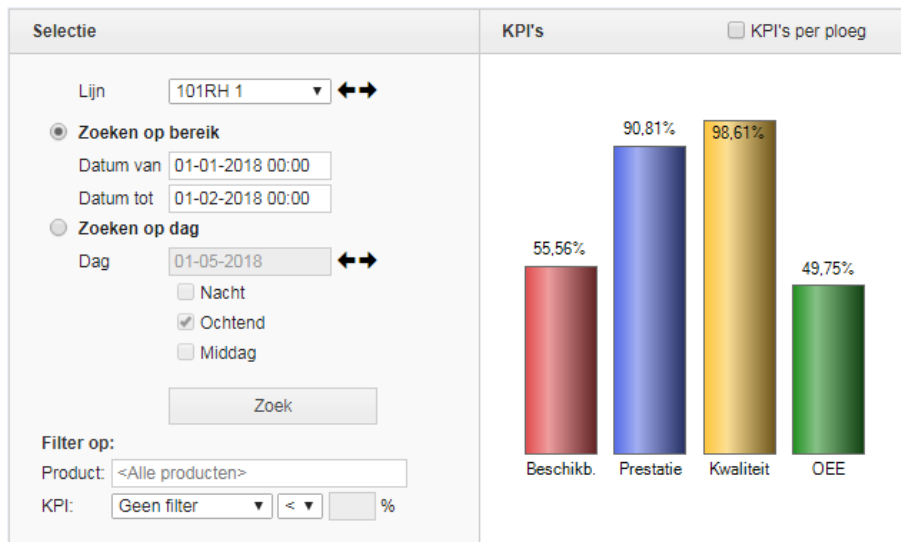
EMI communiceert met een SQL Server database waarin voor elke klant van EKB data voor deze zeven modules gestandaardiseerd worden bijgehouden. Deze standaardisatie heeft bijgedragen aan het generiek houden van de software.

4.2.1 Overall Equipment Effectiveness

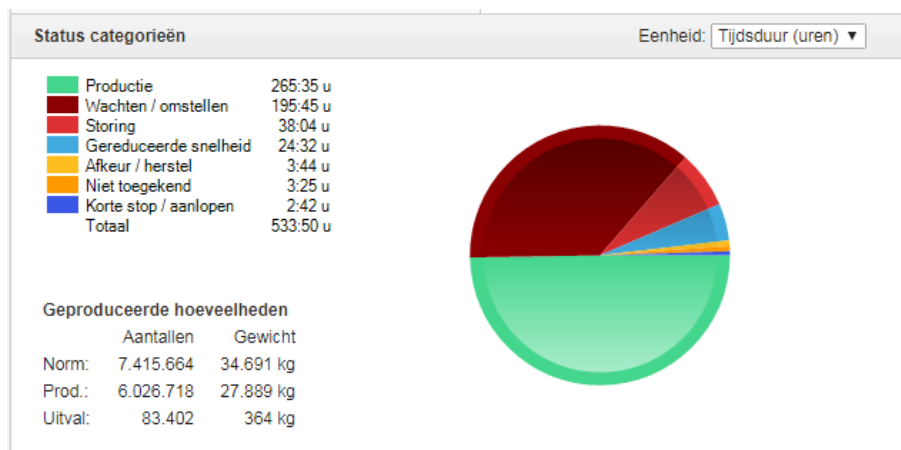
In Figuur 4 is een voorbeeld van de OEE analyse in EMI te zien van een persmachine genaamd '101RH1'. De rode staaf van de KPI's is de beschikbaarheid van de machine, oftewel het percentage van de geselecteerde tijdsperiode dat er daadwerkelijk is geproduceerd. In Figuur 5 zijn de status categorieën te zien. De beschikbaarheid KPI wordt berekend door de status categorieën 'wachten/omstellen', 'storing' en 'niet toegekend' te delen door het totaal aantal uren en dit percentage van 100% af te trekken. Ook is er nog een onzichtbare status categorie 'Uit bedrijf'. Bij TN draait alleen de harderij in het weekend en zijn de perserij en de slijperij in het weekend uit bedrijf. Deze 'Uit bedrijf'-tijd wordt niet bij de status categorie 'totaal' meegerekend.

¹ Bron afkomstig van de EMI software (niet publiekelijk toegankelijk) van EKB.

De blauwe KPI-staaf is de prestatie van de machine. Een prestatie van 50% betekent dat de machine gemiddeld op de helft van de norm-snelheid heeft gedraaid gedurende de tijd dat de machine niet stil stond. De status categorieën 'gereduceerde snelheid' en 'korte stop / aanlopen' vallen onder de prestatie KPI.



Figuur 4: EMI OEE analyse van de rollenfabriek van Tsubaki Nakashima
 Noot. Rang, S. (2018, 3 april). EMI OEE analyse van de rollenfabriek van Tsubaki Nakashima [Foto], Geraadpleegd van http://emi-demo.ekb.nl/EMI_NNN/OEE/OEEAnalyse.aspx²



Figuur 5: EMI OEE status categorieën van de rollenfabriek van Tsubaki Nakashima
 Noot. Rang, S. (2018, 3 april). EMI OEE analyse van de rollenfabriek van Tsubaki Nakashima [Foto], Geraadpleegd van http://emi-demo.ekb.nl/EMI_NNN/OEE/OEEAnalyse.aspx²

De gele KPI-staaf is de kwaliteit van productie op de machine. Deze KPI geeft het percentage aan van de hoeveelheid geproduceerde producten die niet behoren tot de 'afkeur/herstel'-status categorie.

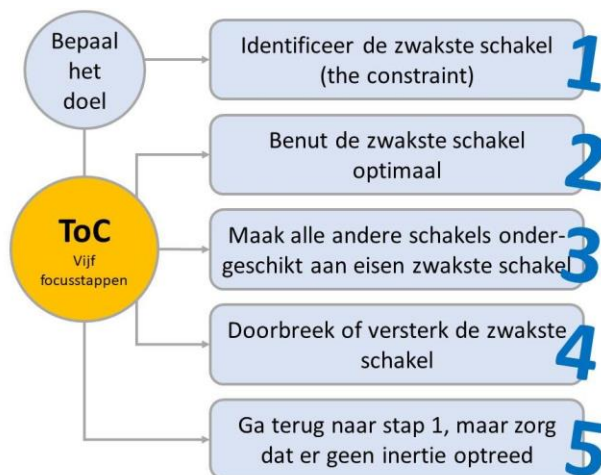
Tot slot worden de beschikbaarheid-, prestatie- en kwaliteit- KPI's respectievelijk vermenigvuldigd. Dit resulteert in de OEE-KPI (de groene staaf). De OEE kan ook worden berekend door de status categorie 'productie' te delen door de status categorie 'totaal' (ook weer exclusief de 'Uit bedrijf' status categorie).

² Bron afkomstig van de EMI software (niet publiekelijk toegankelijk) van EKB.

4.3 Theory of Constraints

In 2000 schreef Goldratt het boek *'Het Doel'* waarin de basisprincipes van TOC op spannende wijze worden verteld. Volgens een samenvatting van Goldratt en Cox (2007) gaat dit boek over een manager die zijn fabriek wil verbeteren. De manager komt erachter dat lokale verbeteringen irrelevant zijn en dat alleen verbeteringen aan de constraint effect hebben op de prestatie van de fabriek. Alle andere processen zijn afhankelijk van de constraint.

Volgens Procesverbeteren.nl (2017) is TOC, net als LEAN, een logistieke verbetermethode om kortere doorlooptijden te bereiken. TOC wordt vaak samengevat in de formule: $T = I - OE$. Hierbij staat 'T' voor 'Throughput', oftewel de doorlooptijd. De 'I' staat voor voorraad (inventory). Inventory bestaat in de context van TOC uit alle investeringen in dingen die een bedrijf later wil verkopen. 'OE' zijn de 'Operational Expenses', de kosten die een bedrijf maakt om inventory om te zetten in throughput. TOC kan worden toegepast in vijf stappen (Figuur 6).

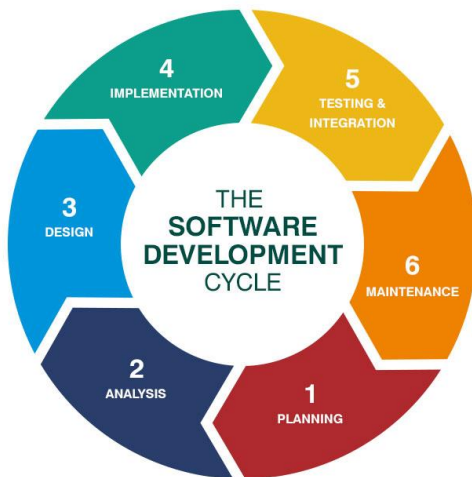


Figuur 6: De vijf focusstappen van TOC

Noot. Herdrukt van "Theory of Constraints: Goldratt", door Managementmodellensite.nl, (2018). Geraadpleegd van https://managementmodellensite.nl/theory-constraints-goldratt/#.WxY_VO6FPRZ

De eerste stap van TOC is het identificeren van de zwakste schakel, de constraint. In het geval van software development is dit de implementatie (Figuur 7). Dit proces duurt het langst en houdt de processen testen & integratie en onderhoud op.

Stap twee is het optimaal benutten van de constraint. Volgens Goldratt en Cox (2007) kan dit door meer personeel aan te nemen, een nieuw beleid voor bijvoorbeeld pauzes en door de constraint altijd te bemannen. Dit laatste is meestal al van kracht bij software development. Het vinden van goede software developers is in Nederland echter nog steeds een lastige taak. Steeds meer bedrijven zijn bereid flink te investeren in detachering of recruitment om aan nieuw personeel te komen.



Figuur 7: Agile software development cycle

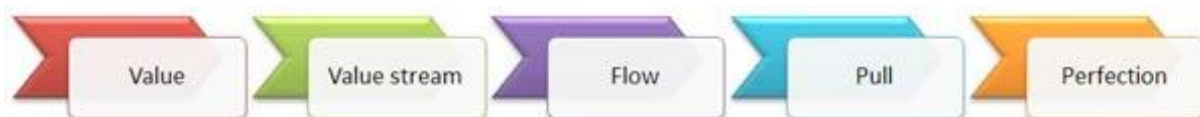
Noot. Herdrukt van "What Is the Software Development Life Cycle?", door Hussung, T., (2016, 10 maart). Geraadpleegd van <https://online.husson.edu/software-development-cycle/>

Stap drie, het ondergeschikt maken van alle andere schakels aan de eisen van de zwakste schakel. Anders gezegd, alle andere schakels helpen de zwakste schakel. In de software development cyclus zou dit kunnen worden bereikt door de SCRUM-projecttechniek toe te passen waarbij scrummeetings centraal staan. Ook wordt hiermee stap vier van TOC toegepast, het doorbreken of versterken van de zwakste schakel. Volgens Goldratt en Cox (2007) kan de doorlooptijd worden verminderd door het werk op te delen in stukken; sprints in deze context.

Tot slot worden alle stappen herhaald voor de nieuwe constraint die is ontstaan. Het zou kunnen zijn dat de analyse-fase in het slop is geraakt omdat de focus volledig op de implementatie-fase is gericht. Wel moet er worden voorkomen dat er inertie optreedt, oftewel dat er altijd volgens een vaste werkwijze wordt gewerkt en invloeden van buitenaf geen effect hebben hierop. Een organisatie moet altijd rekening blijven houden met haar klanten en de werkwijze hierop aanpassen.

4.3.1 Overeenkomsten met LEAN

Goldratt heeft zijn TOC gebaseerd op LEAN. Er zijn dan ook een aantal overeenkomsten tussen TOC en LEAN op te noemen. Volgens LeanSixSigma (2018) gaat LEAN, net als TOC om het constant verbeteren van processen. LEAN heeft ook een vijfstappenplan welke steeds worden herhaald (Figuur 8).



Figuur 8: De vijf fasen van LEAN

Noot. Herdrukt van "Wat is Lean?", door LeanSixSigma, (2018). Geraadpleegd van <https://www.sixsigma.nl/wat-is-lean>

De definities van de vijf fasen van LEAN zijn volgens Procesverbeteren.nl (2017):

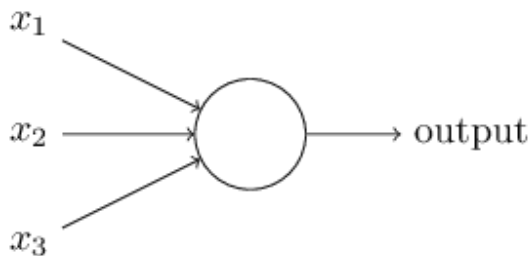
1. 'Value', het identificeren welke producten en diensten de klant van waarde vindt
2. 'Value stream', het identificeren van bedrijfsprocessen met toegevoegde waarde en het elimineren van verliezen die van invloed zijn op de doorlooptijd
3. 'Flow', het zorgen voor stroming en betere doorlooptijden. Hiervoor kan TOC worden toegepast.
4. 'Pull', het vraaggestuurd maken van de productie. Bij TOC heet dit de 'drum-buffer-rope' (Goldratt & Cox, 2007).
5. 'Perfection', net als bij TOC wordt er steeds teruggekeerd naar fase 1 met het doel om perfectie te bereiken.

4.4 Machine Learning

ML is een tak van Artificial Intelligence die gebruikt is om TOC te implementeren in EMI. ML wordt al sinds de jaren vijftig gebruikt en is sindsdien uitgegroeid tot een onmisbare technologie voor techgiganten als Google, Microsoft en Apple.

4.4.1 De perceptron

Aan de basis van ML staan zogeheten Neural Networks. Dit zijn simpele netwerken die outputs berekenen door het vermenigvuldigen van inputs. De meest simpele vorm hiervan is een perceptron. Volgens Nielsen (2017) kan een perceptron een output berekenen van 0 (uit) of 1 (aan) door een aantal berekeningen te doen op de inputs. In Figuur 9 wordt een perceptron weergegeven. x_1 , x_2 en x_3 zijn de drie inputs van deze perceptron.



Figuur 9: Perceptron

Noot. Herdrukt van "Using neural nets to recognize handwritten digits", door Nielsen, M., (2017, december). Geraadpleegd van <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/chap1.html>

$$\text{output} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_j w_j x_j \leq \text{threshold} \\ 1 & \text{if } \sum_j w_j x_j > \text{threshold} \end{cases}$$

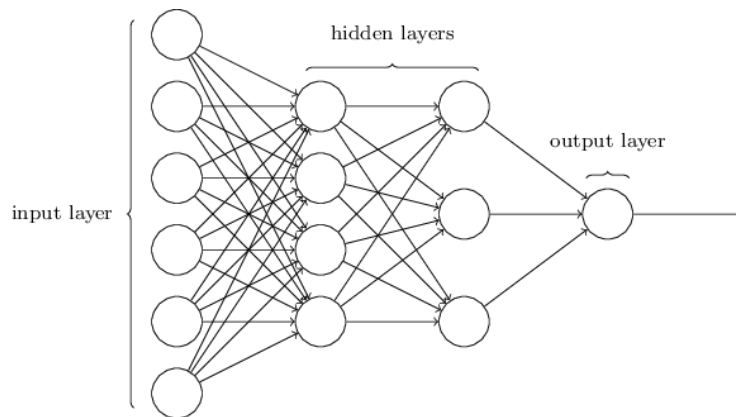
Figuur 10: Perceptron output formule

Noot. Herdrukt van "Using neural nets to recognize handwritten digits", door Nielsen, M., (2017, december). Geraadpleegd van <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/chap1.html>

De output van de perceptron is te berekenen met de formule van Figuur 10. Elke lijn van de inputs van Figuur 9 is een 'weight' (w in Figuur 10). Dit is in essentie een getal, meestal tussen de -5 en 5 waarmee de input vermenigvuldigd wordt. Alle drie inputs worden vermenigvuldigd met de bijbehorende weight. Deze drie uitkomsten worden bij elkaar opgeteld. Als de uitkomst hiervan boven de threshold ligt, is de output van de perceptron 1 en anders 0. De threshold is een nummer die per perceptron anders kan zijn en is een parameter van de perceptron. De 'j' in de formule van Figuur 10 is het nummer van de input x .

4.4.2 Neural Networks

Een neural network is een netwerk bestaande uit lagen van perceptrons. In Figuur 11 is te zien dat een neural network bestaat uit een input laag, een of meerdere verborgen lagen en een output laag van perceptrons. De perceptrons van de input laag krijgen hun inputs van de buitenwereld. Deze inputs kunnen dus worden gezien als een vector die als input van het neural network dient. Om de output van het neural network te berekenen worden per laag de outputs van de betreffende perceptrons berekend. De outputs van de eerste laag worden de inputs van de perceptrons in de tweede laag enzovoort. Uiteindelijk resulteert dit in een of meerdere outputs van het neural network, afhankelijk van het aantal perceptrons in de laatste laag.



Figuur 11: Neural Network

Noot. Herdrukt van "Using neural nets to recognize handwritten digits", door Nielsen, M., (2017, december). Geraadpleegd van <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/chap1.html>

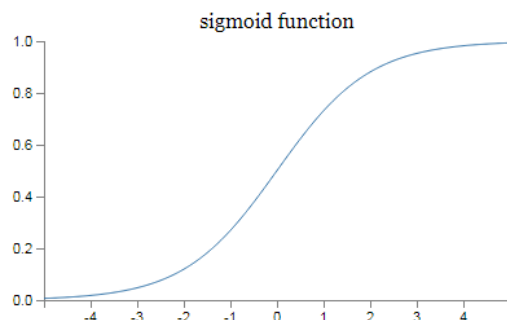
In het geval van neural networks wordt echter vaak de term '*neuron*' gebruikt in plaats van perceptron. Naast de waarde (x) en de bijbehorende weights (w_n) heeft een neuron ook een *bias*. Dit is een extra variabele die wordt opgeteld bij de output van de neuron. Hierna wordt nog een extra berekening gedaan, de *activation function*.

4.4.3 Activation Functions

In plaats van een threshold heeft een neuron een activation function om de output te berekenen. Een veelvoorkomende activation function is de *sigmoid* (Figuur 12). Het resultaat van de standaard sigmoid formule ligt altijd tussen de 0 en 1 zoals te zien is in de plot van Figuur 13. Een neuron kan door de activation function ook gedeeltelijk aan staan, wanneer de output niet exact 0 of 1 is.

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Figuur 12: Standaard sigmoid formule

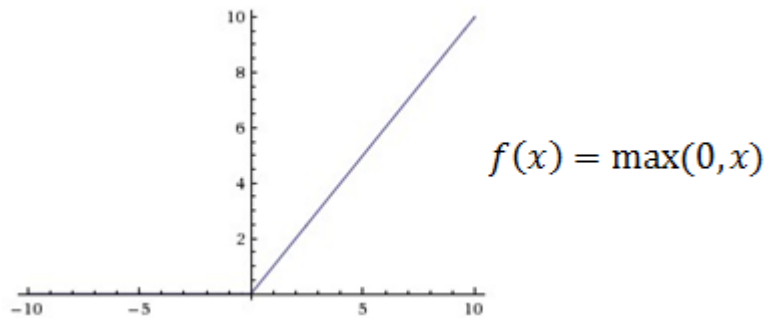


Figuur 13: Plot van de sigmoid formule

Noot. Herdrukt van "Using neural nets to recognize handwritten digits", door Nielsen, M., (2017, december). Geraadpleegd van <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/chap1.html>

Volgens Rojas (1996) is het noodzakelijk om een functie te gebruiken met een gelijkmatige helling om te zorgen dat het ML algoritme de weights van de neurons ook gelijkmatig kan veranderen en zo langzaam bij het gewenste resultaat kan komen.

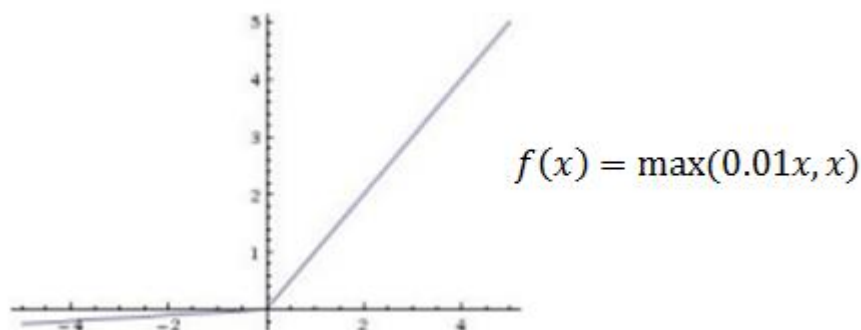
Een andere activation function die steeds vaker gebruikt wordt is de *Rectified Linear Unit (ReLU)*. Het resultaat van de ReLU formule is 0 voor alle negatieve waarden en verandert niets aan de positieve waarden (Figuur 14).



Figuur 14: Plot van de standaard ReLU

Noot. Aangepast van "Rectified-Linear unit Layer", door Santos, L., (2018). Geraadpleegd van https://leonardoaraujosantos.gitbooks.io/artificial-intelligence/content/relu_layer.html

In 2017 onderzocht Sharma de voor- en nadelen van de ReLU formule. Een belangrijk voordeel is dat de negatieve waarden niet doorberekend hoeven te worden, omdat ze altijd 0 worden. Dit is van positieve invloed op de snelheid waarmee het neural network berekend wordt. Een nadeel van de ReLU formule is dat de formule geen helling heeft voor negatieve waarden. De helling van de activation function is de reden dat neural networks langzaam bij het beoogde doel komen. Zodra een neuron een negatieve output heeft, is de helling van de ReLU formule 0 en verandert de output van de neuron niet meer. Volgens Sharma (2017) heet dit het '*stervende ReLU probleem*'. De neurons die dit probleem ervaren zijn niet meer van nut voor het neural network. Door een aangepaste ReLU formule te gebruiken kan dit worden opgelost. Deze formule heet de *leaky ReLU* (Figuur 15) en is voor positieve waarden hetzelfde als de standaard ReLU. Voor negatieve waarden is de helling niet 0 maar 0,01. Hiermee is het stervende ReLU probleem verholpen.



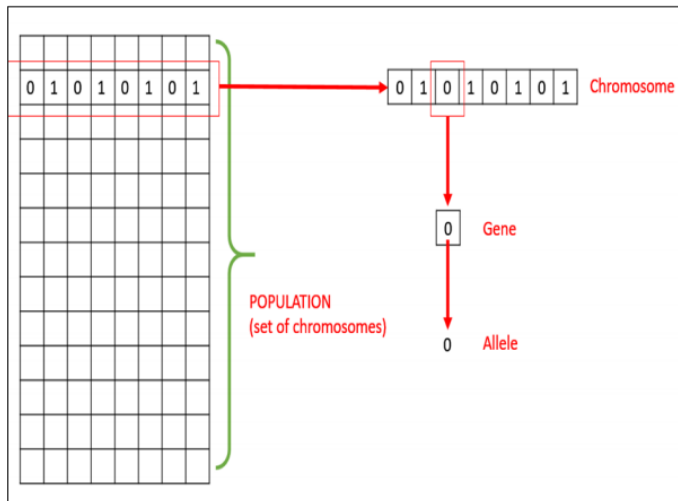
Figuur 15: Plot van de leaky ReLU

Noot. Aangepast van "Deep Learning Class #1 – Go Deep or Go Home", door Monier, L., (2016). Geraadpleegd van <https://www.slideshare.net/holbertonschool/deep-learning-keynote-1-by-louis-monier>

Nog een andere activation function is de hyperbolische tangens $f(x) = \tanh(x)$ wat eigenlijk een variatie is op de sigmoïd formule, want $\tanh(x) = 2\sigma(2x) - 1$. Het verschil is dat de resultaten van deze formule tussen de -1 en 1 liggen en dat de helling twee keer steiler is.

4.4.4 Genetic algorithms

Volgens Tutorials Point (I) Pvt. Ltd.. (2016) is een Genetic Algorithm (GA) een algoritme dat gebaseerd is op natuurlijke selectie in de natuur en is nog steeds een van de beste ML algoritmes. Een GA heeft net als in de natuur een bevolking of '*population*'. Deze population ondergaat recombinaties en mutaties van genen. Deze genetische veranderingen resulteren in een nieuwe generatie van de bevolking. In de terminologie van GA's heten de leden van de bevolking '*chromosomen*'. Deze chromosomen worden ieder op basis van hun resultaten gescoord. Deze score heet de '*fitness*' en wordt gebruikt om te bepalen welke chromosomen reproduceren voor de volgende generatie. In Figuur 16 wordt een overzicht van een GA weergegeven.



Figuur 16: Basis structuur en terminologie van GA's

Noot. Herdrukt van "Genetic Algorithms", door Tutorials Point (I) Pvt. Ltd., (2016). Geraadpleegd van https://www.tutorialspoint.com/genetic_algorithms/genetic_algorithms_tutorial.pdf

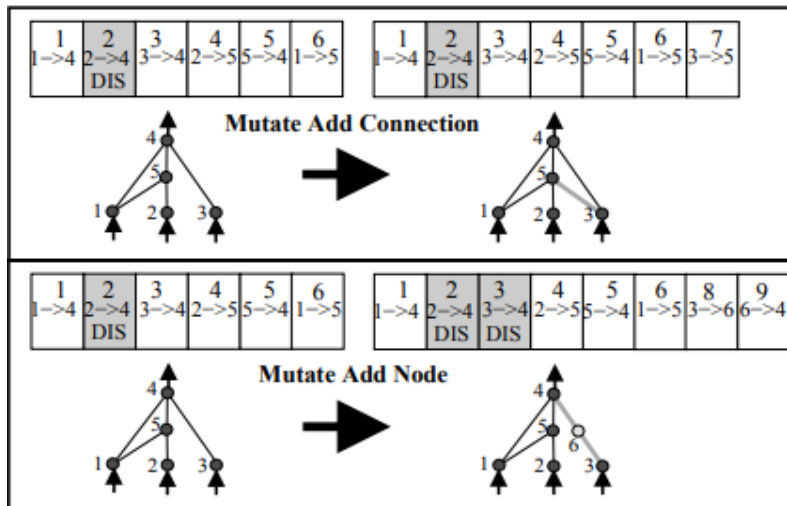
Een voordeel van GA's is dat de hele population parallel kan worden gescoord, omdat het probleem wat opgelost moet worden voor de hele population hetzelfde is. Ook is het eindresultaat van een GA niet een enkele oplossing, maar een hele verzameling van oplossingen die allemaal net iets anders zijn dan de rest. Een GA is echter niet geschikt voor problemen die te simpel zijn of waarvan de oplossing al bekend is. Voor dit soort problemen is een neural network een betere oplossing.

4.4.5 Neuro Evolution of Augmenting Topologies

In 2004 ontwierp Stanley een combinatie tussen een neural network en GA's en noemde dit nieuwe algoritme Neuro Evolution of Augmenting Topologies (NEAT). De recombinaties en mutaties zoals bij GA's gebeurt wordt bij NEAT op dezelfde manier toegepast op de weights van de neural networks. Bij NEAT bestaat de population uit neural networks die kunnen worden gezien als de chromosomen. Naast de recombinaties en mutaties van weights zijn er nog twee manieren van mutatie (Figuur 17).

Ten eerste kan er een nieuwe weight-lijn worden aangemaakt tussen twee neurons die nog niet met een weight-lijn verbonden waren. Dit is mogelijk omdat de neurons van de neural networks in de eerste generatie niet allemaal met elkaar verbonden zijn. Ten tweede kan er een nieuwe neuron worden aangemaakt die een bestaande weight-lijn in tweeën splitst. Deze neuron kan dan in een latere generatie door mutatie weer met andere neurons verbonden worden. Zo worden de neural networks langzaam groter en kunnen ze steeds complexere problemen oplossen.

Stanley (2004) heeft naast de bestaande inspiraties uit de natuur voor GA's nog een nieuwe toepassing. Om ervoor te zorgen dat de variëteit van de neural networks hoog blijft wordt de population gegroepeerd op een vergelijkbare manier als diersoorten. De groepering vindt plaats op basis van het verschil in structuur en weights van de neural networks. De groepen neural networks evolueren onafhankelijk van elkaar waardoor elke groep compleet anders kan zijn. Hierdoor wordt er met NEAT vaak sneller een oplossing gevonden dan met een standaard GA. Dit blijkt ook uit de experimenten van NEAT door K. O. Stanley.



Figuur 17: Aanvullende mutatiemogelijkheden van het NEAT algoritme

Noot. Herdrukt van "Efficient Evolution of Neural Networks through Complexification", door Stanley, K., (2004). Geraadpleegd van <http://nn.cs.utexas.edu/downloads/papers/stanley.phd04.pdf>

5 ONDERZOEK

In dit hoofdstuk worden de deelvragen onderzocht en beantwoord. Deze antwoorden dragen bij aan de algemene conclusie van dit onderzoek en resulteren in het beantwoorden van de hoofdvraag:

Hoe kunnen machine learning algoritmes, gericht op Theory of Constraints, in EMI worden geïmplementeerd om de buffervoorraden van EKB klanten te verminderen?

5.1 Data onderzoek

Om te kunnen simuleren is er allereerst data over de rollenfabriek van TN nodig. Deze data zou uit EMI, maar ook uit externe bronnen kunnen komen. De eerste deelvraag van dit onderzoek luidt:

Welke data uit EMI en externe data zijn er nodig om simulaties uit te kunnen voeren?

5.1.1 Basis gegevens

Om de rollenfabriek van TN te kunnen simuleren zijn een aantal basis gegevens nodig. Dit zijn de:

- Logistiek van de fabriek
- Geproduceerde producten per productielijn met daarbij behorende productiesnelheden
- Omstellingen per productielijn
- Stilstanden per productielijn
- Uitgevallen of afgekeurde producten per productielijn
- Buffervoorraden aan het begin van de simulatie periode

De logistiek van de fabriek is nodig om in de simulaties vast te kunnen leggen welke productielijnen er allemaal zijn en wat de relatie tussen deze productielijnen is. Welke routes kunnen producten allemaal afleggen van het magazijn tot aan de opslag aan het eind van de fabriek?

Als een productielijn meerdere verschillende producten kan produceren kan het voor komen dat deze productielijn moet worden omgesteld voordat er een ander product geproduceerd kan worden. In dat geval zijn er data nodig over deze omstelling zoals wanneer deze omstelling heeft plaats gevonden en hoe lang de omstelling heeft geduurd. Hetzelfde geldt ook voor eventuele stilstanden van een productielijn.

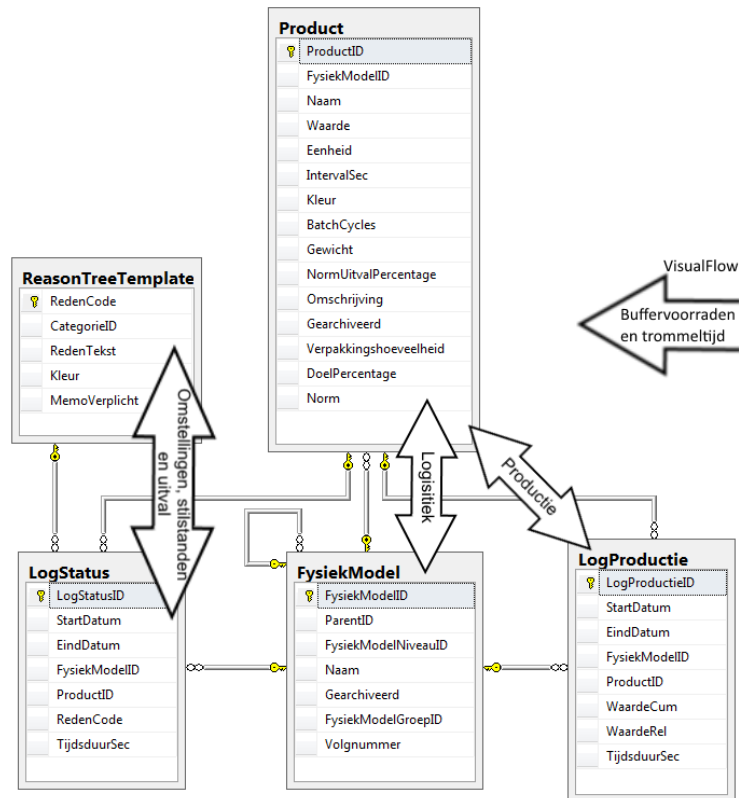
Tenzij de simulaties gestart worden vanaf de in gebruik neming van de fabriek is er ook data nodig over de buffervoorraden aan het begin van de simulatie periode.

5.1.2 Data uit EKB Manufacturing Intelligence

Om de programmatuur toe te kunnen passen bij meerdere klanten van EKB is het van belang zo veel mogelijk gebruik te maken van data uit de database van EMI. Deze database heeft namelijk voor elke klant van EKB dezelfde architectuur. In Figuur 18 zijn de tabellen en velden uit het EMI database diagram weergegeven die data bevatten voor de simulaties.

De tabel 'FysiekModel' bevat de namen en ID's van de productielijnen. Aangezien namen kunnen veranderen en ID's niet, zullen de ID's worden gebruikt. De 'Product' tabel is eigenlijk een koppeltabel tussen de producten en productielijnen. Uit een gesprek met een software engineer van EKB is geconcludeerd dat de producten in de 'Product' tabel alleen te traceren zijn op basis van de naam (M. Kok, persoonlijke communicatie, 27 april 2018). Op basis van de productnamen kunnen in de 'Product' tabel de productielijnen worden opgezocht waar de producten op kunnen worden geproduceerd. De productiesnelheid heet in de database 'norm' en is een kolom van de 'Product' tabel. De productie van de fabriek wordt gelogd in de 'LogProductie' tabel.

De omstellingen, stilstanden en uitval kunnen worden teruggevonden in de 'LogStatus' tabel op basis van de 'RedenCode'. Elke 'RedenCode' heeft een 'CategorieID' in de 'ReasonTreeTemplate' tabel. Voor de omstellingen wordt 'CategorieID' 400 gebruikt, voor stilstanden 300 en voor uitval 700.



Figuur 18: Data uit de EMI database en externe bronnen
 Noot. Aangepast van “EMI database diagram”, door EKB, 2018, 1 februari. Geraadpleegd van
 (local)\SQLEXPRESS.EMI_NN\dbo.DatabaseSchema³

5.1.3 Uitzonderingen

Uit een gesprek met de LEAN manager en tevens contactpersoon bij TN is gebleken dat niet alle producten door de harderij van de rollenfabriek gaan, maar dat sommigen bij een extern bedrijf worden gehard (G. Bargeman, persoonlijke communicatie, 17 mei 2018). Bij producten waarvan de naam begint met “RT” en later in de naam “HA” of “HN” bevat duurt dit extern harden gemiddeld 4,5 week. Alle andere producten die extern worden gehard doen er een week over.

In het geval dat producten extern worden gehard zijn er in de EMI- en VisualFlow database geen data beschikbaar over het harden van deze producten, dus zal er in de simulaties uit moeten worden gegaan van deze gemiddelde tijden.

Ook zijn er producten die niet door de slijperij van de rollenfabriek hoeven, maar direct na het harden verkocht kunnen worden. De namen van deze producten beginnen allemaal met “RQ”.

5.1.4 Externe data

De buffervoorraden worden echter niet in de EMI database bijgehouden. Om de buffervoorraden aan het begin van de simulatieperiode te kunnen simuleren is er dus externe data nodig. In het geval van TN is deze data beschikbaar in een softwarepakket genaamd ‘VisualFlow’ (G. Bargeman, persoonlijke communicatie, 19 februari 2018). Deze software houdt onder andere de locaties van alle containers bij. Een container heeft een ordernummer welke correspondeert met een order van een bepaald product die overeenkomt met een van de productnamen in de EMI database. Hierdoor kan voor elke productielijn aan het begin van de simulatie periode de buffervoorraden opgehaald en berekend worden uit VisualFlow.

Ook de trossen van de rollenfabriek van TN staan niet geregistreerd in de EMI database. Zoals aangegeven in hoofdstuk 4.1.1 zijn de trossen niet van groot belang voor de simulatie. Wel kan de gemiddelde productiesnelheid van de trossen uit de data van VisualFlow berekend worden.

³ Bron afkomstig van het intranet (niet publiekelijk toegankelijk) van EKB.

5.1.5 Conclusie

Deze paragraaf geeft een antwoord op de eerste deelvraag van dit onderzoek:

Welke data uit EMI en externe data zijn er nodig om simulaties uit te kunnen voeren?

De EMI database bevat grotendeels de data die nodig zijn voor de simulaties. De relevante tabellen uit deze database zijn weergegeven in Figuur 18 met daarbij welke tabellen welke basis gegevens bevatten. De overige basis gegevens zijn terug te vinden in de database van VisualFlow die in beheer is van TN.

5.2 Simulatie onderzoek

Nu de data bekend zijn kan er worden nagedacht over het simuleren zelf. De resultaten van de ML algoritmes zijn afhankelijk van de kwaliteit van de simulatie. De tweede deelvraag is:

Welk simulatie-softwarepakket is het meest geschikt om in EMI te implementeren?

5.2.1 Simulatiesoftware keuze

Gezien er beperkte tijd is voor de implementatie fase is er besloten om de simulaties uit te voeren met bestaande software. Om een goede keuze te kunnen maken voor een software pakket dat geïmplementeerd kan worden in EMI zijn er een aantal functionele eisen vastgesteld. De software moet de in ieder geval de basis gegevens uit de vorige deelvraag kunnen verwerken en de volgende onderdelen kunnen simuleren:

- Externe data
- Stilstanden
- Omstellingen
- Uitval of afkeur van producten
- Verschillende producten op verschillende productielijnen
- Buffervoorraden

Het inladen van externe data is nodig om de data uit de EMI- en VisualFlow database te kunnen gebruiken.

In overleg met de bedrijfsbegeleider is vastgelegd dat de simulatiesoftware gratis commercieel te gebruiken moet zijn om in EMI te kunnen implementeren. Daarnaast moet de software open source zijn om toekomstig onderhoud te versimpelen voor EKB (A. Roelofsen, persoonlijke communicatie, 13 april 2018).

Na het vaststellen van deze eisen zijn er verschillende softwarepakketten vergeleken. De gedetailleerde bevindingen hiervan zijn terug te vinden in Bijlage B. Tabel 4 geeft de resultaten hiervan weer.

Tabel 4: Simulatiesoftware requirements

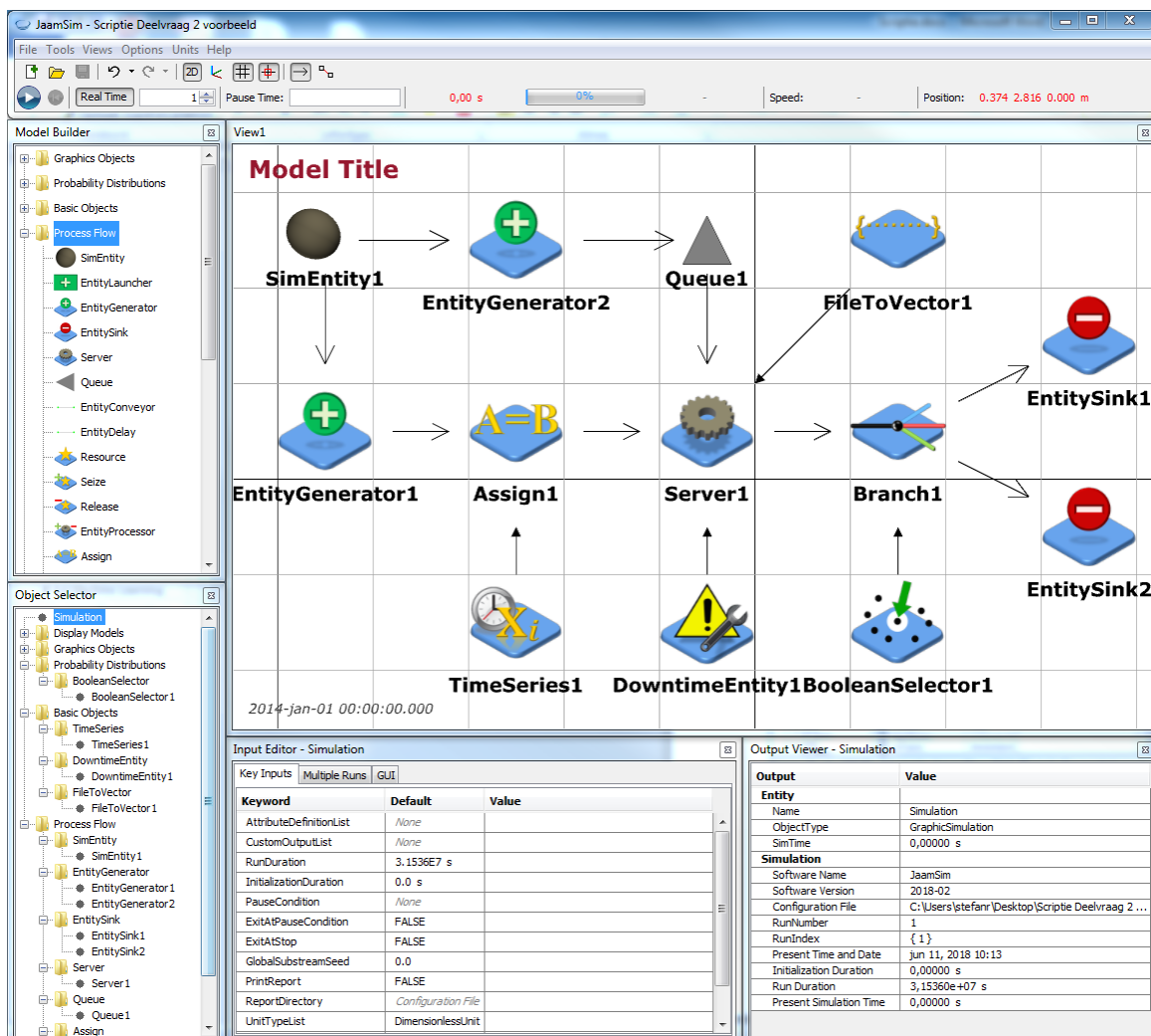
NIET-FUNCTIONELE REQUIREMENTS	ANYLOGIC (2018)	ARENA (2018)	FLEXSIM (2018)	JAAMSIM (2018)	SIMUL8 (2018)
Open source	✗	✗	✗	✓	✗
Commercieel gebruik	✗	✗	✗	✓	✗
FUNCTIONELE REQUIREMENTS					
Externe data	✓	✓	✓	✓	✓
Stilstanden	✓	✓	✓	✓	✓
Omstellingen	✓	✓	✓	✓	✓
Uitval of afkeur van producten	✓	✓	✓	✓	✓
Verschillende producten op verschillende productielijnen	✓	✓	✓	✓	✓
Buffervoorraden	✓	✓	✓	✓	✓

Opvallend is dat er maar een enkel softwarepakket zowel open source als voor commercieel gebruik beschikbaar is. Ook na verder onderzoek van andere softwarepakketten via onder andere capterra.com zijn er geen open source softwarepakketten gevonden die hieraan voldoen. De meeste softwarepakketten hebben echter wel een demo- of academische versie die gratis te gebruiken is, maar zijn niet beschikbaar voor commercieel gebruik.

Softwarepakket JaamSim (2018) voldoet echter aan alle requirements en na overleg met de bedrijfsbegeleider en de product owner is besloten om dit softwarepakket te gebruiken, ondanks dat er geen mogelijkheid geweest is om JaamSim te vergelijken met andere open source software.

5.2.2 JaamSim

JaamSim is een gratis open source 'discrete event simulation' softwarepakket. Volgens Allen, Spencer, Gibson (2015) is een discrete event simulation een manier om het gedrag en de prestatie van processen, faciliteiten of systemen te simuleren. JaamSim begon in 2002 en de eerste release verscheen op 6 juli 2016 door H. Harrison en is geschreven in Java. Voor dit onderzoek is de nieuwste versie van 3 mei 2018 gebruikt. JaamSim heeft uitgebreide documentatie, echter is de gebruikershandleiding sinds 7 september 2017 niet meer bijgewerkt.



Figuur 19: JaamSim GUI

Noot. Rang, S. A. (2018, 11 juni). JaamSim GUI [Foto], Geraadpleegd van 'JaamSim (2018-03)'

In Figuur 19 is de GUI van JaamSim (2018) te zien. Het bovenste venster bevat standaard opties zoals het openen en opslaan van simulaties. Deze simulaties worden door JaamSim omgezet tot een config-bestand met de ".cfg"-extensie. Ook is er de optie om de simulatiesnelheid aan te passen of te pauzeren na een bepaalde tijd.

De volgende paragrafen beschrijven hoe de functionele requirements in JaamSim gesimuleerd kunnen worden aan de hand van Figuur 19 en de gebruikershandleiding van JaamSim (JaamSim Development Team, 2017).

5.2.2.1 Productie

In het middelste en grootste venster is een voorbeeldsimulatie te zien waarin de objecten staan waarmee de requirements uit paragraaf 5.2.1 gesimuleerd kunnen worden.

Ten eerste kan de productie worden gesimuleerd door 'Server1'. Dit is een machine die vanaf, in dit geval, 'EntityGenerator1' 'entities' (entiteiten) ontvangt om te produceren. Als de machine al bezig is terwijl er een entity ontvangen wordt, wordt deze entity in de buffervoorraad ('Queue1') van de machine geplaatst totdat de machine klaar is. Hoe lang de machine doet over een entity is een invoerveld. De meeste invoervelden in JaamSim kunnen ook worden gevuld met een expressie. Hiermee kan externe data opgezocht worden zoals ook de troomeltijden uit VisualFlow. Het object 'FileToVector1' kan van een tekstbestand een vector maken met waarden. Dit tekstbestand zou bijvoorbeeld informatie kunnen bevatten over de productiesnelheid van de entiteiten. Deze productiesnelheden kunnen dan worden ingelezen in het invoerveld van de productiesnelheid van object 'Server1' met deze expressie: "[FileToVector1].Value(this.obj.ID) [s]". Waarbij "[s]" de tijdsaanduiding in seconden is en "this.obj.ID" het ID-attribuut van de huidige entity is die op dit moment door de 'Server1' wordt geproduceerd. Dit ID-attribuut wordt door het 'Assign1'-object toegewezen aan de entiteiten die vanaf de EntityGenerator1 komen. Deze ID's veranderen gedurende de simulatie door het 'TimeSeries1'-object waarin een lijst van tijdsaanduidingen staat met daarbij product-ID's. Deze ID's en tijdsaanduidingen kunnen worden ingeladen door een ander 'FileToVector'-object die de EMI-data bevat van de geproduceerde producten. In de GUI staan geen extra FileToVector-objecten om het voorbeeld overzichtelijk te houden.

5.2.2.2 Buffervoorraden aan het begin van de simulatieperiode

Het simuleren van de buffervoorraden die aan het begin van de simulatieperiode aanwezig waren kan simpelweg door een extra 'EntityGenerator'-object toe te voegen en de entities naar de bijbehorende buffer te sturen. Elke EntityGenerator heeft invoervelden voor de hoeveelheid entities die gegenereerd moeten worden en hoe vaak. Deze data kan via een extra 'FileToVector'-object worden ingeladen vanuit een tekstbestand die door EMI gegenereerd kan worden door de data uit VisualFlow te gebruiken.

5.2.2.3 Stilstanden en omstellingen

De stilstanden en omstellingen kunnen worden gesimuleerd door het 'DowntimeEntity1'-object. Hierin kan worden aangegeven hoeveel tijd er tussen een stilstand of omstelling zit en hoe lang deze stilstand of omstelling duurt. In de praktijk is dit niet van tevoren duidelijk. JaamSim heeft ook een aantal 'Probability Distribution'-objecten zoals te zien in het 'Model Builder'-venster. Dit zijn objecten die willekeurige waarden kunnen genereren aan de hand van een waarschijnlijkheidsverdeling. Dit is een formule van kansberekening. Deze 'Probability Distribution'-objecten hebben de invoerwaarden minimum, gemiddelde en maximum nodig om de formule te berekenen. Ook deze waarden kunnen weer worden ingeladen met een 'FileToVector'-object gevuld met OEE-data uit de EMI database.

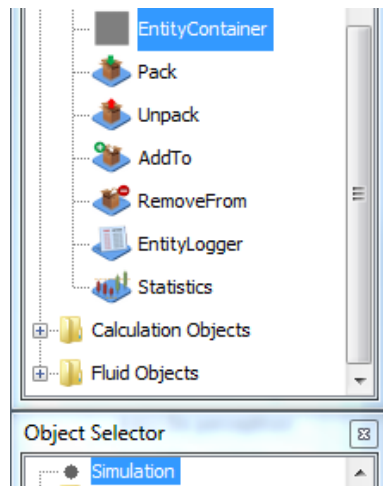
5.2.2.4 Uitval

Tot slot kan de uitval van producten worden gesimuleerd met een 'Branch'-object en een 'BooleanSelector'-object. Het Branch-object kan entities naar andere objecten sturen. Dit kunnen er ook meer dan twee zijn. Hiermee is het Branch-object ook geschikt om de verschillende productieroutes te simuleren, maar in dit voorbeeld wordt het gebruikt voor de uitval. Het 'BooleanSelector'-object kan op basis van een bepaalde kans een 1.0 of een 0.0 waarde genereren. Deze kans kan ook weer extern worden ingeladen door een tekstbestand uit de EMI database. Vervolgens kan het Branch-object deze waarde gebruiken om te bepalen naar welk object de

huidige entity gaat. Dit zijn in dit geval twee 'EntitySink'-objecten. Dit zijn objecten die entities verwijderen van de simulatie. De ene kan gebruikt worden als uitval en de ander als output van de fabriek. Het aantal entities dat bij JaamSim-objecten zijn aangekomen worden door JaamSim gelogd in een log-bestand. Dit log-bestand kan dan weer door EMI worden uitgelezen aan het einde van de simulatie om de resultaten te interpreteren.

5.2.2.5 Containers

JaamSim heeft ook een aantal objecten om de containers van TN te simuleren zoals te zien is in Figuur 20.



Figuur 20: JaamSim container objecten

Noot. Rang, S. A. (2018, 11 juni). JaamSim container objecten [Foto], Geraadpleegd van 'JaamSim (2018-03)'

'EntityContainer'-objecten werken net als gewone entities in JaamSim, alleen kan een EntityContainer meerdere entities tegelijk bevatten. Entities kunnen worden toegevoegd en verwijderd van containers door de 'AddTo'- en 'RemoveFrom'-objecten. De containers zelf kunnen net als entities worden aangemaakt met een EntityGenerator-object. Hiermee kan het maximum van 475 containers worden aangehouden door bij het invoerveld van de EntityGenerator een maximum van 475 aan te geven. In de simulatie kan er na de perserij een 'AddTo'-object worden gebruikt om de rollen per container vervolgens door de trommels en harderij te verwerken. Daarna kan een 'RemoveFrom'-object worden gebruikt om, net als in de echte rollenfabriek, de containers te legen in de slijperij. Hierna kunnen de containers worden teruggestuurd naar de perserij om opnieuw gevuld te worden.

5.2.3 Conclusie

Deze paragraaf geeft een antwoord op de tweede deelvraag van dit onderzoek:

Welk simulatie-softwarepakket is het meest geschikt om in EMI te implementeren?

Het gebruik van bestaande software is noodzakelijk gezien de beperkte tijd die is gereserveerd voor het programmeren van het eindproduct. Na onderzoek naar verschillende simulatie-softwarepakketten is gebleken dat het lastig is om software te vinden die open source is en beschikbaar is voor commercieel gebruik. Na overleg met de stakeholders van EKB is besloten om JaamSim (2018) te gaan gebruiken, omdat deze software aan alle functionele en niet-functionele requirements voldoet.

Met JaamSim kunnen alle aspecten van de rollenfabriek van TN gesimuleerd worden. Dit is gebleken uit onderzoek naar de werking van JaamSim. De externe data moet echter wel ingeladen worden in de vorm van tekstbestanden, die het onoverzichtelijker maken. Ook het feit dat JaamSim simulaties worden opgeslagen in een config-bestand zonder opmaak maakt dat aanpassingen en het oplossen van problemen lastiger zijn dan wanneer simulaties bijvoorbeeld in XML-formaat zouden worden opgeslagen.

5.3 Theory of Constraints onderzoek

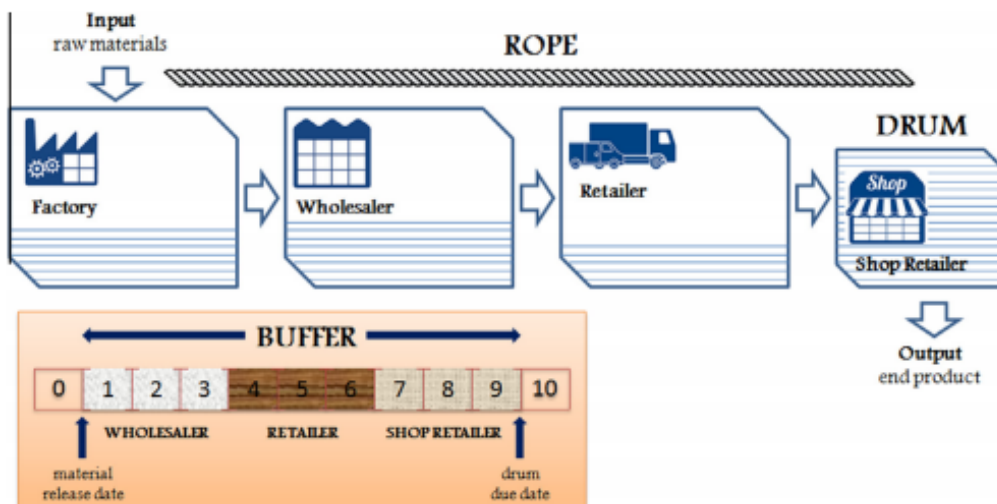
Om een beter inzicht te krijgen in het verlagen van buffervoorraden middels TOC is deze deelvraag als volgt:

Hoe hebben anderen met Theory of Constraints de buffervoorraden verlaagd?

5.3.1 Drum-Buffer-Rope

In 2015 onderzochten Costas, Ponte, De la Fuente, Pino en Puche het effect van het toepassen van TOC om de productie efficiëntie te verhogen. Dit werd bereikt door de 'Drum-Buffer-Rope'-methode (DBR) toe te passen. Volgens Golratt en Cox (2007) is de 'drum' de snelheid van de constraint. De 'buffer' kan een buffervoorraad van zowel producten als wachttijd zijn. De 'rope' is de vraag aan materiaal die de constraint nodig heeft om optimaal benut te worden volgens stap 2 van TOC. Samengevat, DBR is een TOC-implementatie om op basis van de snelheid van de constraint en de buffervoorraden de vraag aan nieuwe producten aan te sturen.

In bovenstaand onderzoek van Costas et al. (2015) is de vraag van de klant de constraint. In Figuur 21 is het schema van de DBR-methode van het onderzoek te zien. Hierin is de constraint de drum en zijn alle voorgaande processen de rope die aangestuurd worden door de drum. Dit aansturen gebeurt door te kijken naar de historie van klantorders en hiermee de volgende orderdatum te voorspellen. Vervolgens wordt de productietijd van deze datum afgetrokken wat resulteert in de datum waarop nieuwe grondstoffen moeten worden ingekocht.



Figuur 21: Drum Buffer Rope-schema van de TOC-implementatie van Costas et al. (2015)

Noot. Herdrukt van "Applying Goldratt's Theory of Constraints to reduce the Bullwhip Effect through agent-based modeling", door Costas, J., Ponte B., De la Fuente, D., Pino, R., & Puche, J., 2015, Elsevier, 42(4), p. 2055.

Deze DBR-methode is vergeleken met een methode die nog steeds veel wordt gebruikt: de 'order-up-to inventory'-methode. Deze methode stuurt de inkoop van grondstoffen aan op basis van de huidige orders en een voorspelling voor toekomstige orders. Dit is tevens de huidige manier van werken bij de rollenfabriek van TN volgens de contactpersoon bij TN (G. Bargeman, persoonlijke communicatie, 12 maart 2018). Costas et al. (2015) concluderen dat de DBR-methode significant beter presteerde, maar de reden hiervan is nog onduidelijk. De DBR-methode resulteerde in kortere doorlooptijden en lagere buffervoorraden dan de 'order-up-to inventory'-methode.

5.3.2 Critical Chain Project Management

LITERATUUR

- Allen, M., Spencer, A., & Gibson, A. (2015). Right cot, right place, right time: improving the design and organisation of neonatal care networks – a computer simulation study.. *Health Service and Delivery Research*, 3(20), 9-10. Geraadpleegd van <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK293948/>
- AnyLogic. (2018, 17 mei). Software Licensing Agreement for AnyLogic 8.x.x. Geraadpleegd van https://www.anylogic.com/upload/license_agreements/software-licensing-agreement-for-anylogic.pdf
- AnyLogic. (2018). Simulation Software for Every Business Challenge. Geraadpleegd van <https://www.anylogic.com/features/>
- AnyLogic. (2018). AnyLogic downloads. Geraadpleegd van <https://www.anylogic.com/downloads/#todownload>
- Arena. (2018). Manufacturing Simulation Software. Geraadpleegd van <https://www.arenasimulation.com/industry-solutions/industry/manufacturing-simulation-software>
- Arena. (2018). Arena Compare Products. Geraadpleegd van <https://www.arenasimulation.com/academic/compare-products>
- Arena. (2018). Arena Entities_Attributes [Video]. Geraadpleegd van <http://embed.vidyard.com/share/XZeGJynckuAXAy08SLXFyQ>
- AnyLogic. (2018). AnyLogic Manufacturing [Video]. Geraadpleegd van <https://youtu.be/75GCZqmNQLE>
- AnyLogic. (2018). AnyLogic Help. Geraadpleegd van <https://help.anylogic.com/index.jsp>
- Capterra. (z.d.). Simulation Software. Geraadpleegd van <https://www.capterra.com/simulation-software/>
- Costas, J., Ponte, B., De la Fuente, D., Pino, R., & Puche, J. (2015). Applying Golratt's Theory of Constraints to reduce the Bullwhip Effect through agent-based modeling. *Elsevier*, 42(4), 2049-2060. Geraadpleegd van <https://paperdownload.me/wp-content/uploads/2017/11/5693-applying-golratts-theory-constraints-reduce-bullwhip-effect-agent-based-modeling.pdf>
- EKB. (z.d.). EMI Database diagram [Database]. Geraadpleegd van (local)\SQLEXPRESS.EMI_NN\dbo.DatabaseSchema
- EKB. (2017, 21 februari). EKB Groep (Totaal) [Intranet]. Geraadpleegd van <http://intranet.ekb.nl/Documenten%20Personeelszaken/Organogrammen%20EKB%20Groep.pdf>
- FlexSim. (2018). Factory Simulation. Geraadpleegd van <https://www.flexsim.com/factory-simulation/>
- FlexSim. (2018). FlexSim problem solved.. Geraadpleegd van <https://www.flexsim.com/flexsim/>
- Goldratt, E. M. (2000). *Het Doel*. Utrecht, Nederland: Het Spectrum B.V..
- Goldratt, E. M., & Cox, J. (2017, 2 april). The Goal, A Process of Ongoing Improvement. Geraadpleegd van <http://www.2ndbn5thmar.com/lean/Notes%20on%20The%20Goal.pdf>
- Hussung, T. (2016, 10 maart). What Is the Software Development Life Cycle? [Blogpost]. Geraadpleegd van <https://online.husson.edu/software-development-cycle/>

- JaamSim Development Team. (2015, 25 november). JaamSim License. Geraadpleegd van <https://github.com/jaamsim/jaamsim/blob/master/LICENSE>
- JaamSim Development Team. (2017, 7 september). JaamSim User Manual. Geraadpleegd van <https://jaamsim.com/docs/JaamSim%20User%20Manual%202017-10.pdf>
- JaamSim Development Team. (2018). JaamSim (2018-03) [Software]. Geraadpleegd van <https://jaamsim.com/index.html>
- LeanSixSigma. (2018). Wat is Lean? Geraadpleegd van <https://www.sixsigma.nl/wat-is-lean>
- Managementmodellensite. (2018). Theory of Constraints: Goldratt. Geraadpleegd van <https://managementmodellensite.nl/theory-constraints-goldratt/#.WyJBuNUzbRa>
- Monier, L. (2016, 30 april). Deep Learning Class #1 - Go Deep or Go Home [Slide 23]. Geraadpleegd van <https://www.slideshare.net/holbertonschool/deep-learning-keynote-1-by-louis-monier>
- Nielsen, M. (2017, december). Neural Networks and Deep Learning. Geraadpleegd van <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/index.html>
- Nordgren, B. (2007, 10 september). FlexSim Simulation Software [Video]. Geraadpleegd van <https://www.youtube.com/watch?v=t620IkFkw28>
- Procesverbeteren.nl. (2017, 24 augustus). Introductie Lean: de slanke organisatie. Geraadpleegd van <https://www.procesverbeteren.nl/LEAN/leanmanufacturing.php#definitie>
- Procesverbeteren.nl. (2017, 6 september). Introductie TOC: de ongelimiteerde organisatie. Geraadpleegd van <http://www.procesverbeteren.nl/TOC/ToC.php>
- Rang, S. A. (2018, 3 april). EMI modules van de rollenfabriek van Tsubaki Nakashima [Foto]. Geraadpleegd van http://emi-demo.ekb.nl/EMI_NNN/Default.aspx
- Rang, S. A. (2018, 3 april). EMI OEE analyse van de rollenfabriek van Tsubaki Nakashima [Foto]. Geraadpleegd van http://emi-demo.ekb.nl/EMI_NNN/OEE/OEEAnalyse.aspx
- Rang, S. A. (2018, 11 juni). JaamSim GUI [Foto]. Geraadpleegd van JaamSim (2018-03)
- Rang, S. A. (2018, 3 april). EMI OEE status categorieën van de rollenfabriek van Tsubaki Nakashima [Foto]. Geraadpleegd van http://emi-demo.ekb.nl/EMI_NNN/OEE/OEEAnalyse.aspx
- Rang, S. A. (2018, 11 juni). JaamSim container objecten [Foto]. Geraadpleegd van JaamSim (2018-03)
- Rojas, R. (1996). The Backpropagation Algorithm. Geraadpleegd van <https://page.mi.fu-berlin.de/rojas/neural/chapter/K7.pdf>
- Santos, L. (2018). Rectified-Linear unit Layer. Geraadpleegd van https://leonardoaraujosantos.gitbooks.io/artificial-intelligence/content/relu_layer.html
- Sharma, A. (2017, 30 maart). Rectified-Linear unit Layer. Geraadpleegd van <https://medium.com/the-theory-of-everything/understanding-activation-functions-in-neural-networks-9491262884e0>
- SIMUL8. (2018). SIMUL8 customer success case studies. Geraadpleegd van <https://www.simul8.com/case-studies/>
- SIMUL8. (2018). International & Educational Prices. Geraadpleegd van <https://www.simul8.com/shop/intprices>

SIMUL8. (2018). Assembly Line [Video]. Geraadpleegd van <https://www.simul8.com/videos/assembly-line>

Stanley, K. O. (2004, augustus). Efficient Evolution of Neural Networks through Complexification. Geraadpleegd van <http://nn.cs.utexas.edu/downloads/papers/stanley.phd04.pdf>

Tutorials Point. (2016). Genetic Algorithms. Geraadpleegd van https://www.tutorialspoint.com/genetic_algorithms/genetic_algorithms_tutorial.pdf

BIJLAGEN

Bijlage A: Plan van Aanpak

Pagina's **Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.**-**Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.**

Bijlage B: Simulatiesoftware requirements onderzoek

AnyLogic

AnyLogic is een simulatie-softwarepakket voor 'supply chains', 'transportation', 'manufacturing' en nog een aantal industriële toepassingen (Bijlage B, Figuur 1).

AnyLogic is used in these industries:






[MORE INDUSTRIES](#)

Bijlage B, Figuur 1: AnyLogic industriële toepassingen

Noot. Herdrukt van "Simulation Software for Every Business Challenge", door AnyLogic, (2018). Geraadpleegd van <https://www.anylogic.com>

Open Source en commercieel gebruik

Volgens hoofdstuk 2, artikel b7 van de license agreement voor AnyLogic (AnyLogic, 2018) is het verboden om de software te kopiëren, gebruiken of meeleveren met een ander softwarepakket zoals EMI tenzij een ander artikel in de software agreement dit toestaat. Artikel d van hetzelfde hoofdstuk gaat over de gratis universiteitseditie van de software. Ook volgens dit artikel is het niet toegestaan de software voor commerciële doeleinden te gebruiken. Andere edities van de AnyLogic software hebben alleen een gratis 'probeerversie' (Bijlage B, Figuur 2).

			
	FREE VERSION DOWNLOAD	DOWNLOAD	DOWNLOAD
		ASK FOR A QUOTE	ASK FOR A QUOTE
availability	free	free 60-day trial	free 60-day trial

Bijlage B, Figuur 2: AnyLogic edities

Noot. Herdrukt van "AnyLogic downloads", door AnyLogic, (2018). Geraadpleegd van <https://www.anylogic.com/downloads/#todownload>

Stilstanden, omstellingen en uitval

In een demovideo over de manufacturing toepassing van AnyLogic is te zien dat stilstanden, omstellingen en uitval gesimuleerd en statistisch getoond kunnen worden (Bijlage B, Figuur 3).

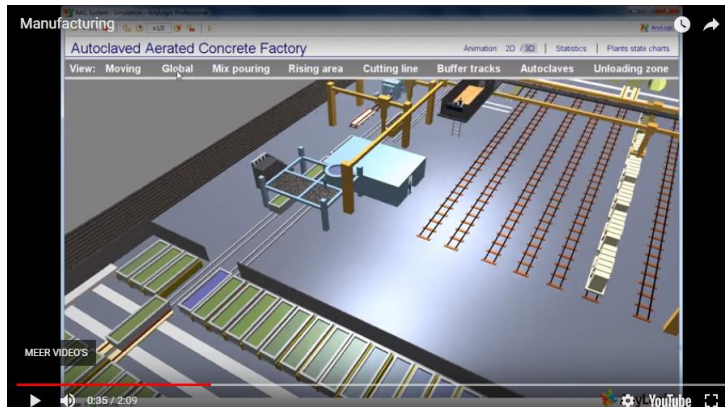


Bijlage B, Figuur 3: AnyLogic stilstanden, omstellingen en uitval

Noot. Herdrukt van "AnyLogic Manufacturing", door AnyLogic [Video], (2018). Geraadpleegd van <https://youtu.be/75GCZqmNQLE>

Buffervoorraden en verschillende producten op verschillende productielijnen

In dezelfde demovideo wordt ook duidelijk gemaakt dat buffervoorraden en verschillende producten op verschillende productielijnen te simuleren zijn (Bijlage B, Figuur 4).



Bijlage B, Figuur 4: AnyLogic buffervoorraden en verschillende producten op verschillende productielijnen
Noot. Herdrukt van "AnyLogic Manufacturing" [Video], door AnyLogic (2018). Geraadpleegd van <https://youtu.be/75GCZqmNQLE>

Externe data

Volgens hoofdstuk "Advanced Modeling with Java" paragraaf "Integrating Models with External Applications" van de documentatie van AnyLogic is het mogelijk om met Java data uit andere applicaties en ook databases in te laden (AnyLogic, 2018).

Arena

Arena is een simulatie-softwarepakket voor onder andere 'manufacturing', 'supply chains' en 'logistics'.

Open source en commercieel gebruik

Ook Arena heeft zowel academische versies als betaalde versies. Een overzicht van deze academische versies is weergegeven in Bijlage B, Figuur 5. Echter is geen enkele versie van Arena beschikbaar voor commercieel gebruik, hierdoor is ook duidelijk dat Arena niet open source is.

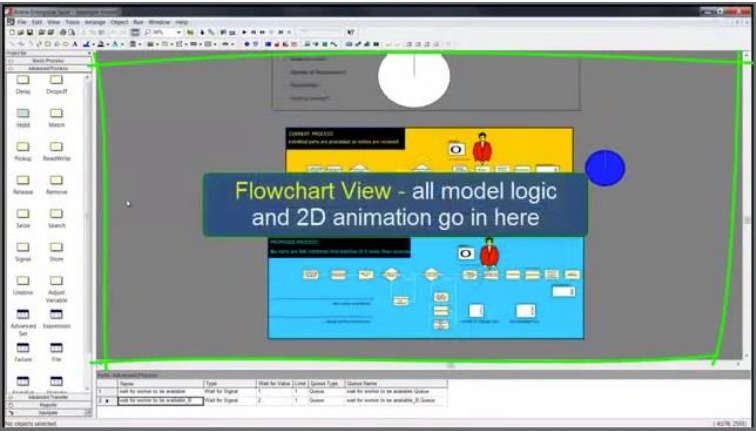
Arena Academic Offerings

	Student Version	Academic Laboratory	Academic Research
Number of Users	1	30	1
OptQuest for Arena		✓	✓
Arena Professional Edition	✓	✓	✓
Network Capable		✓	✓
Model Size Limitations	✓		
Access to Selected Online Help	✓	✓	✓
Access to Arena Tech Support		✓	✓
Access to Teaching Materials		✓	
Commercial Use Restrictions	✓	✓	✓
Price	Free	Contact Us	Contact Us

Bijlage B, Figuur 5: Arena academische versies
Noot. Herdrukt van "Arena Compare Products", door Arena, (2018). Geraadpleegd van <https://www.arenasimulation.com/academic/compare-products>

Functionele requirements

In een demovideo van Arena worden de functionele requirements stilstanden, omstellingen, uitval, buffervoorraden, verschillende producten op verschillende productielijnen en externe data getoond (Bijlage B, Figuur 6).



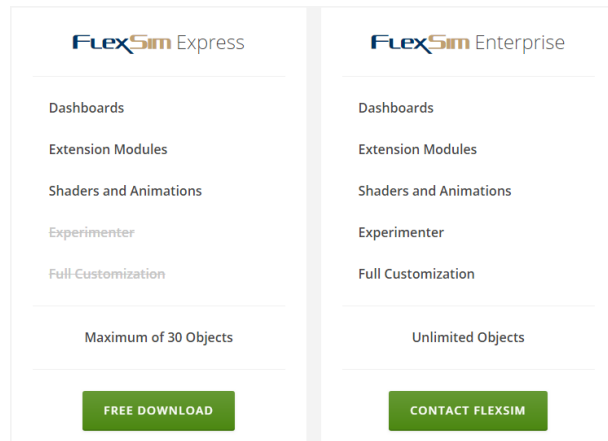
Bijlage B, Figuur 6: Arena functionele requirements
Noot. Herdrukt van "Arena Entities_Attributes" [Video], door Arena, (2018). Geraadpleegd van <http://embed.vidyard.com/share/XZeGJynckuAXAy08SLXfYQ>

FlexSim

FlexSim is een simulatie-softwarepakket waarmee 'manufacturing', 'healthcare', 'supply chain', 'discrete event' en nog vele andere industriële toepassingen gesimuleerd kunnen worden.

Open source en commercieel gebruik

FlexSim heeft de versies 'Express' en 'Enterprise' (Bijlage B, Figuur 7). De Express versie is gratis te gebruiken, maar niet voor commercieel gebruik en dus ook niet open source. FlexSim heeft ook een academische versie, maar ook deze is niet voor commercieel gebruik.

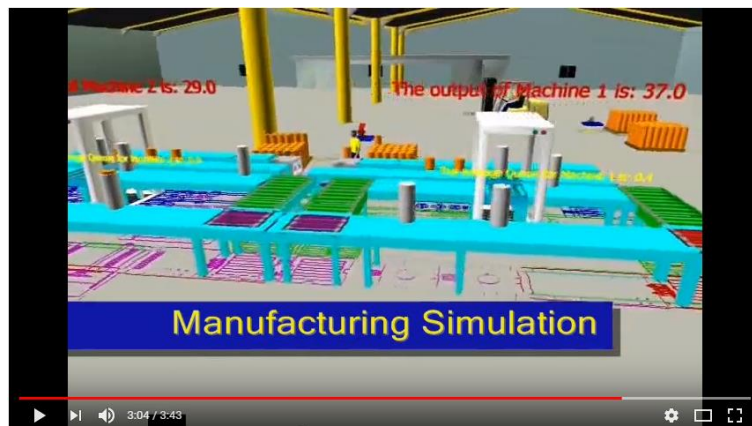


Bijlage B, Figuur 7: FlexSim versies

Noot. Herdrukt van "FlexSim problem solved.", door FlexSim, (2018). Geraadpleegd van <https://www.flexsim.com/flexsim/>

Functionele requirements

In een video van FlexSim is te zien dat de basis functionaliteiten gesimuleerd kunnen worden in 3D. Er wordt onder andere een 'manufacturing' voorbeeldsimulatie getoond waarin producten worden geproduceerd terwijl de output wordt bijgehouden (Bijlage B, Figuur 8).



Bijlage B, Figuur 8: FlexSim Simulation Software

Noot. Herdrukt van "FlexSim Simulation Software" [Video], door Bill Nordgren, (10 september 2007). Geraadpleegd van <https://youtube.com/watch?v=t620lkFkw28>

JaamSim

JaamSim is een 'discrete event' simulatie-softwarepakket geschreven in Java en wordt sinds 2016 op GitHub bijgewerkt.

Open source en commercieel gebruik

Volgens artikel 2 en 3 van de license agreement van JaamSim (JaamSim Development Team, 2015) mag de software gekopieerd, aangepast en geredistribueerd worden zolang de aanpassingen worden vermeld en een kopie van de license agreement meegeleverd wordt. Ook zijn alle versies die vanaf 2016 op GitHub zijn uitgebracht gratis te downloaden. Dit betekent dat de software zowel open source is, als beschikbaar voor commercieel gebruik.

Functionele requirements

De functionele requirements worden beschreven in hoofdstuk 5.2.2 aangezien JaamSim een belangrijk onderdeel is van dit onderzoek en de realisatie van het eindproduct.

SIMUL8

SIMUL8 is een simulatie-softwarepakket waarmee 'healthcare', 'manufacturing', 'supply chain & logistics' en andere industriële toepassingen gesimuleerd kunnen worden.

Open source en commercieel gebruik

SIMUL8 heeft vijf verschillende versies. Deze versie zijn echter allemaal betaald (Bijlage B, Figuur 9). Dit betekent dat SIMUL8 geen open source is en ook niet beschikbaar voor commercieel gebruik.

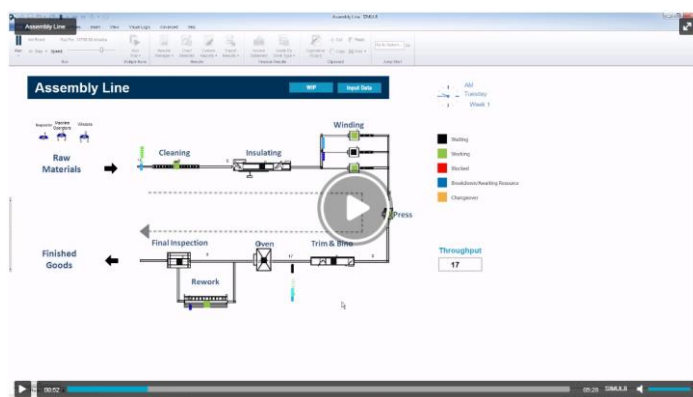
Product	\$ US Dollars	£ UK Sterling	€ EU Euros
Main Products			
SIMUL8 Basic 2018	\$1995	£1295	€1995
SIMUL8 Professional 2018	\$4995	£2995	€4995
SIMUL8 Professional Plus 2018	\$7495	£4495	€7495
SIMUL8 Team 2018	\$19995	£12995	€19995
SIMUL8 Educational Site License	\$1995	£1250	€1995
Learning SIMUL8: The Complete Guide	\$225	£160	€225
Learning SIMUL8: The Complete Guide (Academic Edition)	\$115	£85	€115
Upgrades			
SIMUL8 Basic 2016 to SIMUL8 Basic 2018	\$695	£495	€695
SIMUL8 Basic 2016 to SIMUL8 Professional Plus 2018	\$5995	£3995	€5995
SIMUL8 Basic to SIMUL8 Professional 2018	\$3295	£2095	€3295
SIMUL8 Standard to SIMUL8 Professional 2018	Price on request	Price on request	Price on request
SIMUL8 Professional 2016 to SIMUL8 Professional 2018	\$899	£540	€899
Annual Maintenance - SIMUL8 Basic	\$595	£395	€595
Annual Maintenance - SIMUL8 Professional	\$899	£540	€899
SIMUL8 Plug Ins			
OptQuest for SIMUL8	\$495	£329	€495
OptQuest for SIMUL8 Educational Site License	\$743	£530	€743
Stat::Fit for SIMUL8	\$245	£149	€245
Stat::Fit for SIMUL8 Educational Site License	\$357	£255	€357

Bijlage B, Figuur 9: SIMUL8 versies

Noot. Herdrukt van "International & Educational Prices", door SIMUL8, (2018). Geraadpleegd van <https://www.simul8.com/shop/intprices>

Functionele requirements

In een voorbeeldvideo van SIMUL8 zijn de verschillende functionele requirements te zien (SIMUL8, 2018). Ook kan volgens SIMUL8 (2018) externe data ingeladen worden via Microsoft Excel, VB en C++.



Bijlage B, Figuur 10: SIMUL8 functionele requirements

Noot. Herdrukt van "Assembly Line" [Video], door SIMUL8, (2018). Geraadpleegd van <https://www.simul8.com/videos/assembly-line>