

MASTER

Systeemgerichte voorraadbeheersing binnen de Koninklijke Luchtmacht

Oele, E.

Award date:
2001

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain



Systeemgerichte voorraadbeheersing binnen de Koninklijke Luchtmacht

Afstudeerverslag

Edward Oele

**NIET
UITLEENBAAR**

KONINKLIJKE LUCHTMACHT



Auteur:

Edward Oele (431003)

's-Gravenhage, april 2001

Beoordelingscommissie:

Dr. Ir. G.J. van Houtum (TUE, Capaciteitsgroep Logistieke Beheersingssystemen)

Dr. K.H. van Donselaar (TUE, Capaciteitsgroep Internationale Distributielogistiek)

Dr. Ir. N.P. Dellaert (TUE, Capaciteitsgroep Logistieke Beheersingssystemen)

Ir. F. van Meeteren (Koninklijke Luchtmacht, MXMB)

Koninklijke Luchtmacht

Binckhorstlaan 135
2516 BA 's-Gravenhage
070-3396911

Districon Logistics Management Consultants B.V.

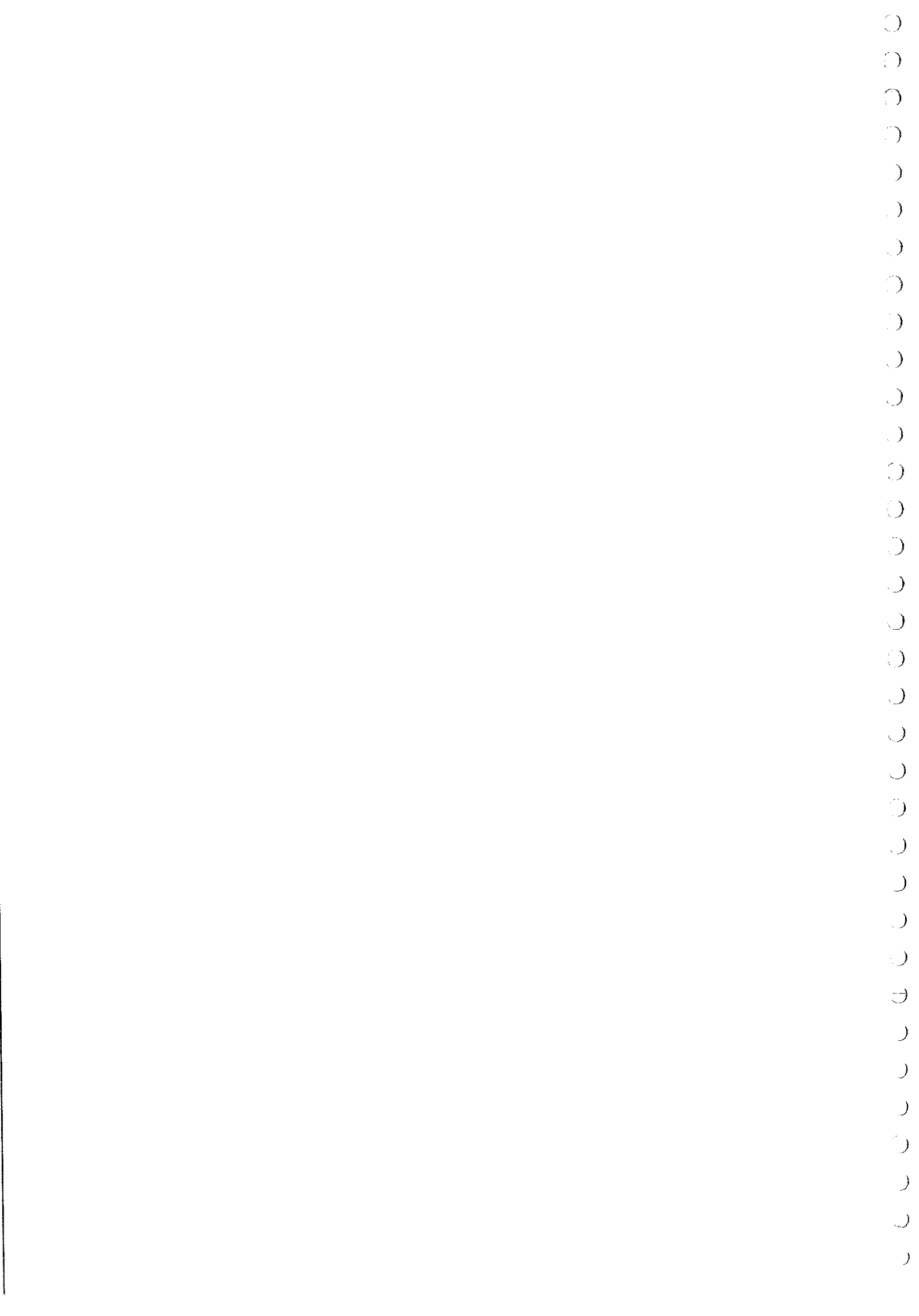
Raadhuisstraat 32-34
3600 AD Maarssen
0356-581681

Technische Universiteit Eindhoven

Faculteit Technology Management
Den Dolech 2
5612 AZ Eindhoven
040-2479111

Abstract

In this research, we study the inventory control of spare parts at the Royal Netherlands Air Force (RNAF). The RNAF has as a mission to reach certain availability for personnel and material equipment. It is thought that the current availability is relatively low in relation to the investment in spare parts. This report describes the possible profits of system-focussed inventory control (METRIC) for the f-16's of the RNAF.



Samenvatting

Dit afstudeeronderzoek is uitgevoerd in opdracht van de Koninklijke Luchtmacht (KLu). De afdeling materieel logistiek beleid is belast met het scheppen van randvoorwaarden en formuleren van het logistieke beleid met betrekking tot alle materiele processen. Hieronder valt ook het voorraadbeheersingbeleid ten aanzien van het f-16 artikelenpakket. Daar de KLu staat voor de inzetbaarheid van haar materieel en personeel, zou dit beleid er vooral op gericht moeten zijn op het bereiken van een bepaalde inzetbaarheid van haar (wapen)systemen. Het huidige voorraadbeheersingbeleid is er echter op gericht op het bereiken van een bepaalde servicegraad per artikel afzonderlijk. Dit houdt in dat de huidige streefniveaus over het algemeen hoog zijn in relatie tot de gerealiseerde inzetbaarheid. De **probleemstelling** is als volgt gedefinieerd:

"Binnen de afdeling Materieel Logistiek Beleid (MXM) bestaat de indruk dat de huidige investering in Spare Parts relatief hoog is in verhouding tot de gerealiseerde inzetbaarheid van de (wapen)systemen."

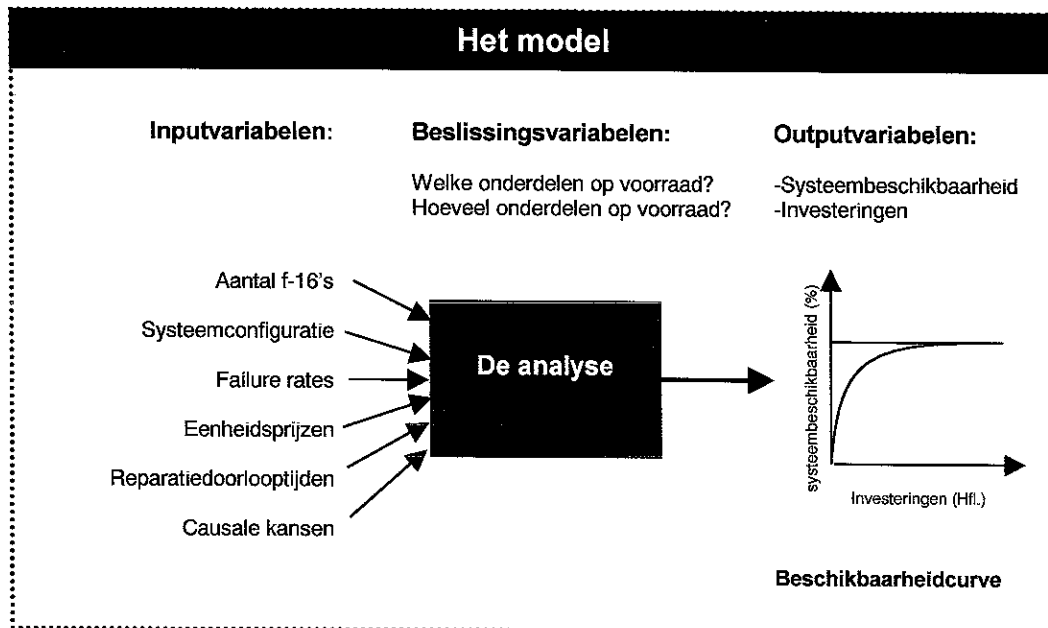
METRIC (Multi Echelon Technique for Recoverable Item Control) is een voorraadbeheersingmethodiek welke de inzetbaarheid van het systeem als doel heeft. Daar METRIC is ontwikkeld binnen de Amerikaanse Luchtmacht (USAF), en zeer goede resultaten heeft laten zien, is het denkbaar dat METRIC voor de KLu ook aanzienlijke verbeteringen kan bieden. Daarnaast is METRIC een van de weinige methodieken waarbij de beschikbaarheid van het systeem als geheel centraal staat. Deze twee bevindingen combinerend mag aangenomen worden dat METRIC het best aansluit op de doelstelling van de KLu.

De **opdracht** is als volgt geformuleerd:

"Onderzoek of METRIC toepasbaar is in de situatie van de KLu en stel het mogelijke verbeterpotentieel vast."

Om bovenstaande opdracht uit te voeren zijn sequentieel een aantal stappen uitgevoerd. Allereerst moet de huidige situatie bij de KLu worden beschreven en is onderzocht of de KLu die eigenschappen bezit die de toepassing van METRIC vereisen. De doelstellingen van de KLu in ogenschouw nemend, en de dure spare parts die tot de (wapen)systemen behoren, kan gesteld worden dat METRIC toepasbaar is binnen de situatie van de KLu. Aan de hand van de belangrijkste kenmerken van de KLu is een model gekozen, dat de meeste overeenkomsten vertoont met de situatie binnen de KLu. Na de modelkeuze is het model aan de hand van de METRIC methodiek zoals die door Rustenburg is beschreven, geanalyseerd. Deze analyse is vervolgens aangepast aan de situatie binnen de KLu, waarbij het grootste verschil met Rustenburg is dat binnen de KLu een gehele vloot moet worden ondersteund en dat het niet bij een systeem blijft. Nadat de analyse in Borland Delphi 4 is geprogrammeerd is de case van de Koninklijke Luchtmacht doorgerekend. Aan de hand van de resultaten van de berekeningen, is het verbeterpotentieel vastgesteld. Het verbeterpotentieel is voor vier gevallen vastgesteld. Opvallend is dat de huidige besturingsmethodiek vrij goed presteert. Het is dan ook maar de vraag of tot implementatie van METRIC over wordt gegaan. Echter naast het verbeterpotentieel dat METRIC biedt, kent METRIC ook nog een aantal andere voordelen, die er voor kunnen zorgen dat alsnog over wordt gegaan tot implementatie van METRIC. Om METRIC succesvol te implementeren binnen de KLu moet met een aantal zaken zorgvuldig rekening worden gehouden. De belangrijkste aandachtspunten zijn hierbij gesignaleerd en kort beschreven. Uiteindelijk zijn de conclusies en aanbevelingen geformuleerd.

Bovenstaande stappen worden vervolgens kort beschreven en toegelicht.

Het model

Figuur S.1. Raamwerk model

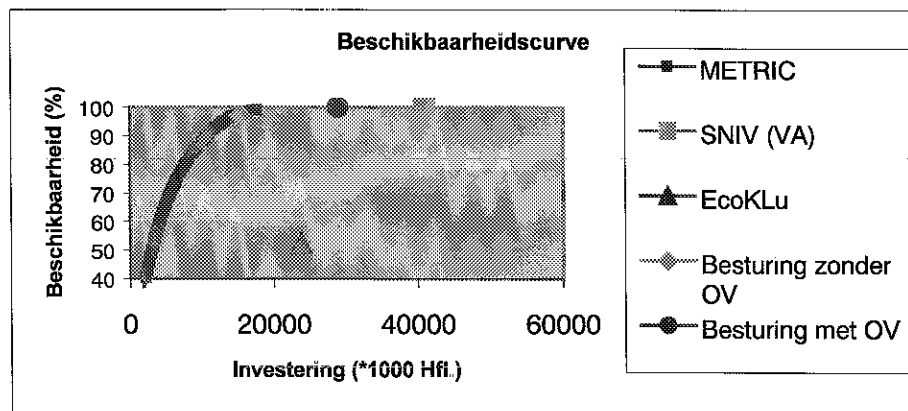
Figuur S.1 geeft het raamwerk van het model weer. Het **model** beschrijft de situatie waarop de METRIC theorie van toepassing is. In dit model zijn de eigenschappen van de te modelleren praktijksituatie opgenomen, met alle relevante gegevens die deze eigenschappen kwantificeren. Aan de hand van de **analyse** van het model is beschreven hoe de optimale basestock levels worden bepaald. Uit de analyse komen allemaal optimale basestock levels, welke allen een bepaalde beschikbaarheid en bijbehorende investering representeren. Deze punten genereren de beschikbaarheidscurve, waaruit belangrijke management informatie te halen is. Bovenstaand model is gemaakt voor de situatie van de KLu en aan de hand van het bovenstaande is het verbeterpotentieel van de KLu bepaald.

Numerieke resultaten case Koninklijke Luchtmacht

Om het verbeterpotentieel van METRIC vast te stellen, wordt METRIC vergeleken met:

- De huidige beheersingsmethodiek zonder oorlogsvoorraad
- De huidige beheersingspolitiek met oorlogsvoorraad
- De streefniveaus uit VA
- De economische KLu voorraad

Figuur S.2 geeft de resultaten van bovenstaande vergelijkingen weer en laat zien hoe de huidige methodiek in de praktijk is toegepast.



Figuur S.2. Numerieke resultaten van de case Koninklijke Luchtmacht

Het verbeterpotentieel is gedefinieerd als de procentuele besparing in investering in spare parts, bij gelijke systeembeschikbaarheid. Uit de numerieke resultaten is gebleken dat het verbeterpotentieel dat METRIC kan bieden aan de KLu ten opzichte van de huidige besturingsmethodiek, is een klein verbeterpotentieel vast te stellen. Uit figuur S.2 is voor de andere vergelijkingen het verbeterpotentieel al te leiden.

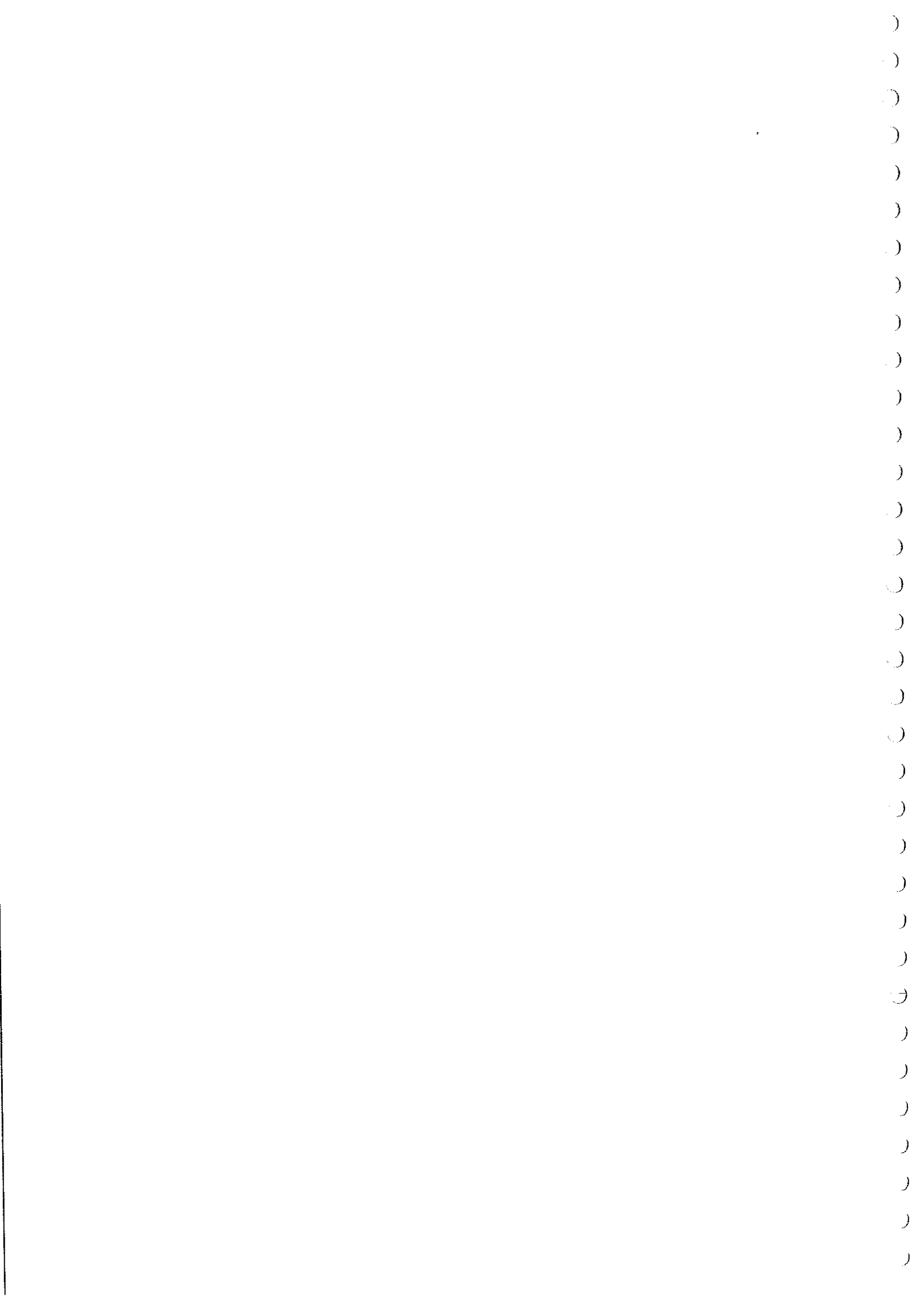
Implementatieaspecten

Uit de numerieke resultaten is een indicatie voor het verbeterpotentieel bepaald. Door gebrek aan gegevens kunnen de exacte streefniveaus niet worden vastgesteld en dus ook het verbeterpotentieel kan dus niet worden vastgesteld. Het verbeterpotentieel dat METRIC biedt t.o.v. de huidige besturingsmethodiek is ongeveer 10 %, maar wanneer we zien dat de investering in spare parts in de miljarden loopt, kan toch worden besloten om een kosten / baten analyse te maken. Wanneer de baten de kosten ruim overtreffen kan een migratiepad opgesteld worden waar de verschillende uit te voeren stappen in worden beschreven. Zaken die een succesvolle implementatie van METRIC in de weg kunnen staan zullen eerst aangepakt moeten worden. De directie zal bereid moeten zijn om METRIC te implementeren. Daarnaast is het belangrijk met betrouwbare programmatuur en betrouwbare inputdata te werken.

Conclusies

Uit het onderzoek kan worden vastgesteld dat METRIC een verbeterpotentieel kan bieden. Uit de numerieke resultaten is een *indicatie* voor het verbeterpotentieel vastgesteld en niet het exacte verbeterpotentieel. Dit is te wijten aan de slechte data registratie binnen de KLu. Daarnaast is ook aan het licht gekomen dat in sommige gevallen artikelen eerst een tijd liggen te wachten, voordat ze opgestuurd mogen worden ter reparatie. Als laatste is uit het onderzoek naar voren gekomen dat de MTBF's die opgegeven zijn door de fabrikanten, de werkelijkheid maar zelden benaderen. Bij het initieel aanschaffen van een spare parts pakket wordt op basis van deze MTBF's en het aantal operationele uren een pakket aangeschaft.

Er mag dus geconcludeerd worden dat een goed registratiesysteem voor de verschillende data noodzakelijk is. Bij een goed registratiesysteem en de METRIC methodiek is een ijzersterk tool in handen, dat gebruikt kan worden bij onderhandelingen tussen verschillende partijen.



Voorwoord

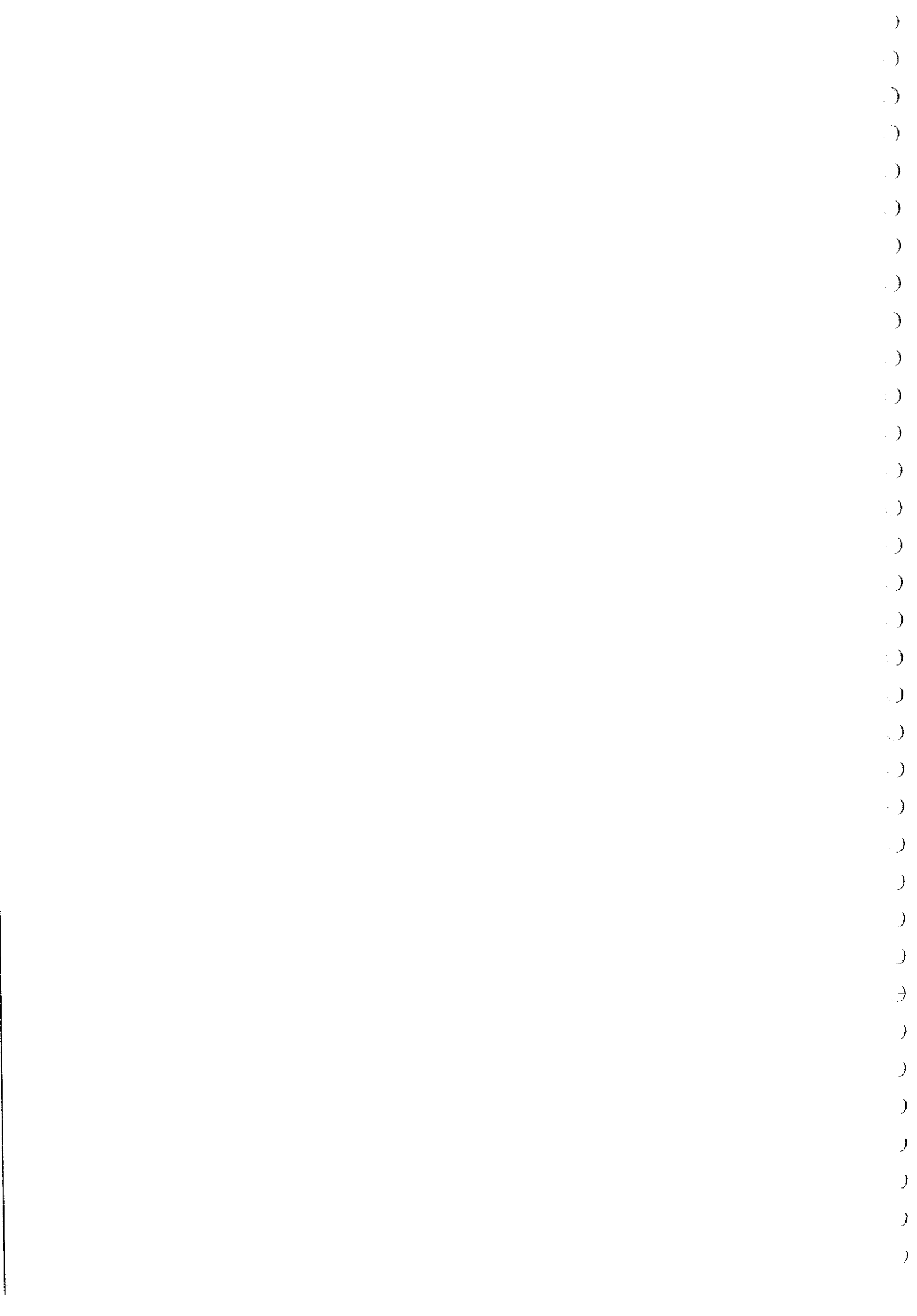
Ter voltooiing van mijn 4-jarige opleiding Technische Bedrijfskunde, afstudeerrichting Logistieke Beheersingssystemen, aan de Technische Universiteit Eindhoven, ben ik gedurende ruim 6 maanden bezig geweest met het afstudeerproject. Dit afstudeerproject is uitgevoerd in opdracht van de Koninklijke Luchtmacht. Het doel van deze opdracht is om na te gaan wat voor verbeterpotentieel METRIC (Multi Echelon Technique for Recoverable Item Control) aan de Koninklijke Luchtmacht kan bieden.

Deze afstudeerscriptie beschrijft het onderzoek dat is uitgevoerd om bovenstaande opdracht tot uitvoer te brengen. Hierbij is gekeken naar de huidige wijze van voorraadbeheersing en deze is vergeleken met de METRIC methodiek.

Bij deze wil ik een aantal mensen bedanken voor hun medewerking aan dit afstudeerproject. In de eerste plaats bedank ik mijn eerste begeleiders van de TUE en van het opdrachtgevende bedrijf: Geert-Jan van Houtum, Karel van Donselaar, Jürgen Donders en Frank van Meeteren. Ondanks het feit dat de samenwerking met Jürgen vanwege zijn uitzending naar Eritrea van korte duur was, heeft hij mijn bij de aanvang van mijn periode bij de Koninklijke Luchtmacht goed opgevangen. Bovenstaande mensen waren nauwkeurig betrokken bij dit project en hun professionele inbreng was onmisbaar. Tevens wil ik Jan-Willem Rustenburg van Districon, en hiermee ook Districon zelf, bedanken voor de grote hulp die hij heeft geleverd bij het maken van het Delphi programma dat ik nodig had bij mijn opdracht en voor de verdere adviezen die ik van hem ontvangen heb. Als laatste wil ik mijn collegae bij de Koninklijke Luchtmacht bedanken voor de aangename werkplek die zij mij gedurende ruim zes maanden hebben verschaft.

Ik hoop dat in navolging van dit onderzoek een vervolgonderzoek plaats zal vinden, waarbij vooral naar de implementatieaspecten wordt gekeken, welke voor een succesvolle implementatie van de methodiek noodzakelijk zijn.

Edward Oele
's-Gravenhage, april 2001



Inhoudsopgave

INHOUDSOPGAVE	1
INLEIDING	3
HOOFDSTUK 1 ONDERZOEKSOPZET	5
1.1 ACHTERGROND.....	5
1.2 PROBLEEMSTELLING EN OPDRACHTFORMULERING.....	6
1.3 AFBAKENING.....	7
1.4 PLAN VAN AANPAK	7
HOOFDSTUK 2 SITUATIEBESCHRIJVING	9
2.1 SYSTEEMBESCHRIJVING.....	9
2.2 DE REPARATIE-DISTRIBUTIESTRUCTUUR.....	10
2.3 HUIDIGE WIJZE VAN VOORRAADBEHEERSING.....	13
2.4 VOORGAANDE ONDERZOEKEN NAAR METRIC.....	15
HOOFDSTUK 3 HET MODEL	16
3.1 RAAMWERK VAN HET MODEL.....	16
3.2 MODELBESCHRIJVING.....	17
3.2.1 <i>Modelkeuze</i>	17
3.2.2 <i>De inputvariabelen</i>	18
3.2.3 <i>De beslissingsvariabelen</i>	19
3.2.4 <i>De doelfunctie</i>	20
3.2.5 <i>De outputvariabelen</i>	20
3.3 AANNAMES.....	21
3.4 CONCLUSIE	22
HOOFDSTUK 4 DE ANALYSE VAN HET MODEL	23
4.1 BEPALEN SYSTEEMBESCHIKBAARHEID.....	23
4.1.1 <i>Analyse van de pijplijnvoorraden</i>	23
4.1.3 <i>Het fitten van een verdeling</i>	26
4.1.3 <i>Systeembeschikbaarheid</i>	26
4.2 HET ALGORITME.....	27
HOOFDSTUK 5 OPZET ONDERZOEKSCASE EN NUMERIEKE RESULTATEN	29
5.1 CASE KONINKLIJKE LUCHTMACHT	29
5.1.1 <i>De artikelenselectie</i>	29
5.1.2 <i>De inputdata</i>	30
5.2 BEPALEN VERBETERPOTENTIEEL.....	32
5.2.1 <i>METRIC</i>	33
5.2.2 <i>De huidige besturingsregel zonder oorlogsvoorraad</i>	34
5.2.3 <i>De huidige besturingsregel met oorlogsvoorraad</i>	35
5.2.4 <i>De huidige streefniveaus</i>	36
5.2.5 <i>De huidige economische voorraad</i>	36
5.2.5 <i>Het verbeterpotentieel</i>	37
5.3 RESULTATEN VOLLEDIGE CASE KONINKLIJKE LUCHTMACHT.....	37
5.4 DE GEVOELIGHEIDSANALYSE	39
5.5 WHAT-IF ANALYSE.....	41
5.6 CONCLUSIE	42
HOOFDSTUK 6 IMPLEMENTATIEASPECTEN	43
6.1 REGISTRATIE INPUTDATA.....	43
6.2 IMPLEMENTATIEASPECTEN BIJ INVOERING VAN METRIC	43
6.3 ALGEMENE CONCLUSIE.....	44
HOOFDSTUK 7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	45
7.1 CONCLUSIES	45
7.2 AANBEVELINGEN.....	46

LITERATUURLIJST.....	48
LIJST VAN AFKORTINGEN.....	49
BIJLAGEN.....	50
Bijlage A Systeembeschikbaarheid	51
Bijlage B Afleidingen van vergelijkingen uit hoofdstuk 4	52
Bijlage C Fitting procedure voor discrete verdeling.....	54
Bijlage D Lijst van inputdata.....	56
Bijlage E Verschillende iteratiestappen bij greedy algoritme case KLu.....	58
Bijlage F Beschikbaarheidscurven What-if analyse.....	61
Bijlage G Toetsing verbruiksprocessen.....	62
Bijlage H Enkele iteratiestappen ter controle van de programmatuur.....	63

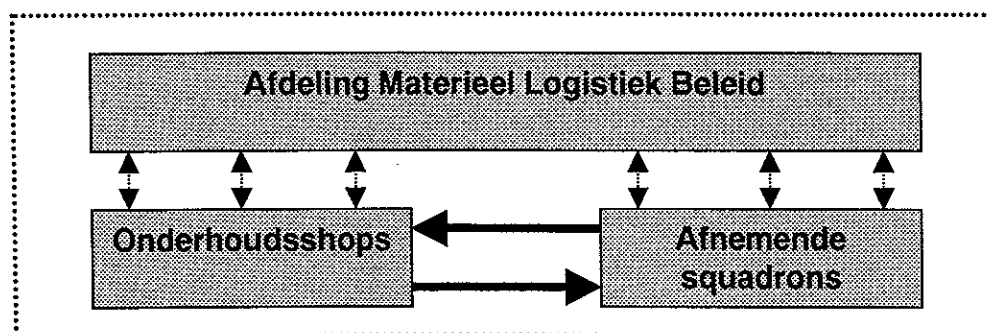
Inleiding

Dit verslag is een scriptie van het afstudeerproject dat is uitgevoerd in opdracht van de Koninklijke Luchtmacht (KLu). Binnen de afdeling Materieel Logistiek Beleid (MXM) van de KLu bestaat de indruk de huidige investering in spare parts relatief hoog is in relatie tot de inzetbaarheid van de (wapen)systemen. Vanuit deze probleemdefiniëring is gekeken naar een voorraadbeheersingsmethodiek voor spare parts, waarbij de inzetbaarheid van het systeem centraal staat. Het aantal methodieken dat deze doelstelling in ogenschouw neemt, is gering en één van die methodieken is METRIC (Multi Echelon Technique for Recoverable Item Control). Ondergetekende, afstuderend binnen de capaciteitsgroep Logistieke Beheersingssystemen van de faculteit Technology Management van de Technische Universiteit Eindhoven, is gevraagd om te onderzoeken of METRIC toepasbaar is binnen de KLu, en, wanneer dit het geval is, na te gaan wat het mogelijke verbeterpotentieel voor de KLu is. Gedurende een periode van ruim 6 maanden is een onderzoek uitgevoerd en hieruit is gebleken dat METRIC toepasbaar is. De KLu beschikt over dure (wapen)systemen, welke allen een diversiteit aan artikelen verbruiken en gebruiken. De eenheidsprijzen van deze artikelen zijn vaak aanzienlijk en een goede voorraadbeheersingspolitiek is dan ook ten zeerste gewenst.

De volgende partijen zijn bij dit afstudeeronderzoek betrokken:

- Afnemende squadrons op de vliegbases, ofwel de klanten. Deze squadrons zijn de gebruikers van de (wapen)systemen en worden derhalve ook wel klanten genoemd. Tijdens dit onderzoek is besloten om de f-16 als technisch systeem te nemen en voor dit systeem na te gaan wat METRIC kan bieden. De f-16 is gestationeerd op een drietal vliegbases, te weten Volkel, Leeuwarden en Twente. Op elke vliegbasis bevinden zich twee à drie afnemende squadrons. Daar deze squadrons als klanten worden getypeerd, is het belangrijk om zoveel mogelijk te voldoen aan de vraag naar artikelen.
- De leveranciers van de artikelen. Dit zijn de onderhoudsshops, waar de artikelen worden gerepareerd. De reparatie van artikelen kan plaats vinden op een drietal locaties. In de eerste plaats vinden op de vliegbasis zelf de kleinere reparaties plaats. Het grotere en complexere onderhoud wordt uitgevoerd op één van de twee depots. Deze depots bevinden zich in Woensdrecht en Rhenen. In Woensdrecht vindt vooral mechanisch onderhoud plaats, terwijl in Rhenen vooral elektronica wordt onderhouden. Ten derde vindt ook nog reparatie bij de industrie plaats. Wanneer de reparatie om bepaalde redenen niet zelf kan worden uitgevoerd, wordt het artikel ter reparatie aangeboden bij de industrie.
- Afdeling Materieel Logistiek Beleid (MXM). De afdeling MXM is belast met het ontwikkelen van een logistiek beleid en het scheppen van randvoorwaarden, waar bovengenoemde partijen binnen kunnen opereren. Deze afdeling stationeert op het Hoofdkwartier in Den Haag.

In figuur 0.1 staan de relaties tussen bovenstaande partijen weergegeven.



Figuur 0.1: Betrokken partijen

Doelstelling van het onderzoek is om vast te stellen wat het verbeterpotentieel van METRIC ten opzichte van de huidige wijze van voorraadbeheersing is. Het verbeterpotentieel van METRIC is vastgesteld en de aanbeveling luidt om, wanneer voldoende en betrouwbare data voor handen zijn, de implementatieaspecten te onderzoeken. Er zal een kosten / baten analyse gemaakt moeten worden en wanneer de baten significant groter zijn dan de kosten, zal een migratiepad opgesteld moeten worden. In dit migratiepad dienen de verschillende stappen die moeten worden uitgevoerd nauwkeurig te worden beschreven.

Hoofdstuk 1 Onderzoekopzet

In dit hoofdstuk zal de opzet van dit afstudeeronderzoek worden weergegeven. In de eerste plaats zal de achtergrond van dit onderzoek worden toegelicht (§1.1). Vanuit deze achtergrond worden de probleemstelling en opdrachtformulering beschreven (§1.2). Vervolgens zal het probleem worden afgebakend, zodat het project binnen een tijdsbestek van zes maanden op een wetenschappelijk verantwoorde manier kan worden afgerond (§1.3). Als laatste wordt het plan van aanpak uiteengezet dat tijdens dit afstudeeronderzoek zal worden gevolgd (§1.4).

1.1 Achtergrond

Voorraadbeheersing is een vakgebied dat al geruime tijd wordt bestudeerd. In de meeste gevallen gaat het dan om producten die door derden (klanten) worden afgenomen. Om zoveel mogelijk aan de klantvraag te kunnen voldoen, zijn in de loop der jaren vele methodieken ontwikkeld om de klantvraag zo nauwkeurig mogelijk te voorspellen. Een goede voorspelling van de klantvraag is voor veel bedrijven van belang, omdat op basis van deze voorspelling de klantvraag zo goed mogelijk aan kan sluiten op de productieplanning. Doelstelling bij dergelijke problemen is om een balans te vinden tussen de hoogte van de voorraad en de gewenste servicegraad die aan de klant geboden wenst te worden. De voorraadbeheersing van spare parts is echter lange tijd onderbelicht gebleven, maar krijgt de laatste jaren steeds meer aandacht. De gedachte leeft dat op dit gebied nog aanzienlijke besparingen te behalen zijn. Bedrijven die werken met dure complexe technische systemen werken voor de voorraadbeheersing van hun spare parts vaak met vuistregels of op basis van statistische voorraadbeheersing. Volcontinue bedrijven zijn een voorbeeld van bedrijven die vaak met dergelijke systemen werken. De kosten die gepaard gaan met het uitvallen van zo'n systeem zijn vaak zeer hoog. Behalve in productiebedrijven spelen spare parts ook binnen militaire organisaties een cruciale rol. Binnen militaire organisaties wordt vaak gewerkt met dure complexe (wapen)systemen. Wapen staat tussen haakjes, omdat niet alle systemen binnen een militaire organisatie wapensystemen zijn. Militairen zijn gebaat bij een hoge beschikbaarheid van hun (wapen)systemen, omdat dit in geval van oorlog leven of dood kan betekenen. Niet alleen in oorlog dienen de (wapen)systemen een groot deel van de tijd beschikbaar te zijn, ook in vreedstijd is het van belang om de militairen zo veel mogelijk te laten trainen met de (wapen)systemen.

Zoals gezegd is het van groot belang dat een (wapen)systeem zo min mogelijk 'down' gaat. Echter het is niet altijd te voorkomen dat een (wapen)systeem 'down' gaat. Wanneer een (wapen)systeem 'down' gaat en dit wordt veroorzaakt door een defect onderdeel, kunnen twee maatregelen worden genomen. In de eerste plaats kan het onderdeel worden verwijderd en opgestuurd worden om gerepareerd te worden. Gedurende de reparatie van dit onderdeel is het (wapen)systeem niet in werking en kunnen militairen niet getraind worden. Het alternatief is dat spare parts op voorraad worden gehouden zodat het defecte onderdeel direct kan worden vervangen en het (wapen)systeem slechts voor zeer korte tijd 'down' gaat. Wanneer een hoge inzetbaarheid van het (wapen)systeem gewenst is, zullen spare parts op voorraad moeten worden gehouden. Een hoge gewenste beschikbaarheid en de grote investering in spare parts vormde de aanleiding voor dit onderzoek.

Zoals gezegd is de voorraadbeheersing van spare parts veelal intuïtief en ongefundeerd en in veel organisaties is dan ook volop ruimte voor verbetering. Naast het feit dat de kosten van het 'down' gaan van een systeem vaak zeer hoog zijn, zijn ook aan het aanhouden van voorraden hoge kosten verbonden. Dit komt door de hoge eenheidsprijs van de onderdelen, maar ook door de hoge risico's die aan het aanhouden van deze voorraden zijn verbonden. Het falen van onderdelen is moeilijk voorspelbaar en hierdoor heeft men tevens te maken

met risico van incurant raken van voorraden. Deze mate van onvoorspelbaarheid kan een aanleiding zijn tot het aanhouden van hoge voorraden. Het is wenselijk om het faalgedrag zo goed mogelijk te kunnen voorspellen, zodat een goede voorraadbeheersing mogelijk is. Het kunnen voorspellen vereist een hoge mate van wiskundige kennis. Voor wat betreft repareerbare spare parts moet een diversiteit aan data bekend zijn, om met enige zekerheid uitspraken te doen voor wat betreft de voorspelbaarheid van het falen. Wanneer het faalgedrag goed voorspelbaar is, kunnen de voorraden van de spare parts binnen de perken blijven en goed aansluiten op de vraag naar deze spare parts. Dit afstudeerproject onderzoekt de mogelijkheden van systeemgerichte bevoorrading binnen de Koninklijke Luchtmacht (KLu). Bij systeemgerichte bevoorrading staat de beschikbaarheid van het systeem als geheel centraal en worden op basis van verschillende inputdata de optimale voorraadhoogtes bepaald voor de spare parts van dat systeem.

1.2 Probleemstelling en opdrachtformulering

Probleemstelling

De opdrachtgever (KLu) tijdens dit afstudeerproject is tevens de probleemhebber. De gedachte leeft dat, gegeven de huidige voorraadbeheersingmethodiek voor spare parts, de bereikte inzetbaarheid van de (wapen)systemen relatief laag is. Binnen de KLu zijn er verschillende velden operationeel, waar een bepaalde inzetbaarheid van de (wapen)systemen moet worden bereikt. Per veld zijn een of meerdere squadrons operationeel die gebruik maken van de (wapen)systemen. De afdeling Materieel Logistiek Beleid (MXM) is belast met de voorraadbeheersing van spare parts van de (wapen)systemen en de probleemstelling wordt als volgt gedefinieerd:

Binnen de afdeling Materieel Logistiek Beleid (MXM) bestaat de indruk dat de huidige investering in spare parts relatief hoog is in verhouding tot de gerealiseerde inzetbaarheid van de (wapen)systemen.

De probleemhebber tijdens dit onderzoek is de afdeling MXM, die belast is met de voorraadbeheersing van spare parts. Deze afdeling is belast met het scheppen van condities en het creëren van randvoorwaarden, met als doelstelling het bereiken van een bepaalde inzetbaarheid van de (wapen)systemen die de KLu beheert. Er zijn een vijftal systemen die operationeel zijn. Een belangrijk (wapen)systeem is het jachtvliegtuig, de f-16. Daarnaast beschikt de KLu nog over helikopters, geleide wapens, transportsystemen en overige systemen, voor welke ook allen een bepaalde inzetbaarheid moet worden gerealiseerd.

Opdrachtformulering

De probleemstelling suggereert dat de voorraadinvestering relatief hoog is in relatie tot de gerealiseerde inzetbaarheid van de verschillende (wapen)systemen. De doelstelling van de KLu is dat zij staan voor de inzetbaarheid van haar personeel en materieel. De verschillende (wapen)systemen dienen allen een bepaalde inzetbaarheid te behalen en het liefst tegen een zo laag mogelijke investering in spare parts. De doelstelling is dus het bereiken van een bepaalde inzetbaarheid en een methodiek die deze doelstelling voor ogen heeft, is METRIC (Multi Echelon Technique for Recoverable Item Control). Deze theorie is ontwikkeld door Sherbrooke [8] en is toegespitst op de voorraadbeheersing van spare parts. De doelstelling van dit onderzoek is om te achterhalen of METRIC toepasbaar is binnen de KLu en indien mogelijk het verbeterpotentieel vast te stellen. De opdracht wordt als volgt geformuleerd:

Onderzoek of METRIC toepasbaar is in de situatie van de KLu en stel het mogelijke verbeterpotentieel vast.

De opdrachtformulering is tweeledig. In de eerste plaats zal moeten worden gekeken of METRIC überhaupt toepasbaar is binnen de KLu. Wanneer dit het geval is zal het mogelijke verbeterpotentieel moeten worden vastgesteld. De basis van de METRIC theorie wordt gevormd door Sherbrooke [8]. In navolging van Sherbrooke is deze theorie door verschillende mensen verder uitgewerkt. Rustenburg [6] is één van die mensen die deze theorie verder uitgediept heeft en zijn proefschrift vormt de basis voor dit afstudeerproject. De inzetbaarheid van het systeem kan voor een bepaald budget worden gemaximaliseerd. Daarnaast kan ook vastgesteld worden welk budget moet worden besteed aan verschillende spare parts om een bepaalde inzetbaarheid van het systeem te realiseren. Dit laatste is het geval binnen de KLu, waarbij een bepaalde inzetbaarheid moet worden bereikt tegen een zo laag mogelijke investering in spare parts.

1.3 Afbakening

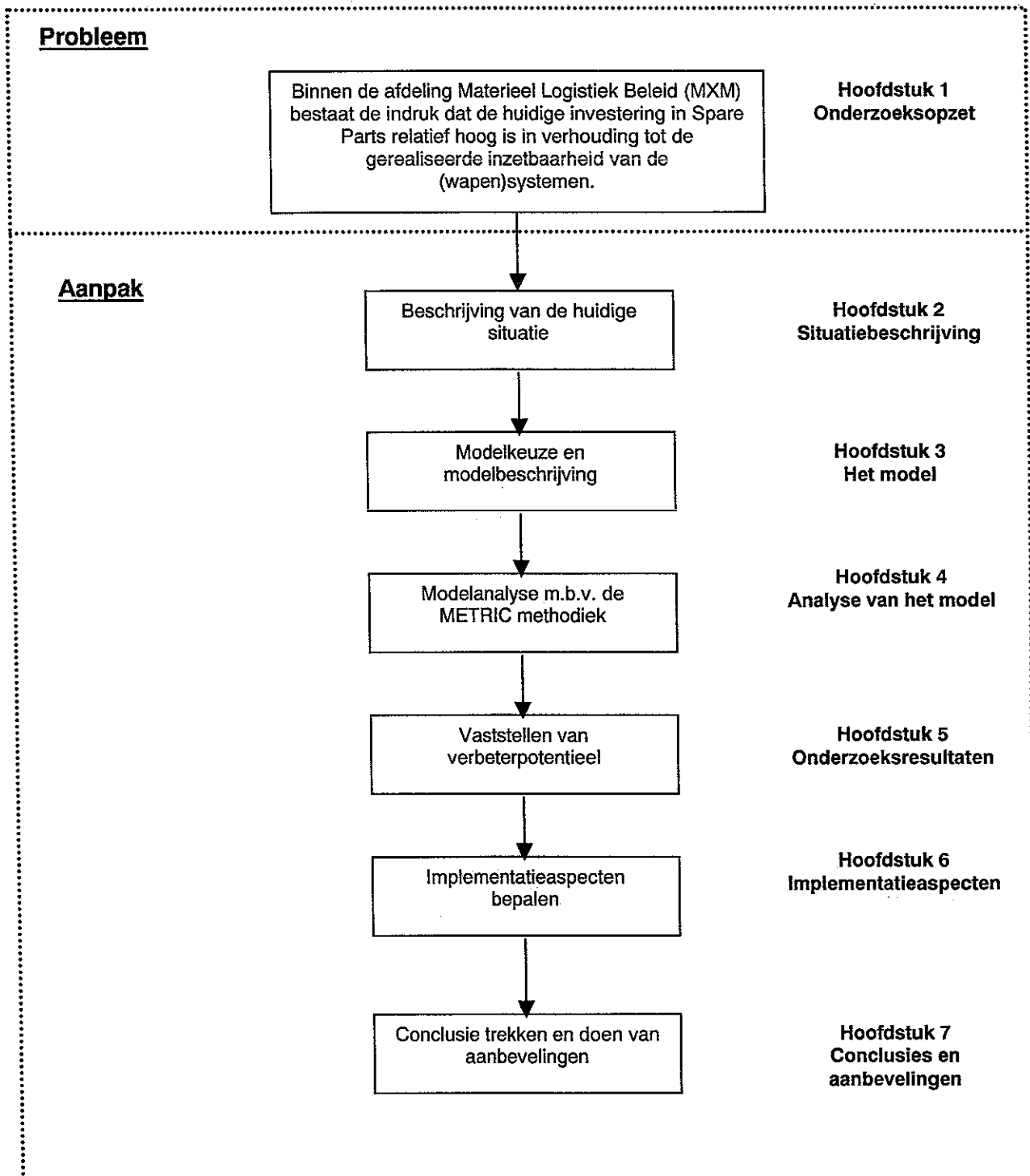
Om tot goed onderbouwde conclusies en aanbevelingen te komen is het wenselijk dat het onderzoek niet te omvangrijk is. Enerzijds omdat bij een te omvangrijk project de voortgang moeilijker te bewaken is en dit de betrouwbaarheid van het onderzoek in gedrang kan brengen. Anderzijds omdat het onderzoek afgerond dient te worden binnen een tijdsbestek van 6 maanden. De KLu beschikt over een vijftal (wapen)systemen en tijdens dit onderzoek zal één van deze vijf systemen nader beschouwd worden. Dit onderzoek zal zich beperken tot de inzetbaarheid van de jachtvliegtuigen, ofwel de f-16's. De voorraadinvestering in spare parts van f-16 artikelen vormt het grootste aandeel in de totale voorraad spare parts waarover de KLu beschikt. Verondersteld wordt dan ook dat wanneer er winst te behalen is met behulp van andere voorraadbeheersingmethodiek, deze vooral bij de f-16's te halen is.

1.4 Plan van aanpak

In § 1.2 zijn de probleemstelling en opdrachtformulering vastgelegd. Vervolgens is het probleem afgebakend zodat het onderzoek binnen een tijdsbestek van 6 maanden op een wetenschappelijk verantwoorde manier kan worden afgerond. De doelstelling van dit afstudeeronderzoek is het vaststellen van het mogelijke verbeterpotentieel dat METRIC kan bieden ten opzichte van de huidige manier van voorraadbeheersing. Om dit verbeterpotentieel op gestructureerde wijze vast te stellen, moeten een aantal verschillende stappen worden uitgevoerd. De volgorde van deze verschillende stappen is in figuur 1.1 schematisch weergegeven. Deze figuur en de bijbehorende stappen geven tevens een overzicht van de opbouw van deze scriptie.

De eerst volgende stap die moet worden uitgevoerd is het vaststellen en beschrijven van de huidige situatie (hoofdstuk 2). Het systeem dat ondersteund moet worden, zal worden beschreven, de reparatie-distributiestructuur en de huidige wijze van voorraadbeheersing zullen worden uiteengezet. Er zal hoofdzakelijk informatie worden gegeven waaruit duidelijk wordt of het mogelijk en zinvol is om de voorraadbeheersing met behulp van METRIC te ondersteunen. Wanneer het onmogelijk is om METRIC toe te passen binnen de KLu zal onderzocht moeten worden of een andere methodiek tot goedkopere voorraadinvesteringen kan leiden. Als het wel mogelijk is om METRIC toe te passen zal een model moeten worden gekozen (hoofdstuk 3). De keuze van dit model hangt af van de belangrijkste eigenschappen van de praktijksituatie. Het model en de eigenschappen van de praktijksituatie binnen de KLu zullen zoveel mogelijk overeen moeten komen, zodat aanpassingen van het model en de programmatuur tot een minimum blijven beperkt. Vervolgens zal het gekozen model worden geanalyseerd. Wanneer het model geanalyseerd is kan een case worden doorgerekend (hoofdstuk 5). Om deze case door te rekenen zijn diverse data nodig van de voor de case geselecteerde artikelen. Deze data worden in het model ingevoerd en het model berekent

vervolgens de optimale voorraadhoogten. Tevens kan het model bepalen wat bij de huidige wijze van voorraadbeheersing de bereikte inzetbaarheid is en welke investering in spare parts hiermee gepaard gaat. Op basis van deze twee uitkomsten kan het verbeterpotentieel worden vastgesteld. Wanneer er voldoende verbeterpotentieel aanwezig is kan worden gekeken naar de implementatieaspecten (hoofdstuk 6). Wanneer deze implementatieaspecten zijn belicht kunnen uit het onderzoek algemene conclusies worden getrokken en aanbevelingen worden gedaan (hoofdstuk 7). In figuur 1.1 staan bovenstaande stappen schematisch weergegeven.



Figuur 1.1: *Stappenplan afstudeerproject*

Hoofdstuk 2 Situatiebeschrijving

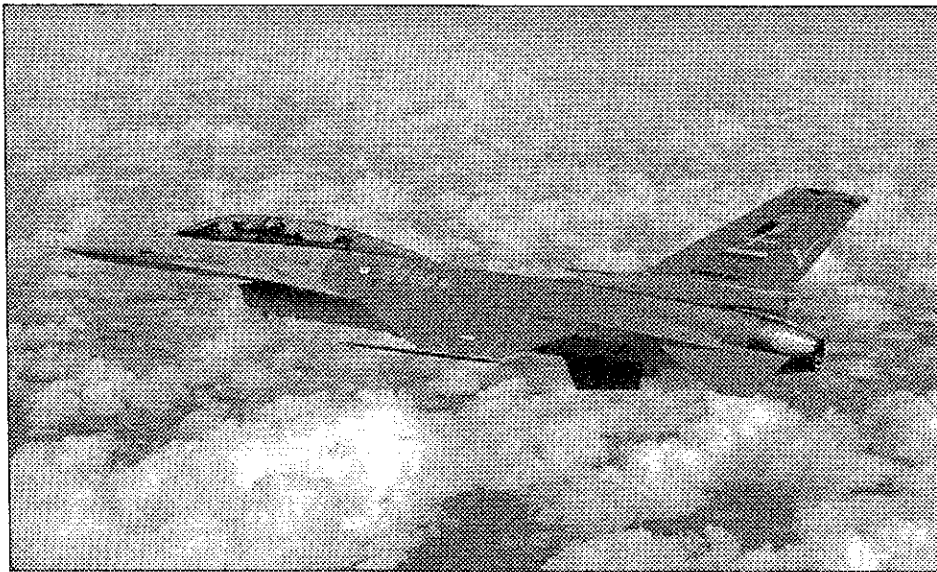
In dit hoofdstuk wordt de huidige situatie van de KLu geschetst. Allereerst zal het technische systeem, waarvoor spare parts aangehouden worden, worden beschreven (§2.1). Vervolgens zal de reparatie-distributiestructuur worden beschreven (§2.2). Daarna zal de huidige wijze van voorraadbeheersing worden beschreven (§2.3). Dit hoofdstuk zal worden afgesloten met een korte beschrijving van voorgaande onderzoeken naar METRIC bij de KLu (§2.4).

2.1 Systeembeschrijving

Het systeem dat tijdens dit onderzoek centraal staat is het jachtvliegtuig, ofwel de f-16. De f-16 is een belangrijk (wapen)systeem dat de KLu beheert en kan voor verschillende doeleinden worden ingezet. In de eerste plaats kunnen f-16's worden ingezet voor luchtverdediging. Onder luchtverdediging wordt het verdedigen van andere vliegtuigen of helikopters die zich in de lucht bevinden verstaan. De f-16 wordt dan uitgerust met moderne wapens die hun doel zelf opzoeken. Als tweede missie kunnen f-16's worden ingezet ter ondersteuning van grondtroepen en zeemacht. Wanneer oorlog wordt gevoerd op zee of op het land, worden f-16's uitgerust met bommen welke boven hun doel worden gedropt. Het grootste verschil zit in de manier van bewapening. Ten derde worden f-16's ingezet voor verkenning- en/of navigatievluchten. Bij een dergelijke missie wordt de f-16's uitgerust met fotoapparatuur en bij zeer lange vluchten kunnen zelfs externe brandstoftanks worden aangekoppeld. Het is voor elke missie van groot belang dat de gebruikers (squadrons) van de f-16's goed getraind zijn. Op elke vliegbasis bevinden zich 2 à 3 squadrons. Tot deze squadrons behoren ook de piloten (vliegers) van de f-16's. Deze vliegers moeten jaarlijks een aantal vliegreizen maken en om aan deze vliegreizen te komen is het noodzakelijk dat de f-16 vloot ook in vredetijd een bepaalde inzetbaarheid realiseert. De probleemstelling, zoals die in hoofdstuk 1 gedefinieerd is, vertelt ons echter dat de gedachte leeft, dat de gerealiseerde inzetbaarheid van de (wapen)systemen relatief laag is ten opzichte van de huidige voorraadinvestering. De inzetbaarheid van het systeem hangt af van de beschikbaarheid van de verschillende *Line Replaceable Units (LRU's)*. Een LRU is een artikel dat rechtstreeks uit de f-16 wordt gedemonteerd en vervolgens uit andere artikelen is samengesteld. Wanneer een bepaalde LRU niet voor handen is, kan de f-16 niet opstijgen en krijgt hij de status *Not Mission Capable due to Supply (NMCS)*. Artikelen waar deze LRU's weer uit zijn opgebouwd worden *Shop Replaceable Units (SRU's)* genoemd. Overigens zijn niet alle LRU's verder opgebouwd uit SRU's. Deze SRU's zorgen op hun beurt weer voor de beschikbaarheid van de LRU en zodoende hebben ze indirect invloed op de beschikbaarheid van de f-16. Wanneer deze SRU's behoren tot LRU's die binnen de KLu mogen worden gerepareerd, worden deze ook op voorraad gehouden. Wanneer de bovenliggende LRU niet binnen de KLu wordt gerepareerd, maar altijd wordt opgestuurd naar de industrie, heeft het weinig zin om van de SRU spare parts op voorraad te houden. SRU's zijn vervolgens weer verder opgebouwd uit kleinere componenten.

De f-16 is opgebouwd uit ruim 44.000 artikelen. Voor dit onderzoek zal een fractie van deze artikelen worden meegenomen. METRIC is een methodiek die zeer wiskundig van aard is en veelvuldig moet doorrekenen. Uit efficiency oogpunt is het gewenst om een selectie van artikelen te maken. Belangrijke selectiecriteria zijn onder andere een hoge eenheidsprijs van de artikelen, herleidbaarheid van de systeemconfiguratie en beschikbaarheid van de inputdata. Artikelen met een lagere eenheidsprijs zijn minder interessant omdat het kapitaalbeslag minder groot is. Daarnaast is het financiële risico dat gepaard gaat met het incurant raken van het artikel bij duurdere artikelen een stuk groter dan bij goedkopere artikelen. Om met METRIC te werken is het van belang om een goed inzicht te hebben in de opbouw van het systeem of artikel (systeemconfiguratie). Ook met zaken als commonality en

redundantie moet rekening worden gehouden. Wanneer een SRU in meerdere LRU's binnen één (wapen)systeem zit gemonteerd, is er sprake van commonality. Redundantie treedt op wanneer in de LRU een reserve SRU zit ingebouwd, welke bij het uitvallen van de defecte SRU, de functie van die SRU overneemt. De verschillende inputdata zijn voor een groot deel te achterhalen in het centrale *Voorraadadministratiesysteem (VA)*. Elk artikel heeft een *Nato Stock Number (NSN)* en bij dit NSN worden verschillende data bijgehouden, zoals verbruiken, eenheidsprijzen, enz.



Figuur 2.1: De f-16 (MLU)

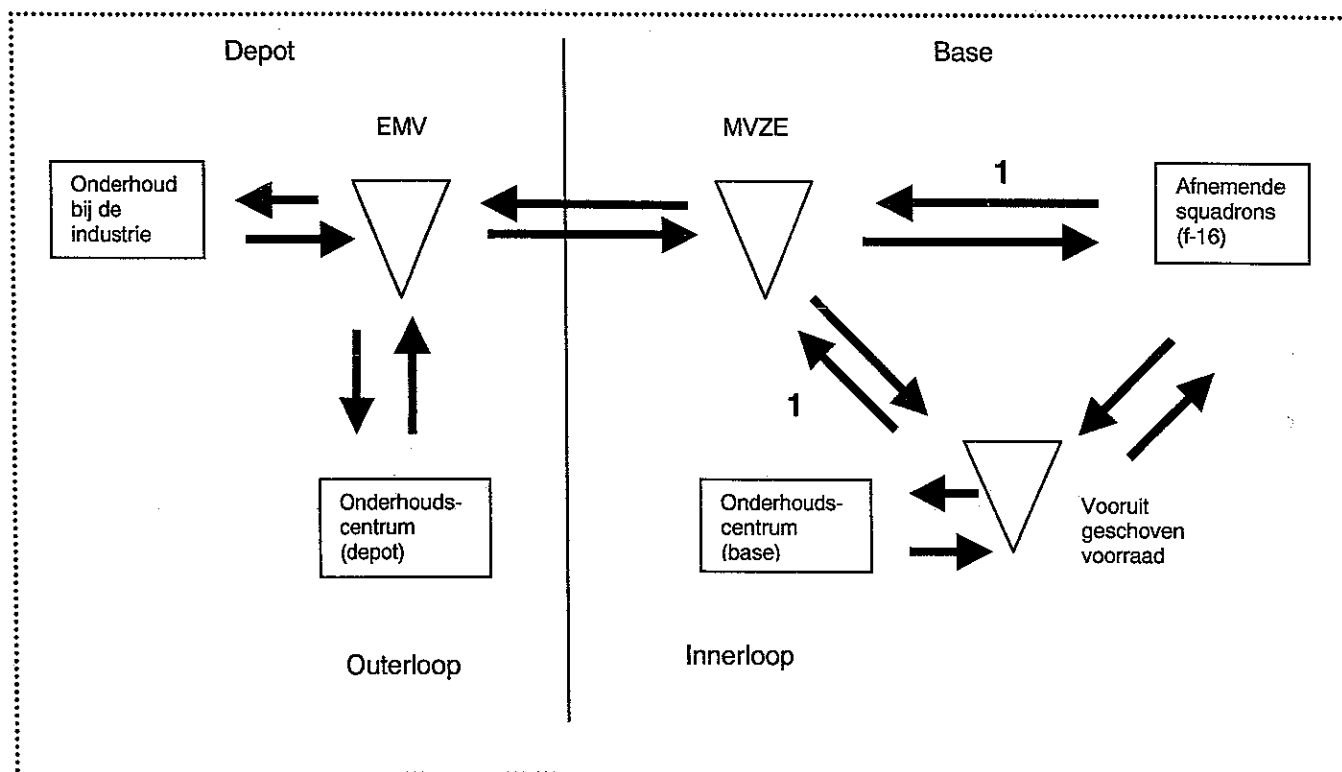
2.2 De reparatie-distributiestructuur

Zoals reeds is beschreven, is de f-16 een complex systeem, opgebouwd uit veel artikelen. Sommige artikelen zijn repareerbaar (repairables) en andere niet (consumables). Wanneer een artikel repareerbaar is, bezit het een *reparatiecode (repcode)* en afhankelijk van deze repcode, mag de reparatie van het artikel al dan niet door de KLu zelf worden uitgevoerd. De reparatie-distributiestructuur is deels afhankelijk van de repcode (zie figuren 2.2, 2.3, 2.4) Artikelen met repcode 1, 2 of 3 komen allen in aanmerking om binnen de KLu te worden gerepareerd. Reparatie binnen de KLu vindt plaats op één van de drie vliegbases of op één van de twee depots. In Nederland bevinden zich drie vliegbases, te weten in Volkel, Leeuwarden, en Twente waar met name het kleinere onderhoud plaats vindt. Het grotere onderhoud vindt plaats in Woensdrecht of Rhenen, waar de depots zijn gestationeerd. Naast bovenstaande repcodes kan een artikel ook repcode 4 bezitten en in dat geval wordt het artikel per definitie bij de industrie gerepareerd.

Het tijdstip waarop een defect artikel wordt gesignaleerd, kan zowel voor als tijdens de vlucht zijn. Voordat een f-16 opstijgt, vindt eerst een uitgebreide test plaats. Deze test duurt ongeveer een half uur en deze test geeft aan welke LRU's defect zijn. Wanneer een LRU defect is, wordt er niet opgestegen. Eerst moet de defecte LRU worden vervangen door een bruikbare. Wanneer geen bruikbare artikelen op voorraad liggen, krijgt de f-16 de status NMCS totdat een bruikbare LRU beschikbaar is en kan worden ingebouwd in de f-16. Wanneer uit de test geen klachten voortvloeien, is de f-16 operationeel inzetbaar en kan deze opstijgen. Tijdens de vlucht kunnen ook klachten optreden. De vlieger kan dan naar eigen inzicht besluiten om wel of niet terug te keren naar de vliegbasis. Als de f-16 eenmaal is terug gekeerd op de vliegbasis vindt altijd debriefing plaats. Als uit het debriefen voortvloeit dat de piloot een klacht heeft, wordt deze klacht door middel van een codeboek vertaald en zo wordt vastgesteld welke LRU defect is. Wanneer duidelijk is welke LRU defect is, wordt

deze gedemonteerd en vervangen door een bruikbare LRU. De defecte LRU zal, in het geval van een repairable, gerepareerd moeten worden. Waar het artikel wordt aangeboden ter reparatie hangt zoals gezegd af van de repcode. Artikelen die binnen de KLu gerepareerd mogen worden, worden of op de vliegbasis zelf, of op het depot gerepareerd. Artikelen met repcode 3 worden altijd bij het depot aangeboden ter reparatie. Artikelen met repcode 2, mogen op de vliegbasis zelf gerepareerd worden, maar wanneer het op de vliegbasis aan resources ontbreekt, wordt het artikel naar het depot opgestuurd om gerepareerd te worden.

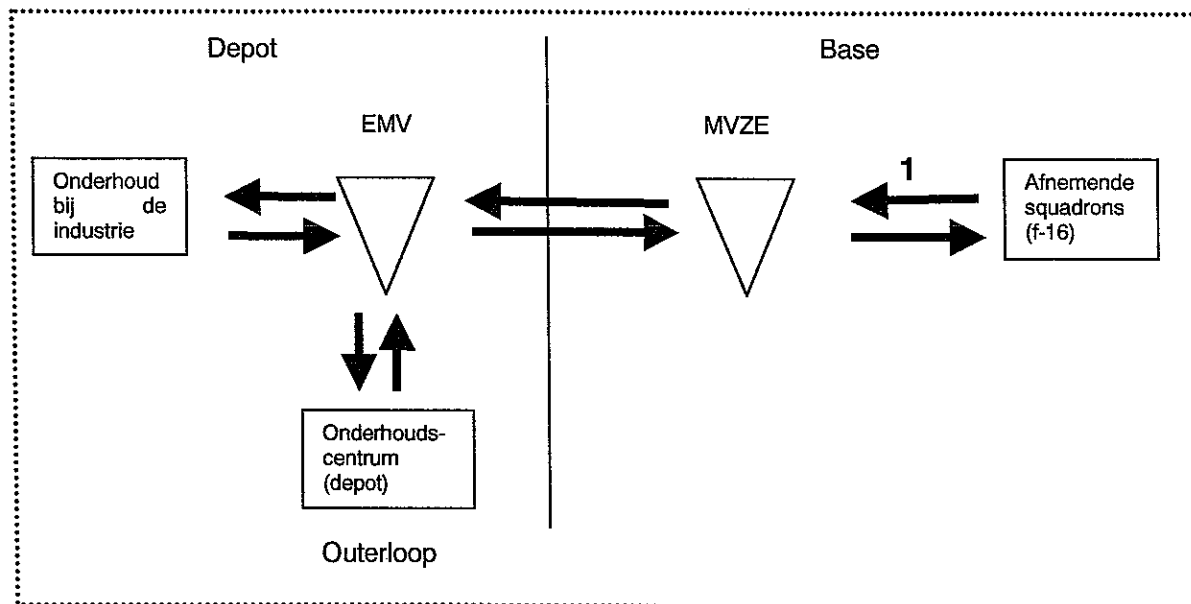
Artikelen die repcode 3 of 4 bezitten, worden per definitie opgestuurd naar het depot. Wanneer het een LRU betreft, gaat de defecte LRU over een testbank, waaruit vervolgens blijkt welke SRU de oorzaak van het defect is. Indien een bruikbare SRU voorradig is wordt de defecte SRU vervangen. Vervolgens wordt gekeken naar de repcode van de SRU en wordt de SRU afhankelijk van de repcode bij het depot of de industrie ter reparatie aangeboden. De repcodes van de LRU's en SRU's zijn dus niet per definitie gelijk. Wanneer artikelen worden opgestuurd naar het depot komen ze in de zgn. outerloop terecht. Binnen de KLu kent men een outerloop en een innerloop. Artikelen die op de vliegbasis worden gerepareerd komen in de innerloop terwijl artikelen die naar het depot opgestuurd worden ter reparatie in de outerloop terechtkomen. Van artikelen die op de vliegbasis gerepareerd worden, worden in VA geen data geregistreerd. Van het betreffende artikel kunnen wel verbruiksdata bekend zijn, echter deze *kunnen* dermate zijn vervuild dat ze niet betrouwbaar zijn. De defecte LRU's worden door de techneuten van de squadrons uit de f-16 gedemonteerd. Wanneer het artikel op de vliegbasis gerepareerd mag worden, komt het via de vooruitgeschoven voorraad bij het onderhoudscentrum op de vliegbasis terecht. Hier wordt het defecte artikel gerepareerd en vervolgens komt het weer in de vooruitgeschoven voorraad terecht. Wanneer het op de vliegbasis aan resources ontbreekt, wordt het artikel via de materieel voorzieningseenheid (MVZE) naar het depot opgestuurd.



Figuur 2.2: Algemene reparatie-distributiestructuur

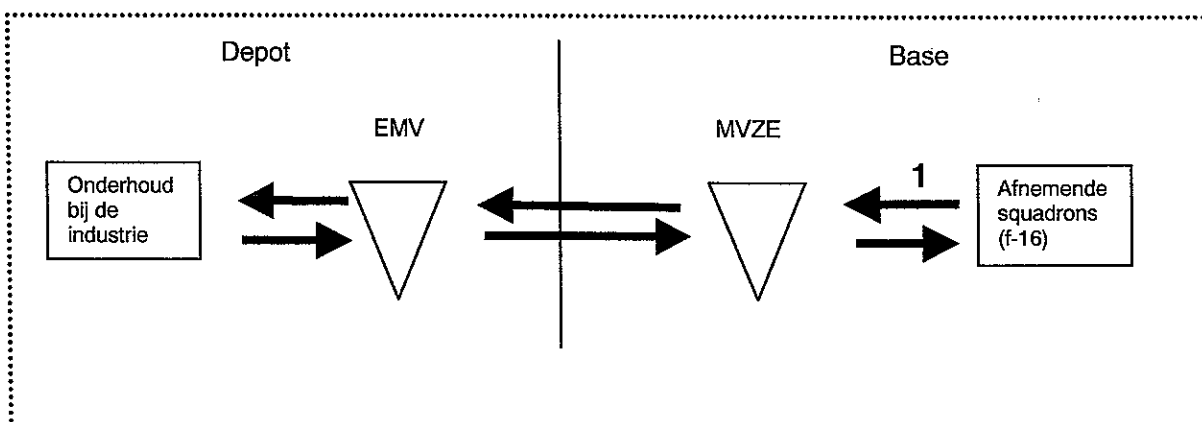
In figuur 2.2 staat de algemene reparatie-distributiestructuur weergegeven. In deze figuur zijn vier (voorraad)echelons te onderscheiden. In de eerste plaats ligt bij de afnemende squadrons (klanten) een vooruitgeschoven voorraad. Het tweede voorraadechelon bevindt

zich ook op de vliegbasis. Dit is het centrale voorraadpunt (MVZE), waar artikelen met rePCODE 3 of 4 (en soms rePCODE 2) worden verzameld om bij het depot ter reparatie te worden aangeboden. Het derde voorraadechelon is de externe materieel voorziening (EMV) en deze bevindt zich op het depot. Op het depot bevindt zich het logistieke centrum van de Koninklijke Luchtmacht (LCKLu). De KLu kent twee depots, te weten in Rhenen, waar met name reparatie van elektronica wordt uitgevoerd en in Woensdrecht, waar het complexere en mechanische onderhoud wordt uitgevoerd. Tot dit voorraadpunt behoren de artikelen die of op het depot of bij de industrie worden gerepareerd. De reparatie-distributiestructuur van artikelen met rePCODE 3 staat in figuur 2.3 weergegeven. In deze figuur is pijl 1 de verbruikstrigger voor VA.



Figuur 2.3: *Reparatie-distributiestructuur van artikelen met rePCODE 3*

Ten slotte vindt ook reparatie bij de industrie plaats en dit is tevens het vierde echelon, waar reparatie plaats vindt. Artikelen met rePCODE 4 worden via de EMV op het depot naar de industrie opgestuurd. Wanneer er op het depot onvoldoende resources aanwezig zijn om alle reparaties van artikelen met rePCODE 3 te repareren, worden deze artikelen via de EMV opgestuurd naar de industrie. De reparatie-distributiestructuur van artikelen met rePCODE 4 staat in figuur 2.4 weergegeven.

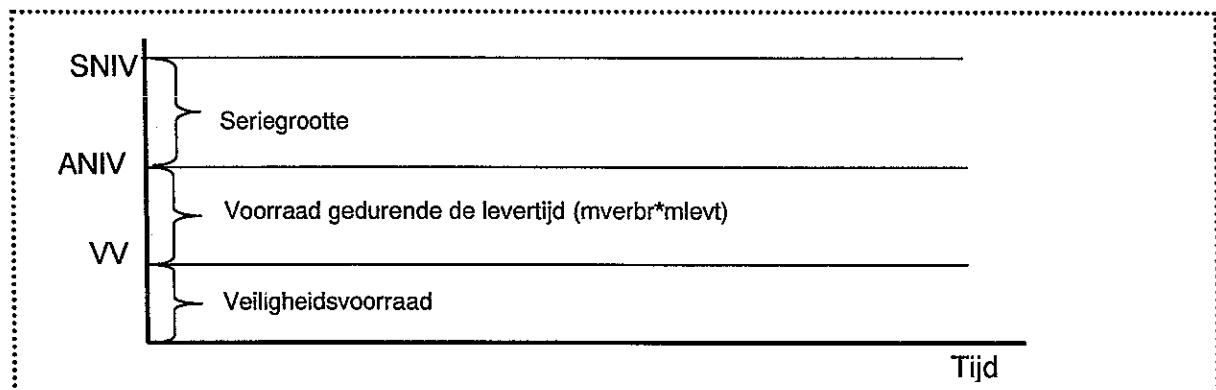


Figuur 2.4 *Reparatie-distributiestructuur van artikelen met rePCODE 4*

2.3 Huidige wijze van voorraadbeheersing

De huidige wijze van voorraadbeheersing op KLu niveau, kan worden getypeerd als een item approach. Per artikel wordt een bepaalde servicegraad nagestreefd terwijl de inzetbaarheid van het systeem als geheel buiten beschouwing wordt gelaten. De voorraadmiveaus dekken de vraag gedurende een bepaalde periode af. Daarnaast wordt omwille van het bereiken van een bepaalde servicegraad een veiligheidsvoorraad aangehouden. In de meeste gevallen is deze veiligheidsvoorraad afhankelijk van de spreiding in de vraag en/of levertijd. Deze spreiding wordt vervolgens met een zgn. veiligheidsfactor vermenigvuldigd en zo wordt de veiligheidsvoorraad vastgesteld. Dit is in veel bedrijven een gangbare methodiek en wanneer per artikel aan een bepaalde klantvraag moet worden voldaan is deze methodiek ook goed toepasbaar. In het geval van de KLu, die als doelstelling heeft om te staan voor een bepaalde inzetbaarheid van haar personeel en materieel, schiet een dergelijke methode te kort. Deze methodiek kijkt louter naar beschikbaarheden van artikelen afzonderlijk zonder daarbij de inzetbaarheid van het systeem in ogenschouw te nemen. Daarnaast bezit de KLu veel repareerbare spare parts (repairables) en voor repairables moet vooral de vraag gedurende de reparatiedoorlooptijd worden afgedekt. Voor de voorraadbeheersing die in VA wordt gevoerd, wordt binnen de KLu de *codebeheersmethodiek (cbm)* gehanteerd. Elk artikel krijgt een code toegewezen en deze code geeft aan hoe de verschillende streefniveaus zijn samengesteld. Consumables en repairables hebben ieder hun eigen streefniveaus welke als volgt zijn samengesteld:

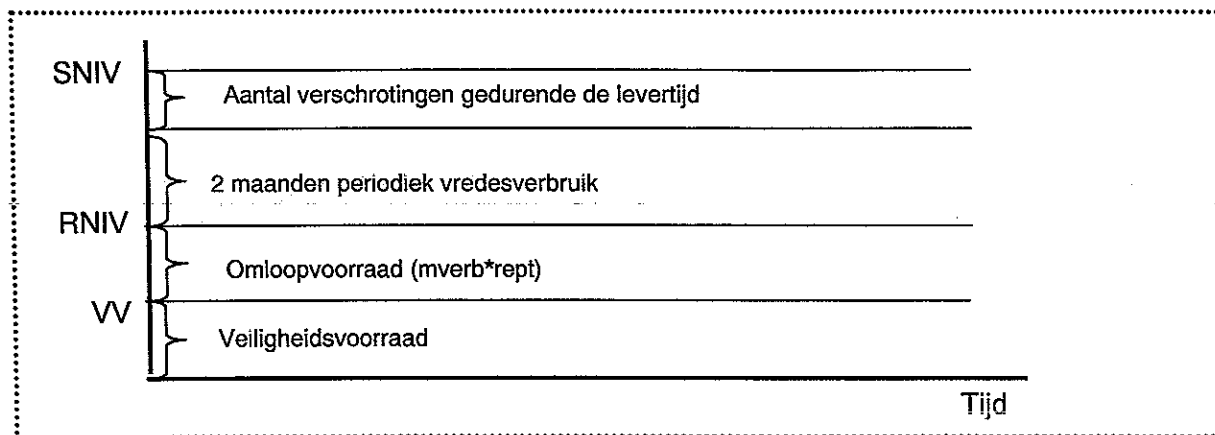
Consumables:



Figuur 2.5: De verschillende voorraadmiveaus voor consumables

Voor consumables zijn de streefniveaus (SNIV) samengesteld uit drie lagen. De eerste laag wordt gevormd door de veiligheidsvoorraad. Deze veiligheidsvoorraad wordt bepaald door de spreiding in zowel vraag als levertijd te vermenigvuldigen met een factor k . Deze spreiding in zowel vraag als levertijd wordt afgeleid volgens formule (7.43) uit [10]. Boven op deze veiligheidsvoorraad wordt een voorraad aangehouden welke de vraag gedurende de levertijd van het artikel af moet dekken. De laatste laag bestaat uiteindelijk uit de bestelgrootte. Deze bestelgrootte wordt bepaald door de code die aan dat artikel is toegekend. De code wijst aan artikelen met hoge bestelkosten een hoge seriegrootte toe en andersom. Daarnaast geeft de code tevens aan of de streefniveaus dan wel handmatig door de artikelmanager worden berekend of automatisch door VA worden gegenereerd.

Artikelen worden besteld zodra VA een besteladvies genereert. Er wordt een besteladvies afgegeven door VA, zodra de economische voorraad van de KLu (ECOKLu = fysieke voorraad + artikelen in bestelling - backorders) het ANIV doorkruist. De seriegrootte die vervolgens wordt besteld is afhankelijk van de code die aan het artikel is toegekend.

Repairables:

Figuur 2.6: De verschillende voorradniveaus voor repairables

Anders dan bij de consumables zijn de streefniveaus bij repairables samengesteld uit 4 lagen. De eerste laag bestaat evenals bij de consumables uit een veiligheidsvoorraad. Deze veiligheidsvoorraad wordt op identieke wijze bepaald als bij de consumables en dient om spreiding in zowel vraag als *reparatietijd* af te dekken. Deze spreiding wordt, wederom afhankelijk van de servicegraad, vermenigvuldigd met een factor k . Bij deze veiligheidsvoorraad wordt vervolgens de omloopvoorraad opgeteld, en zo wordt het reparatieniveau (RNIV) vastgesteld. De omloopvoorraad dient ervoor om het verbruik gedurende de reparatiedoorlooptijd af te dekken. Boven op het RNIV wordt twee maanden periodiek vredesverbruik opgeteld. In het verleden is vastgesteld dat een oorlogsvoorraad moet worden aangehouden. Twee maanden periodiek vredesverbruik komt overeen met een maand oorlogsvoorraad. Deze oorlogsvoorraad wordt bij de bepaling van de streefniveaus meegenomen, omdat in het geval van (kleine) modificaties aan artikelen deze artikelen mee rouleren en zo ook gemodificeerd worden. De laatste laag die uiteindelijk het streefniveau bepaalt, wordt bepaald door het aantal verschrotingen gedurende de levertijd. Het kan gebeuren dat een artikel dusdanig beschadigd is dat reparatie niet meer mogelijk is. In dat geval zal het artikel worden verschroot en zal een nieuw artikel moeten worden bijbesteld.

Voor wat betreft het reparatieproces wordt de voorraad gestuurd door de economische voorraad. Wanneer de ECOKLu (= huidige fysieke voorraad + in bestelling + in reparatie - backorders) het RNIV doorkruist, wordt een reparatieadvies afgegeven door VA. De grootte van de reparatieorder is gelijk aan het verschil tussen SNIV en ECOKLu. Daarnaast kan het ook voorkomen dat VA een besteladvies afgeeft. Wanneer blijkt dat een artikel onherstelbaar beschadigd is, zal een nieuw artikel moeten worden verworven. VA genereert voor repairables een besteladvies, zodra een artikel in de CAT 70 terechtkomt. In deze voorraadcategorie worden het aantal onherstelbare artikelen gedeponneerd.

Zoals reeds eerder vermeld is de huidige wijze van voorraadbeheersing teveel gericht op een item approach. Er worden voor elk artikel afzonderlijk streefniveaus bepaald die de beschikbaarheid van het systeem buiten beschouwing laten, terwijl de KLu juist een beschikbaarheid van haar (wapen)systemen nastreeft. Dit is ook de aanleiding dat dit onderzoek is opgestart en het is denkbaar dat met systeemgericht bevoorraden aanzienlijke besparingen kunnen worden behaald. Vergelijkbare onderzoeken (Sherbrooke [8], Rustenburg [6]), Bol [3]) hebben eerder aangetoond dat METRIC grote besparingen kunnen opleveren zonder dat dit ten koste gaat van de beschikbaarheid van het systeem.

2.4 Voorgaande onderzoeken naar METRIC

Het onderzoek van Sherbrooke [8] is in de jaren zeventig uitgevoerd binnen de Amerikaanse Luchtmacht (USAF). Hij had met zijn onderzoek reeds aangetoond dat METRIC een reductie in spare parts van ruim 40 % kon realiseren. Daarnaast kon hij ook bepalen hoe een bepaald budget aan spare parts besteed moet worden om een bepaalde beschikbaarheid van het systeem te realiseren. Dit was begin jaren tachtig aanleiding om ook binnen de KLu een dergelijk onderzoek uit te voeren. Het idee om METRIC binnen de KLu toe te gaan passen is destijds afgewezen vanwege een tweetal redenen:

- *Het opleidingsniveau van de artikelmanagers werd te laag bevonden door de directie*
- *De informatiesystemen die begin jaren tachtig werden gehanteerd, vereisten bij de dataregistratie nog te veel handmatig werk.*

Op dit moment is het gemiddelde opleidingsniveau van de artikelmanagers nog steeds bedenkelijk. De informatiesystemen daarentegen zijn een stuk moderner en de verzameling van inputdata is dan ook een stuk eenvoudiger dan begin jaren tachtig. Begin jaren tachtig moesten de inputdata via ponskaartjes ingevoerd worden en het doordat dit zo'n enorm karwei was, is gestopt met het onderzoek. Dankzij de huidige mogelijkheden van de ICT is METRIC ook een stuk eenvoudiger toe te passen. Met dit afstudeerproject zal getracht worden het verbeterpotentieel van METRIC vast te stellen, wat destijds niet gelukt is.

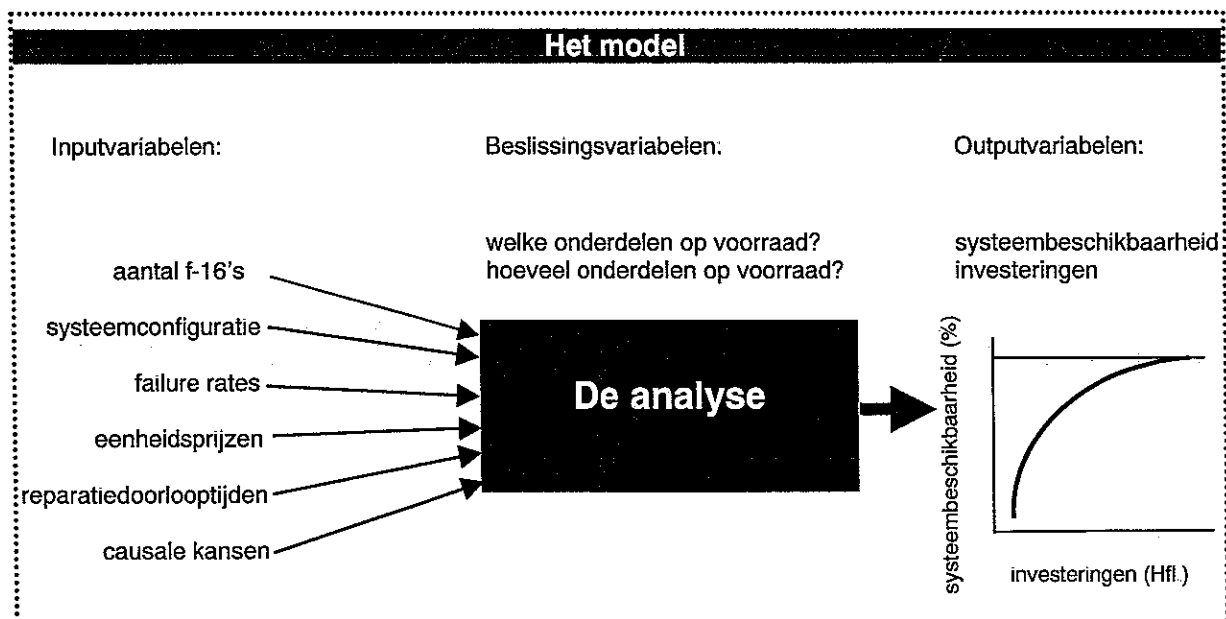
Hoofdstuk 3 Het Model

In dit hoofdstuk zal aan de hand van de situatiebeschrijving uit hoofdstuk 2 het model worden opgesteld. In de eerste plaats zal het raamwerk gegeven worden voor het model (§3.1). Vervolgens zal het model aan de hand van het raamwerk worden beschreven (§3.2). Als laatste zullen de verschillende aannames die bij het model horen worden besproken (§3.3).

3.1 Raamwerk van het model

Het raamwerk zal worden uiteengezet aan de hand van de METRIC theorie. De theorie is in detail bestudeerd door Sherbrooke [8] en Rustenburg [6].

Een model is een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid. Er zijn reeds verschillende modellen voor handen en voor dit onderzoek is het model gekozen waarvan de aannames grote overlap hebben met de situatie zoals die geldt voor de KLu. Zoals bij het betreden van het hoofdkwartier al in grote letters te lezen is, staat de KLu voor de beschikbaarheid van haar materieel en personeel. Dit onderzoek zal zich vooral richten op de inzetbaarheid van het materieel. Zoals in de probleemstelling al wordt vermeld bestaat de indruk dat de gerealiseerde inzetbaarheid van het materieel relatief laag is in relatie tot de investering in spare parts. Tijdens dit onderzoek zal vooral gekeken worden of de vereiste inzetbaarheden van de verschillende (wapen)systemen, de f-16 in dit geval, gerealiseerd kunnen worden tegen een lagere investering in spare parts. We kunnen het model beschouwen als een black box, waar data in worden gestopt. Deze black box bestaat vervolgens uit een aantal wiskundige formules en algoritmes, die deze inputdata verwerken tot outputdata, welke aan de hand van de verschillende beslissingsvariabelen worden gegenereerd. Hoe deze outputdata precies bepaald zullen worden komt in hoofdstuk 4 aan de orde waar het model wordt geanalyseerd en de black box wordt geopend. In de volgende paragrafen zal nadat het model is beschreven, achtereenvolgens de input-, beslissings- en outputvariabelen worden beschreven.



Figuur 3.1: Het raamwerk

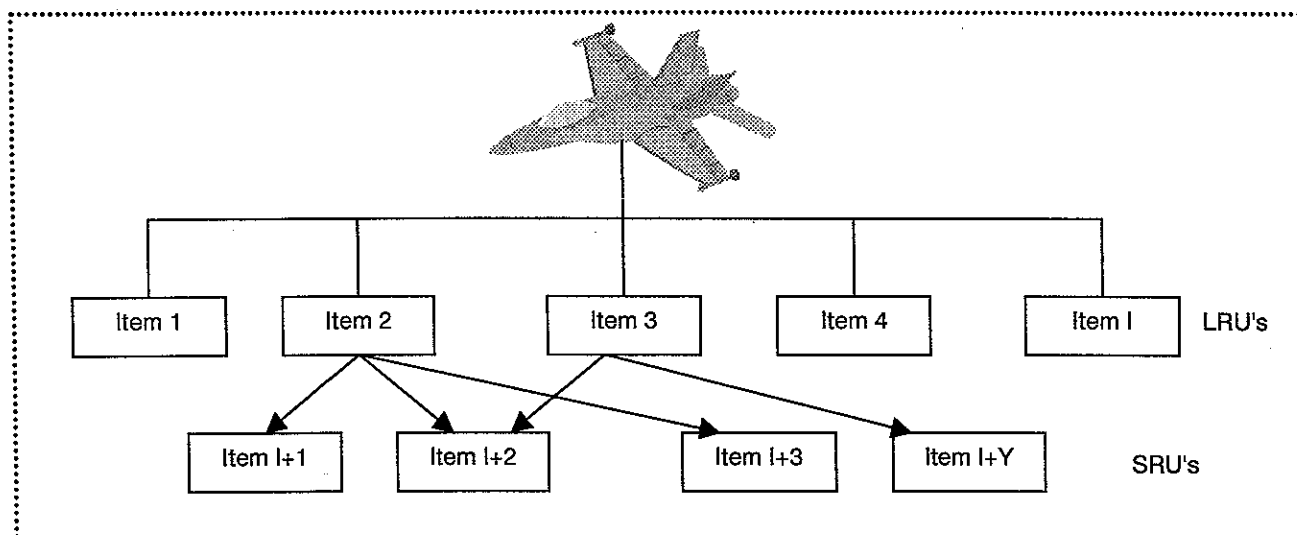
3.2 Modelbeschrijving

In het raamwerk is aangegeven dat het model uit input-, beslissings-, en outputvariabelen bestaat. Elk van deze variabelen wordt afzonderlijk in subparagrafen nader beschreven. Voordat deze variabelen worden beschreven, zal eerst het model moeten worden vastgelegd. Van belang voor de modelkeuze zijn de indenture en echelon structuur.

3.2.1 Modelkeuze

Indenture structuur

De indenture structuur geeft de opbouw van een bepaald systeem weer. De indenture niveaus worden weergegeven door de verschillende assemblageniveaus. Binnen de KLu worden op het eerste niveau de LRU's beschouwd. Helemaal boven aan de breakdown van het te ondersteunen systeem staat (uiteeraard) het systeem zelf. Tijdens dit onderzoek is dat de f-16. Het aantal indenture niveaus dat in het model wordt meegenomen, wordt bepaald door de causale relatie die tussen de verschillende niveaus bestaat. Tijdens dit onderzoek worden alleen de eerste twee indenture niveaus meegenomen. Figuur 3.2 geeft een overzicht van de indenture structuur weer.



Figuur 3.2: De indenture structuur

Er is alleen een causale relatie tussen de LRU's en SRU's. Uit de figuur is ook af te lezen dat verschillende LRU's niet apart zijn opgebouwd uit SRU's. De SRU's bestaan op hun beurt weer uit componenten. Voor deze componenten is het niet zinvol ze met de METRIC theorie te beheersen. Enerzijds omdat de reparatie van de bovenliggende SRU's voor een deel bij de industrie gebeurt. Anderzijds omdat de eenheidsprijs van dergelijke componenten relatief laag is en beheersing met METRIC niet het meest efficiënt is. In het verlengde van de indenture structuur ligt het vraagstuk of er sprake is van commonality. Tijdens dit onderzoek treedt wel commonality op. Bepaalde LRU's werken bijvoorbeeld met verschillende frequenties, maar bestaan desondanks uit dezelfde SRU's en zijn hierdoor onderling verwisselbaar. Als gevolg van deze verwisselbaarheid treedt commonality op. Voor de modellering wordt dus uitgegaan van een two indenture model met commonality.

Echelon structuur

De echelon structuur geeft het aantal verschillende voorraadpunten weer binnen de keten. Binnen de KLu zijn twee echelons te onderscheiden. Op de eerste plaats zijn er de

afnemende squadrons. Deze bevinden zich op de verschillende bases. Per base zijn verschillende squadrons operationeel. Zij maken gebruik van de verschillende (wapen)systemen en kunnen dan ook als klanten worden beschouwd binnen de productieketen. De leveranciers van spare parts bevinden zich op de depots. Op de depots vindt het complexere onderhoud plaats. De depots kunnen dus als leveranciers voor de klanten worden beschouwd. De productieketen van de KLu is in principe een twee echelon structuur. Echter voor de modellering wordt uitgegaan van een single site model en wel om de volgende redenen. De verschillende voorraadpunten behoren allen tot dezelfde organisatie en de belangrijkste beslissing die genomen moet worden is hoe het beschikbare budget voor de KLu als geheel besteed moet worden om een bepaalde inzetbaarheid van de (wapen)systemen te kunnen realiseren. Daarnaast is de afstand tussen de verschillende echelons klein en is overhevelen van spare parts tussen de verschillende voorraadpunten relatief goedkoop. Bij modellering is het van belang de belangrijkste eigenschappen van de huidige situatie te scheiden van de minder belangrijke en zo aan de hand van de belangrijkste eigenschappen een vereenvoudiging van de werkelijkheid over te houden. Dit single site concept heeft veel weg van virtual warehousing, waarbij organisatiebreed de voorraadpositie wordt onderhouden. Op dit moment hanteert de KLu ook een dergelijke manier van voorraadbeheersing. Er wordt dan op KLu-niveau bepaald wat de verschillende voorraadniveaus zijn voor de verschillende artikelen. Het alternatief zou zijn om de situatie als een two-echelon model te modelleren. Echter bij een multi-echelon model geldt de aanname dat geen lateral supply (herdistributie) plaats vindt. In het geval van de KLu vindt wel degelijk herdistributie plaats. Daarnaast wordt tijdens dit onderzoek gewerkt met reeds bestaande modellen, welke direct te analyseren zijn. Er wordt dan niet gewerkt met onder- en bovengrenzen zoals Sherbrooke beschrijft [9].

Samengevat:

Voor het geval van de KLu wordt, als gevolg van bovenstaande argumenten, gekozen voor een single site, two indenture model, met commonality op het SRU-niveau.

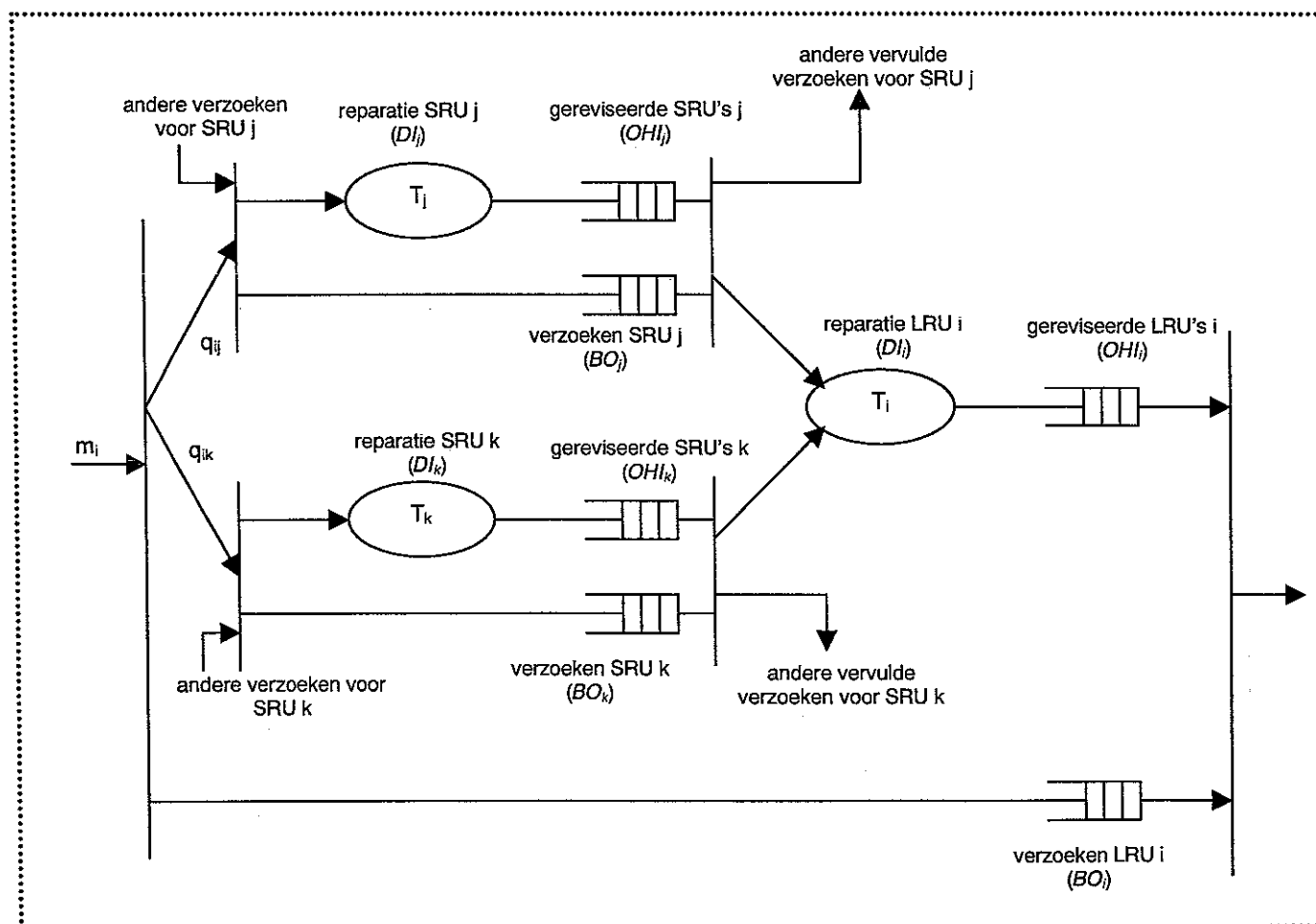
3.2.2 De inputvariabelen

Het model is dus een single site, two indenture model. De verschillende partijen in de keten behoren tot dezelfde organisatie en overhevelen van spare parts tussen verschillende echelons/bases is relatief goedkoop. Gegeven de eigenschappen van het model wordt aan de hand van een beschrijving van het model de verschillende inputvariabelen benoemd waarmee het model gaat rekenen. Deze inputvariabelen worden vervolgens aan wiskundige vergelijkingen onderworpen en aan de hand van de ingevoerde doelfunctie worden de outputvariabelen bepaald. Deze outputvariabelen geven antwoord op de verschillende beslissingsvariabelen.

Het systeem dat tijdens dit onderzoek centraal staat is de f-16. Het achterhalen van de configuratie van het systeem kan in sommige gevallen een omvangrijk en tijdrovend karwei zijn. Wanneer zgn. Work Unit Codes (WUC's) van de verschillende LRU's bekend zijn, is het via de technische boeken eenvoudig te achterhalen hoe de systeemconfiguratie er uit ziet (er vanuit gaande dat de technische documentatie juist is!). We gaan er vanuit dat de f-16 zoals die tijdens dit onderzoek wordt beschouwd, bestaat uit I LRU's, welke worden genummerd van $1, \dots, I$. Verschillende van deze LRU's zijn opgebouwd uit SRU's. Deze SRU's worden genummerd volgens $I+1, \dots, Y$. Voor dit onderzoek zijn Y verschillende artikelen geselecteerd, die in de f-16 voorkomen. Als gevolg van commonality, komt het voor dat enkele SRU's in verschillende LRU's voorkomen. Het aantal LRU's waar een bepaalde SRU in voor komt is de verzameling parents van artikel i en wordt genoteerd door $parent(i)$.

In figuur 3.2 is af te lezen dat, als gevolg van eenzijdige verwisselbaarheid, verschillende LRU's uit dezelfde SRU's bestaan. Elk artikel komt ten minste een keer voor in de configuratie van de f-16. De eenheidsprijs van artikel i wordt genoteerd door c_i . Het model

neemt aan dat de LRU's defect gaan volgens onafhankelijke Poisson processen met een gemiddelde van m_i per tijdseenheid. Wanneer een betreffende, bruikbare LRU op voorraad ligt, wordt deze direct ingebouwd. De defecte LRU wordt vervolgens opgestuurd naar de onderhoudsshop. We nemen aan dat het kapot gaan van een LRU wordt veroorzaakt door precies één SRU van de SRU's die voor het onderzoek geselecteerd zijn of aan geen één SRU. De kans dat SRU j de oorzaak is van het defect aan LRU i wordt genoteerd als q_{ij} . De som van de kansen van de verschillende SRU's behorend tot één LRU is kleiner of gelijk aan 1. Wanneer we aannemen dat SRU j de oorzaak is van het defect aan LRU i , gaan we er ook vanuit dat de defecte SRU direct van de LRU verwijderd kan worden. Deze kapotte SRU wordt vervolgens ter reparatie opgestuurd aan de betreffende onderhoudsshop. Deze worden gerepareerd volgens het FCFS principe. De reparatietijd van de SRU is een random variabele en wordt genoteerd als T_j . Op datzelfde moment wordt de defecte LRU opgestuurd naar de onderhoudsshop, waar hij wacht op een bruikbare SRU j . Wanneer een verzoek naar LRU i op de eerste plaats zit van de backorders (BO_i), en de SRU j is aanwezig worden beiden opgestuurd naar de onderhoudsshop, waar de LRU ter reparatie wordt aangeboden. Deze reparatietijd is eveneens een random variabele en wordt genoteerd door T_i . Dit proces wordt gevisualiseerd in het Petri net uit figuur 3.3.



Figuur 3.3: Petri net van het reparatieproces van LRU i bestaande uit 2 SRU's

3.2.3 De beslissingsvariabelen

De beslissingsvariabelen van het model komen tot uitdrukking in de volgende twee vragen:

- Welke artikelen moeten op voorraad liggen?
- Hoeveel artikelen moeten op voorraad liggen?

Deze beslissing wordt gemaakt door het doorrekenen van verschillende inputvariabelen en is afhankelijk van de doelfunctie die wordt gehanteerd. Deze doelfunctie wordt in de volgende subparagraaf beschreven. De variabele die de uitkomst van bovenstaande vragen uitdrukt is wel van belang. Deze variabele wordt genoteerd als S_i , of S_j en dit zijn de stock levels (het order-up-to-level van de artikelen i en j) voor respectievelijk LRU's i en SRU's j .

3.2.4 De doelfunctie

Om tot de gewenste outputvariabelen te komen is het van belang om de doelfunctie van het model goed te definiëren. De doelstelling van de KLu is het realiseren van vooraf vastgestelde beschikbaarheden van de f-16 vloot tegen een zo klein mogelijke investering in spare parts. De beschikbaarheid weergegeven door de variabele A wordt gedefinieerd als: *het percentage van de tijd dat de f-16 vloot niet down is als gevolg van het ontbreken van spare parts*. In bijlage A wordt de definitie van systeembeschikbaarheid nader toegelicht. Bij de bepaling van de beschikbaarheid van de f-16 vloot, moet het verwacht aantal backorders ($E[BO_i]$), de grootte van de vloot (N) en het aantal identieke LRU's op één f-16 (Z_i) bepaald worden. De doelfunctie die tijdens dit onderzoek wordt gebruikt komt overeen met de doelfunctie zoals Sherbrooke die gehanteerd heeft tijdens zijn onderzoek bij de Amerikaanse Luchtmacht (USAF). Sherbrooke stelt dat de beschikbaarheid van het systeem afhankelijk is van het verwacht aantal backorders van de verschillende LRU's, die tot dat systeem behoren. Bij elke combinatie van stock levels voor de verschillende LRU's, kunnen de beschikbaarheden worden bepaald. Deze base stock levels worden niet willekeurig gekozen, maar worden aan de hand van een greedy algoritme bepaald. Dit algoritme wordt in § 4.2 beschreven. Uit het greedy algoritme worden vervolgens een aantal optimale combinaties van stock levels afgeleid, waarbij een beschikbaarheid van de vloot hoort en een investering in spare parts. Wanneer deze combinaties van beschikbaarheden en investeringen worden uitgezet in een grafiek, kan de beschikbaarheidscurve worden bepaald. Uit deze curve is af te lezen welk budget moet worden benodigd is om een bepaalde beschikbaarheid te realiseren. Ook kan worden bepaald welke inzetbaarheid van de f-16 vloot kan worden behaald met een bepaald budget. De doelfunctie die tijdens dit onderzoek wordt gehanteerd ziet er als volgt uit:

$$A = \prod_{i=1}^I \left(1 - \frac{E[BO_i]}{NZ_i} \right)^{Z_i}$$

Waarbij:

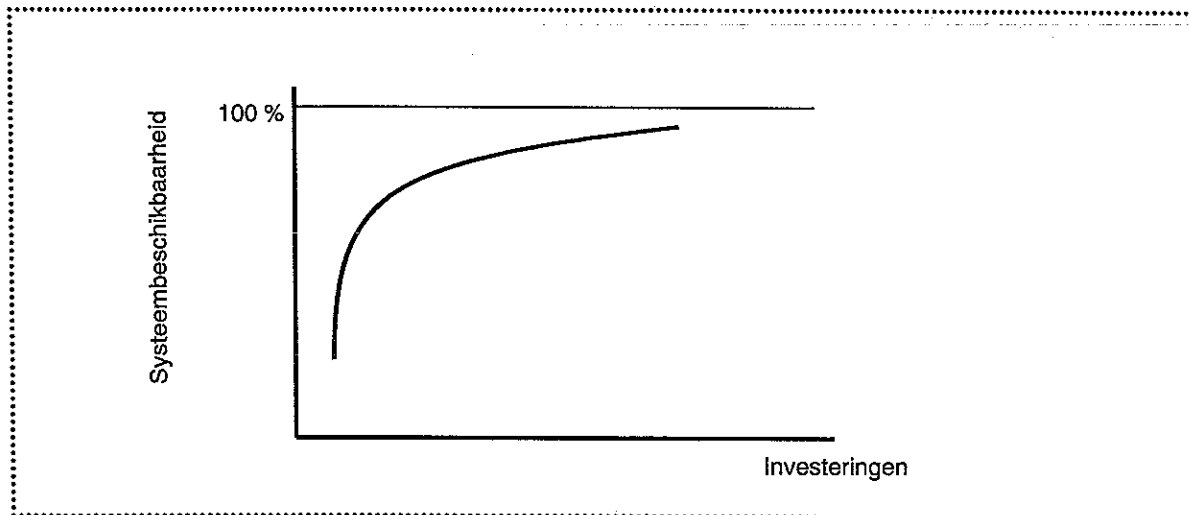
- A = availability
- $E[BO_i]$ = het verwacht aantal backorders van LRU i
- N = het aantal f-16's
- Z_i = het aantal LRU's i dat op één f-16 aanwezig is

Bovenstaande doelfunctie wordt tijdens dit model gebruikt. Deze wijkt iets af van de doelfunctie die gehanteerd wordt door Rustenburg. Rustenburg kijkt naar de inzetbaarheid van een systeem en niet N identieke systemen. De programmatuur die tijdens dit onderzoek gebruikt wordt is dezelfde als die Rustenburg gebruikt voor zijn single site, two indenture model. Het programma zal in kleine mate worden aangepast als gevolg van het gebruik van een andere doelfunctie.

3.2.5 De outputvariabelen

De outputvariabelen zijn bij het bespreken van de doelfunctie al aan bod gekomen. De outputvariabelen zijn de systeembeschikbaarheid, A , en de investeringen in spare parts die met deze inzetbaarheid gepaard gaat. Wanneer met het greedy algoritme de optimale

combinaties van investeringen in spare parts zijn bepaald, kan de beschikbaarheidscurve worden bepaald. In figuur 3.4 staat een beschikbaarheidscurve weergegeven. De presentatie van de curve doet vermoeden dat de lijn een continue lijn is. Echter het is een verzameling van punten welke met elkaar zijn verbonden. Ieder punt op deze curve geeft een verdeling van een bepaald budget weer, waarbij de maximaal te behalen inzetbaarheid wordt weergegeven.



Figuur 3.4: De beschikbaarheidscurve

Uit bovenstaande figuur is tevens af te lezen dat naar mate de beschikbaarheid van het systeem groter wordt, de benodigde investering in spare parts steeds groter moet zijn om een even grote toename van de beschikbaarheid systeem te realiseren. Dit verschijnsel staat ook wel bekend als de wet van de afnemende meeropbrengsten.

3.3 Aannames

Achter het model gaan verschillende aannames schuil. Deze aannames zullen nu worden opgesomd en toegelicht:

- *De vraag naar artikelen verloopt volgens onafhankelijke Poisson processen.*
Aan de hand van een χ^2 -toets (bijlage H) is aangetoond dat, gegeven de verbruiken van de laatste 8 kwartalen, niet zondermeer mag worden aangenomen dat de verbruiken van de artikelen een Poisson verdeling volgen. Echter voor drie van de vier artikelen geldt de aanname wel en is de verwachting dat deze aanname de werkelijkheid niet al te veel geweld aan zal doen.
- *Defecte, repareerbare artikelen kunnen altijd worden gerepareerd.*
Binnen de KLu vindt nauwelijks verschroting plaats, hetgeen betekent dat vrijwel alle artikelen gerepareerd worden. Deze aanname is dan ook gerechtvaardigd.
- *Het defect raken van een LRU wordt veroorzaakt door ten hoogste één SRU van de geselecteerde SRU's.*
Deze aanname komt deels overeen met de werkelijkheid. In het model wordt a.g.v. de causale kansen aangenomen dat een defecte LRU wordt veroorzaakt door één defecte SRU. In werkelijkheid kan een LRU meerdere SRU's bevatten. Echter door de selectiecriteria die zijn gehanteerd, zijn bepaalde SRU's niet geselecteerd. Een defect

aan de LRU kan dus in werkelijkheid ook zijn veroorzaakt door een SRU die niet is geselecteerd.

- *De structuur van de f-16 is zodanig opgebouwd dat een LRU nooit een SRU van een andere LRU kan zijn.*

Klopt voor de geselecteerde artikelen. Het zijn allen LRU's die onafhankelijk zijn van elkaar. Ze kunnen allen rechtstreeks uit de f-16 worden gedemonteerd en kunnen derhalve nooit een SRU van een andere LRU zijn.

- *Alle backorders zijn even belangrijk.*

In de werkelijkheid zal dit niet altijd het geval zijn. Iedere backorder in het model geeft de stilstand van één f-16 weer. Dit is slechts het geval als het gemiddelde totale aantal backorders niet te groot is. Wanneer dit totale aantal backorders groter is, komt het met regelmaat voor dat in één f-16 meerdere 'holes' zitten. De verhouding tussen backorders en stilstaande f-16's is dan niet meer 1 op 1. Echter voor de modellering is deze aanname noodzakelijk.

3.4 Conclusie

In dit hoofdstuk is het model beschreven dat gebruikt kan worden voor de voorraadbeheersing van spare parts. Aan de hand van de belangrijkste eigenschappen binnen de KLu is een model geselecteerd. De bijbehorende doelfunctie is aangepast aan de doelstelling van de KLu en nu kan het model gebruikt worden om de verschillende base stock levels te bepalen. Voordat de numerieke resultaten gepresenteerd worden, wordt het model eerst nog geanalyseerd, oftewel de black box uit het raamwerk wordt geopend. Degenen die niet geïnteresseerd zijn in deze wiskundige analyse van het model kunnen hoofdstuk 4 overslaan.

Hoofdstuk 4 De analyse van het model

Dit hoofdstuk behandelt de analyse van het model. Deze analyse is de inhoud van de black box uit figuur 3.1 en deze inhoud zal in dit hoofdstuk worden beschreven. Dit hoofdstuk bestaat uit een evaluatiedeel, waarin wordt beschreven hoe aan de hand van een gegeven stock level vector de bijbehorende beschikbaarheid wordt bepaald (§ 4.1) en een optimalisatiedeel, waarin wordt beschreven hoe deze stock level vectoren worden gegenereerd (§ 4.2).

4.1 Bepalen systeembeschikbaarheid

In deze paragraaf worden de formules afgeleid waarmee de beschikbaarheid van de f-16 vloot kan worden bepaald. Om deze beschikbaarheid te kunnen bepalen moeten de pijplijnvoorraden worden bepaald. In de eerste plaats worden op basis van de eerste twee momenten, uitdrukkingen afgeleid voor het gemiddelde en de variantie van het aantal LRU's in de pijplijn (§ 4.1.1). Vervolgens wordt aan de hand van deze twee momenten een verdeling gefit (§ 4.1.2). Uiteindelijk zal in de laatste subparagraaf een uitdrukking worden afgeleid voor de inzetbaarheid van de f-16 vloot (§ 4.1.3).

4.1.1 Analyse van de pijplijnvoorraden

In deze subparagraaf wordt beschreven hoe de pijplijnvoorraden van de verschillende LRU's worden bepaald. Deze pijplijnvoorraden bepalen de beschikbaarheid van de f-16 vloot. Dit is als volgt te verklaren.

Wanneer een LRU van een f-16 kapot gaat, zal deze moeten worden vervangen door een ready-for-use LRU uit de voorraad. Wanneer deze LRU voorradig is wordt deze vervangen in een verwaarloosbaar tijdsbestek en wordt verondersteld dat de betreffende f-16 beschikbaar blijft. Wanneer de LRU niet voorradig is, is de f-16 niet beschikbaar en krijgt het de status NMCS. Op dat moment treedt een backorder (nalevering) op. De f-16 houdt de status NMCS gedurende de tijd dat niet aan de backorder kan worden voldaan. Vergelijking 4.1 geeft aan hoe dit backorder mechanisme werkt.

$$S_i = OH_i + DI_i - BO_i \quad (4.1)$$

In het Petri net van figuur 3.3 staan bovenstaande grootheden weergegeven. Het aantal artikelen i dat is toegewezen aan de voorraad LRU's, S_i , is constant, doordat alle LRU's kunnen worden gerepareerd. Zodra een LRU kapot gaat en deze LRU is voorradig, daalt het aantal onderdelen on-hand, OH_i , met één en neemt het aantal onderdelen in de pijplijn, DI_i , met één toe. Zodra een zelfde LRU is gerepareerd, neemt de voorraad OH_i toe met één en DI_i neemt met één af. Het kan ook voorkomen dat de LRU niet voorradig ($OH_i = 0$) is en er wel een vraag naar is. In dat geval treedt een backorder op. Als een backorder optreedt, neemt BO_i met één toe en tegelijkertijd neemt ook DI_i met één toe. Zodra het onderdeel weer gerepareerd is neemt BO_i met één af en ook DI_i neemt met één af.

De systeembeschikbaarheid wordt onder andere bepaald op basis van de kansen op backorders. Dit wordt in paragraaf 4.1.3 verder toegelicht. Bij gegeven base stock levels kunnen de kansen op een backorder worden vastgesteld, zodra bekend is wat de verdeling van de pijplijnvoorraden, DI_i , is. Het reparatieproces van een willekeurige LRU i staat in figuur 3.3 weergegeven.

Om de pijplijnvoorraden te bepalen, wordt een grootheid, $x_i(t)$, gedefinieerd. Verondersteld dat de reparatiedoorlooptijden deterministische variabelen zijn kan $x_i(t)$ als volgt worden gedefinieerd:

$$x_i(t) = \text{vraag naar LRU } i \text{ gedurende interval } (t - T_i, t), + \sum_j \delta_{child(i)} [\text{vraag naar LRU } i \text{ voor } t - T_i, \text{ welke SRU } j \text{ ter reparatie nodig heeft, maar nog steeds in backorder is op tijdstip } t - T_i] \quad (4.2)$$

In het model is aangenomen dat de reparatiedoorlooptijden stochastische variabelen zijn, terwijl vgl. (4.2) deterministische reparatiedoorlooptijden veronderstelt. Avsar en Zijm [2] hebben aangetoond dat met het gebruik van stochastische reparatiedoorlooptijden een zeer nauwkeurige benadering van het verwacht aantal backorders kan worden gemaakt. Vergelijking (4.2) is als volgt uit te leggen. Kapotte LRU's, welke tijdens interval $(t - T_i)$ arriveren zijn als gevolg van reparatietijd T_i ergens in de pijplijn. De tweede component bestaat uit LRU's i welke op tijdstip $t - T_i$ nog steeds op SRU j wachten om gerepareerd te worden en voor $t - T_i$ zijn gearriveerd. Beide componenten zijn onafhankelijk van elkaar, vanwege het feit dat de vragen naar LRU's ontstaan zijn op verschillende tijdstippen. De vertragingen van de reparatie als gevolg van verschillende SRU's zijn onafhankelijk van elkaar vanwege de volgende twee aannames:

1. Elke failure van een LRU wordt veroorzaakt door exact één defecte SRU
2. Het hoofdproces (m_j) welke het verbruik bepaalt is Poisson verdeeld en wordt daarop opgesplitst in $J(i)$ onafhankelijke sub Poisson processen (m_j)

De eerste component kan direct worden bepaald. Het verbruik van de verschillende LRU's is Poisson verdeeld en hierdoor is het aantal aankomsten van LRU's gedurende interval $(t - T_i, t)$ ook Poisson verdeeld met een gemiddelde en een variantie van $m_i T_i$.

De tweede component is moeilijker te bepalen. De j^e term in de som van de tweede component in vgl. 4.2 is gelijk aan het aantal backorders voor SRU j , welke is ontstaan als gevolg van de reparatie van de LRU i , waar SRU j in zit op een willekeurig tijdstip. Hierdoor kan de tijdsafhankelijkheid buiten beschouwing worden gelaten en wordt deze term genoteerd door BO_{ij}^j . Om deze term te bepalen, moeten de backorders van de SRU's worden bepaald. De backorders van de SRU's worden afgeleid van de pijplijnvoorraden van deze SRU's. Het verwacht aantal backorders van LRU's of SRU's worden bepaald op basis van de eerste twee momenten van de backorder verdeling. Hiervoor moeten ook de eerste twee momenten van de pijplijnvoorraden worden bepaald. Hieronder worden alleen de eindvergelijkingen gegeven. De afleidingen staan in bijlage B.

Het eerste moment:

$$E[DI_j] = m_j T_j$$

$$m_j = m_i q_{ij} \Rightarrow E[DI_j] = m_i q_{ij} T_j \quad (4.3)$$

Het tweede moment:

$$E[(DI_j)^2] = m_i^2 q_{ij}^2 T_j^2 \quad (4.4)$$

Nu een uitdrukking voor het aantal SRU's in reparatie is bepaald, kan een uitdrukking voor het aantal backorders van die SRU's worden afgeleid.

Het eerste moment:

$$E[BO_j] = \sum_{x=S_j}^{\infty} (x - S_j)P(DI_j = x)$$

$$E[BO_j] = E[DI_j] - S_j + \sum_{x=0}^{S_j} (S_j - x)P(DI_j = x) \quad (4.5)$$

Het tweede moment:

$$E[BO_j]^2 = \sum_{x=S_j}^{\infty} (x - S_j)^2 P(DI_j = x)$$

$$E[BO_j]^2 = E[(DI_j)^2] - 2S_j E[DI_j] + S_j^2 - \sum_{x=0}^{S_j} (S_j - x)^2 P(DI_j = x) \quad (4.6)$$

Vanwege commonality, meerdere LRU's liggen op dezelfde SRU te wachten, is het lastig om deze tweede component te bepalen. Slechts een fractie van de vraag naar SRU j is het gevolg van de reparatie van LRU i . Deze fractie wordt als volgt bepaald:

$$h_{ij} = \frac{m_i q_{ij}}{m_j} \quad (4.7)$$

Hierbij is $m_j = \sum_{p \in \text{parents}(j)} m_p q_{pj}$.

De volgende stap is nu het bepalen van een backorder verdeling voor BO_j^i . Deze verdeling wordt eveneens bepaald op basis van de eerste twee momenten. Op basis van bovenstaande vergelijkingen en de eerste twee momenten van BO_j^i , kunnen dan weer uitdrukkingen worden bepaald voor het gemiddelde en de variantie van BO_j^i .

Het eerste moment:

$$E[BO_j^i] = h_{ij} E[BO_j] \quad (4.8)$$

Het tweede moment:

$$E[(BO_j^i)^2] = h_{ij}(1 - h_{ij})E[BO_j] + h_{ij}^2 E[BO_j]^2 \quad (4.9)$$

Met behulp van vergelijkingen (4.9) en (4.10) kan de variantie worden bepaald:

$$\text{VAR}[BO_j^i] = E[(BO_j^i)^2] - (E[BO_j^i])^2 \quad (4.10)$$

$$\text{VAR}[BO_j^i] = h_{ij}(1 - h_{ij})E[BO_j] + h_{ij}^2 \text{VAR}[BO_j] \quad (4.11)$$

Zoals eerder vermeld, kan de tijdsafhankelijkheid uit vgl. 4.2 buiten beschouwing worden gelaten. Hierdoor kan $x_i(t)$ worden genoteerd als X_i en dit is de pijplijnvoorraad van de LRU i . X_i bestaat uit twee componenten en aangezien beide componenten onafhankelijk zijn van elkaar kan eenvoudig het gemiddelde en de variantie van X_i worden afgeleid. Vanwege deze onafhankelijkheid kunnen het gemiddelde en variantie van beide componenten bij elkaar worden opgeteld:

$$E[X_i] = m_i T_i + \sum_{j \in \text{child}(i)} h_{ij} E[BO_j] \quad (4.12)$$

$$\text{VAR}[X_i] = m_i T_i + \sum_{j \in \text{child}(i)} h_{ij}(1 - h_{ij})E[BO_j] + \sum_{j \in \text{child}(i)} h_{ij}^2 \text{VAR}[BO_j] \quad (4.13)$$

In de volgende subparagraaf wordt aan de hand van bovenstaande uitdrukkingen een verdeling gefit.

4.1.3 Het fitten van een verdeling

In deze subparagraaf wordt beschreven hoe op basis van de eerste twee momenten van de pijplijn een verdeling wordt gefit. Vergelijkingen (4.12) en (4.13) geven de uitdrukkingen voor het gemiddelde en de variantie van de pijplijn weer. Vergelijking (4.2) geeft aan dat het aantal onderdelen in de pijplijn een sommatie is van twee random variabelen. Door het bundelen van twee verdelingen is het in theorie mogelijk om een exacte uitdrukking voor de verdeling van X_i vast te stellen. Computertechisch is dit echter niet efficiënt. Het algoritme van § 4.2 moet veelvuldig worden doorgerekend, bij het bereiken van hoge target systeembeschikbaarheden.

Het aantal onderdelen in de pijplijn is een discrete variabele. Er wordt dus alleen gefit met discrete verdelingen. Stel dat een random variabele X een gemiddelde $E[X]$ heeft en een variance-to-mean ratio V_x . In dat geval kan worden aangetoond dat voor alle mogelijke waarden van $E[X]$ en V_x , één van de verdelingen uit Tabel 4.1 aan deze waarden kan worden gefit. In de tabel is aangegeven voor welke waarden, welke verdeling kan worden gefit. ($V_x < 1 - E[X]$) is niet mogelijk, zie Adan e.a.[1]).

Combinaties van $E[X]$ en V_x	Type verdeling
$1 - E[X] \leq V_x < 1$	Mix van twee binomiaal verdelingen
$V_x = 1$	Poisson verdeling
$1 < V_x \leq 1 + E[X]$	Negatief binomiaal verdeling
$V_x > 1 + E[X]$	Mix van twee geometrische verdelingen

Tabel 4.1: Mogelijke verdelingen van de pijplijnen

In bijlage C is in detail beschreven hoe de fitting procedure plaatsvindt. Nu rest nog de vraag welke verdeling moet nu worden genomen voor de verdeling van de pijplijnen. Wanneer wordt verondersteld dat het verbruik van onderdelen een Poisson proces volgt en de streefniveaus positief zijn is de variantie altijd groter dan het gemiddeld aantal artikelen in de pijplijn. In dat geval zal dus de negatief binomiaal verdeling of een mix van twee geometrische verdelingen worden gebruikt. In het speciale geval dat de streefniveaus gelijk zijn aan nul, zal de Poisson verdeling worden gebruikt ($V_x = 1$).

4.1.3 Systeembeschikbaarheid

De basis van de berekening van de systeembeschikbaarheid is de kans op een positief aantal backorders van LRU i , gegeven een bepaald stock level. Aan de hand van de kans op een positief aantal backorders en het basestock level (S_i), kan het verwacht aantal backorders worden bepaald.

$$PBO[S_i] = P[BO_i > 0] = P[DI_i > S_i] \quad (4.14)$$

$$EBO[S_i] = \sum_{x_i=S_i}^{\infty} (x_i - S_i) P(DI_i = x_i) \quad (4.15)$$

De beschikbaarheid van de f-16 vloot kan worden bepaald door het product te nemen van alle individuele artikel beschikbaarheden. De beschikbaarheid die bedoeld wordt is de *logistieke systeembeschikbaarheid* (Zie bijlage A). Vergelijking (4.16) geeft de beschikbaarheid van de f-16 vloot weer:

$$A = \prod_{i=1}^I [1 - EBO_i(S_i) / NZ_i]^{Z_i} \quad (4.16)$$

Waarbij:

- A = beschikbaarheid van de f-16 vloot
 EBO_i = totaal verwacht aantal backorders
 N = het aantal f-16's binnen de vloot
 Z_i = het aantal identieke LRU's i op één f-16

Het maximaliseren van de beschikbaarheid van de f-16 vloot, komt in principe neer op het minimaliseren van het totaal verwacht aantal backorders. Hoe de stock levels het best bepaald kunnen worden, wordt in de volgende paragraaf beschreven.

4.2 Het algoritme

De doelstelling van het beschreven model, is het bepalen van de optimale stock levels voor elk van de geselecteerde artikelen. Om dit optimum te bepalen, kunnen twee verschillende invalshoeken worden gekozen:

- Maximaliseren van de beschikbaarheid van de gehele f-16 vloot, gegeven een bepaald budget.
- Minimaliseren van de investering in spare parts gegeven een bepaald gewenste beschikbaarheid van de f-16 vloot.

Zoals gezegd wordt de beschikbaarheid van de vloot bepaald door het verwacht aantal backorders van de LRU's. In de voorgaande paragraaf is beschreven hoe dit aantal backorders wordt bepaald. Bij elk aantal backorders, hoort een beschikbaarheid van het systeem en een investering in spare parts. Wanneer deze beschikbaarheden en bijbehorende investeringen vervolgens tegen elkaar worden uitgezet in een grafiek, wordt de beschikbaarheidscurve verkregen. Deze beschikbaarheidscurve is een verzameling van punten, welke allen een optimum representeren. De doelfunctie die tijdens dit onderzoek wordt gehanteerd, wordt door vergelijking (4.17) weergegeven:

$$\text{MIN} \sum_{i=1}^I (EBO_i(S_i)) / N \quad (4.17)$$

Om bovenstaande doelfunctie op te kunnen lossen, wordt een greedy algoritme gebruikt. Rustenburg en Sherbrooke hebben reeds aangetoond dat dit greedy algoritme tot nagenoeg optimale oplossingen leidt. Rustenburg heeft echter aangetoond dat een bepaalde initialisering nodig is, wil de curve in alle mogelijke gevallen convex zijn. De modellering van Rustenburg is vrijwel gelijk aan het model van de KLu. Vandaar dat wijze waarop de initiële waarden worden bepaald, kunnen worden overgenomen. Er moet wel vermeld worden, dat bij initialisering bepaalde optima buiten beschouwing worden gelaten. Echter de beschikbaarheden die met het algoritme worden bepaald moeten, ondanks het feit dat het accent ligt op het minimaliseren van de investeringen, een hoge target hebben. De beschikbaarheid die hier wordt bepaald is de logistieke beschikbaarheid en houdt geen rekening met andere factoren die de beschikbaarheid beïnvloeden. De beschikbaarheid van het systeem wordt ook nog bepaald door preventief en correctief onderhoud.

Bij de modellering worden gelden de volgende initiële waarden voor de stock levels:

$$S_i = \text{round}[m_i T_i] \quad (4.18)$$

Zoals reeds gezegd wordt om het probleem op te lossen een greedy algoritme gehanteerd. Dit greedy algoritme werkt als volgt. Allereerst worden m.b.v. vgl. (4.18) de initiële stock levels bepaald. Wanneer deze stock levels (initiële stock level vector (\underline{S}_i)) voor alle items bekend zijn, wordt per artikel een extra item op voorraad gelegd. Als gevolg van dit extra item, neemt het totale verwacht aantal backorders af $EBO(\underline{S}_i)$. Het greedy algoritme kijkt vervolgens voor welk artikel de afname in backorders, per geïnvesteerde gulden (eenheidsprijs van het artikel), het grootst is als gevolg van de toename van het base stock level van dat artikel. In de beschrijving van het algoritme wordt de stock level vector weergegeven door $\underline{S}_i + \underline{e}_j$. Hierbij geldt dat \underline{e}_j gelijk is aan 1 voor item j en gelijk is aan 0 voor alle andere items. Het artikel met de grootste afname in backorders per geïnvesteerde gulden wordt vervolgens geselecteerd om een extra item aan de voorraad toe te voegen. Zo ontstaat een nieuwe stock level vector. Met deze nieuwe stock level vector, wordt bovenstaand proces herhaald en zo wordt weer een nieuwe stock level vector verkregen. Per iteratie neemt de beschikbaarheid van het systeem toe, maar ook de investeringen. Dit proces wordt beëindigd wanneer een bepaalde beschikbaarheid is bereikt of wanneer het besteedbaar budget volledig aan spare parts besteed is. Het algoritme staat in figuur 4.1 beschreven.

Het algoritme voor het single echelon, two indenture model

Step 1:

Set $S_i = \text{round}[m_i T_i]$ voor alle $i = 1, \dots, Y$

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^Y c_i S_i$$

Step 2:

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^I \{EBO_i(\underline{S}_i) - EBO_i(\underline{S}_i + \underline{e}_j)\} / c_j \quad \text{voor alle } j = 1, \dots, Y$$

$$k := \arg \max \{\Delta_j \mid j = 1, \dots, Y\}$$

Step 3:

If $\bar{C} + c_k \leq C$

then:

$$\bar{C} := \bar{C} + c_k$$

$$S_k := S_k + 1$$

goto step 2

else stop.

Figuur 4.1: Het greedy algoritme

Hoofdstuk 5 Opzet onderzoekscase en numerieke resultaten

In dit hoofdstuk zullen de numerieke resultaten worden gepresenteerd en geïnterpreteerd. Aan de hand van de resultaten die de geselecteerde artikelen genereren, kan een indicatie van het verbeterpotentieel dat METRIC aan de KLu kan bieden, worden vastgesteld. In de eerste plaats (§ 5.1) zal de aanpak van de onderzoekscase worden beschreven. In deze paragraaf worden de selectiecriteria geformuleerd. Tevens wordt de wijze waarop de verschillende inputdata zijn verkregen beschreven. Voordat de numerieke resultaten zullen worden gepresenteerd (§ 5.3), zal aan de hand van een voorbeeld worden beschreven hoe het verbeterpotentieel van METRIC wordt vastgesteld (§ 5.2). METRIC is een voorraadbeheersingsmethodiek en om het verbeterpotentieel vast te stellen wordt METRIC vergeleken met de huidige besturingsregel en gehanteerde inputdata. Dit wordt zowel met als zonder oorlogsvoorraad uitgevoerd. Ten derde wordt METRIC vergeleken met de streefniveaus zoals ze nu in VA staan en als laatste wordt METRIC vergeleken met de economische voorraad van de KLu (§ 5.3). Vervolgens wordt een gevoeligheidsanalyse (§ 5.4) en een what-if (§ 5.5) analyse uitgevoerd. Dit hoofdstuk zal worden afgesloten met conclusies die uit de numerieke resultaten getrokken kunnen worden (§ 5.6).

5.1 Case Koninklijke Luchtmacht

Allereerst zal worden besproken op welke wijze de onderzoekscase is opgesteld. De systeemkeuze wordt kort besproken. Vervolgens zullen de selectiecriteria die bij de samenstelling van het artikelenpakket zijn gehanteerd worden besproken (§ 5.1.1). Als laatste zal de wijze waarop de verschillende inputdata verkregen zijn worden besproken.

Aanpak opstellen van een onderzoekscase

De Koninklijke Luchtmacht bezit verschillende (wapen)systemen, welke voor ondersteuning met METRIC in aanmerking komen. Om een goed onderzoek uit te kunnen voeren in een tijdsbestek van 6 maanden, is het van belang dat het onderzoek niet te omvangrijk wordt. Bij het opstellen van de case is besloten om het onderzoek voor één (wapen)systeem te onderzoeken. Tijdens dit onderzoek is voor de f-16 gekozen. Dit is een belangrijk (wapen)systeem en aangezien de KLu 138 f-16's in bezit heeft, is de verwachting dat in geval van verbeterpotentieel dit vooral bij dit (wapen)systeem te behalen is. Van het systeem dat geselecteerd is voor dit onderzoek, moet een artikelenselectie gemaakt worden. Bij de selectie van de artikelen zijn verschillende criteria gehanteerd. Deze worden beschreven in subparagraaf 5.1.1. Wanneer de artikelenselectie is afgerond, moeten bijbehorende inputdata vergaard worden. Welke inputdata vergaard moeten worden staan in het raamwerk van figuur 3.1 weergegeven. Verschillende data worden in VA geregistreerd. Data die niet in VA worden geregistreerd, worden afgeleid met data uit VA, komen uit een ander registratiesysteem of worden aan de hand van expert opinions bepaald. De wijze waarop de verschillende inputdata vergaard zijn staat beschreven in subparagraaf 5.1.2.

5.1.1 De artikelenselectie

Wanneer eenmaal het systeem is bepaald dat voor ondersteuning met METRIC in aanmerking komt, zal een artikelenpakket vastgesteld moeten worden. Als systeem is gekozen voor de f-16 en aangezien een f-16 is opgebouwd uit ruim 44.000 artikelen zullen verschillende criteria worden gehanteerd. Op dit moment zit de f-16 in een modificatietraject. Dit houdt in dat de f-16 een Mid Life Update (MLU) krijgt. Wanneer een f-16 een MLU status krijgt, houdt dit in dat met name verouderde elektronica artikelen worden vervangen door een vernieuwde versie ervan, ongeacht of de verouderde versie nog bruikbaar is of niet. Artikelen

die voor vervanging in aanmerking komen, behoren veelal tot de sectie Avionica. Deze artikelen hebben grotendeels een hoge eenheidsprijs en een relatief lage vraag.

Aangezien deze artikelen tot het MLU assortiment behoren, is de configuratie van de artikelen grondig bestudeerd en is deze reeds vastgelegd. Dit is een belangrijk gegeven, aangezien voorgaande onderzoeken naar de implementatiemogelijkheden van METRIC hebben aangetoond dat het verkrijgen van de juiste systeemconfiguratie vaak een lastige klus is. De geselecteerde lijst met bijbehorende inputdata staat in bijlage E. De criteria die gehanteerd zijn, zijn de volgende:

- *De MTBF van het artikel is bekend.* Van sommige LRU's is geen verbruik bekend. Wanneer het verbruik onbekend is zal toch een failure rate van de betreffende LRU ingevoerd moeten worden. Op basis van de MTBF en het aantal gerealiseerde vliegreun per jaar, kan een indicatie van het verwachte verbruik afgeleid worden.
- *De LRU heeft rep(aratie)code 3 of 4.* De repcode van een artikel geeft aan waar het artikel in de keten gerepareerd mag worden. Repcode 3 en 4 worden per definitie opgestuurd naar het depot of industrie. Artikelen met een lagere reparatiecode (1 of 2) mogen ook op de vliegbasis zelf worden gerepareerd. Hier is op zich niets mis mee, echter er worden geen verbruiksdata geregistreerd van artikelen die op de vliegbasis worden gerepareerd. Om zo min mogelijk vervuiling van data tegen te gaan worden alleen artikelen meegenomen die in de zgn. outerloop terecht komen. Artikelen komen in de outerloop terecht, als ze voor reparatie opgestuurd moeten worden naar minimaal het depot (repcode 3) of naar de industrie(repcode 4).
- *Geselecteerde SRU's behoren tot LRU's met repcode 3.* Voor de selectie komen, als gevolg van vorig criterium, LRU's met repcode 3 of 4 in aanmerking. De SRU's die tot een LRU behoren, mogen alleen tot een LRU met repcode 3 horen. Wanneer de LRU repcode 4 heeft, en per definitie opgestuurd wordt naar de industrie, heeft het geen zin om reserve SRU's op voorraad te houden. Reparatie van de LRU vindt immers bij de industrie plaats. Wanneer reparatie op het depot plaats vindt, moeten wel spare SRU's aangehouden worden om zo de LRU te kunnen repareren.
- *Het artikel heeft kostengroepcode 1.* Binnen de KLu worden drie codes gehanteerd, variërend van 1 tot 3. Artikelen met kostengroepcode 1 hebben allen een eenheidsprijs van Hfl. 2000 of hoger. Artikelen met een hogere code hebben een eenheidsprijs lager dan Hfl. 2000 en van artikelen die in kostengroep 2 (Hfl.2000<eenheidsprijs<hfl. 100) zitten kan niet zonder meer bepaald worden of die dicht bij Hfl. 2000 zitten ofwel bij Hfl.100. Vanuit dit oogpunt is bepaald alleen artikelen met kostengroepcode 1 mee te nemen.

Bovenstaande selectiecriteria zijn gehanteerd en zo is de uiteindelijke lijst van MLU artikelen zoals die in de bijlage E staat overgebleven. Wanneer de artikelen eenmaal geselecteerd zijn, moeten de verschillende data achterhaald worden. In de subparagraaf 5.1.2 staat beschreven hoe deze verschillende data verkregen zijn.

5.1.2 De inputdata

Wanneer een artikelenpakket is geselecteerd, moet voor elk van de artikelen verschillende data achterhaald worden. De data die achterhaald moeten worden zijn de inputdata, welke door het model worden doorgerekend en zo uiteindelijk de outputvariabelen genereren. Wanneer de outputvariabelen bekend zijn kan de beschikbaarheidscurve worden bepaald. De beschikbaarheidscurve, geeft de optimale combinaties van investeringen weer en welke inzetbaarheid met de betreffende investering gepaard gaat.

Tijdens dit onderzoek wordt gekeken tot het tweede indenture level. Als gevolg van deze twee indenture levels, moet naast de diverse inputvariabelen ook de systeemconfiguratie worden ingevoerd. Deze systeemconfiguratie beschrijft de opbouw van het systeem. De systeemconfiguratie die tijdens dit onderzoek ingevoerd wordt beschrijft alleen de structuur

van de geselecteerde artikelen. In de bibliotheek zijn technische boeken aanwezig, waarin voor elke LRU beschreven staat uit welke SRU's deze is opgebouwd. Aan de hand van deze technische boeken is de systeemconfiguratie vastgesteld. Het invoeren van deze configuratie wordt gedaan via dezelfde invoerfile waar de verschillende inputdata worden ingevoerd. Er van uitgaande dat de technische boeken correct zijn, kan gesteld worden dat de configuratie bekend is.

Naast de systeemconfiguratie moeten nog andere data achterhaald worden. Sommige van deze data staan in VA, andere moeten bepaald worden aan de hand van data uit VA en weer andere data komen uit SAP of worden bepaald met behulp van expert opinions.

De eerste variabele die ingevoerd moet worden is de failure rate, ofwel het verbruik per tijdseenheid. Voor elke NSN worden in VA een diversiteit aan gegevens geregistreerd. Het verbruik wordt ook in VA geregistreerd en de failure rates die in het model moeten ingevoerd, worden uit VA gehaald. Het gaat dan om de verbruiken van de verschillende LRU's. Het feit dat de artikelenselectie bestaat uit vrijwel allemaal MLU artikelen, kan de indruk wekken dat deze verbruiksdata vervuild zijn als gevolg van dit MLU traject. De verbruiksdata die in VA staan, zijn de verbruiken van de artikelen *na* het inbouwen ervan. De eerste keer dat een artikel wordt ingebouwd, wordt in VA niet meegenomen bij de bepaling van de verbruiken. Dit 'verbruik' registreert VA apart, als niet-periodiek verbruik. Het verbruik wordt per kwartaal geregistreerd en elk kwartaal wordt een nieuw gemiddelde berekend over de laatste 9 kwartalen. Het verbruik dat in VA staat is dus per kwartaal en bij de invoering in het model zal rekening moeten worden gehouden met het feit dat alle variabelen in dezelfde eenheden moeten staan. Van sommige artikelen is er geen verbruik bekend in VA, maar is de MTBF, welke door de fabrikant wordt afgegeven, wel bekend. Op basis van het aantal gerealiseerde vliegreizen en deze MTBF, kan vervolgens een verwacht verbruik worden afgeleid.

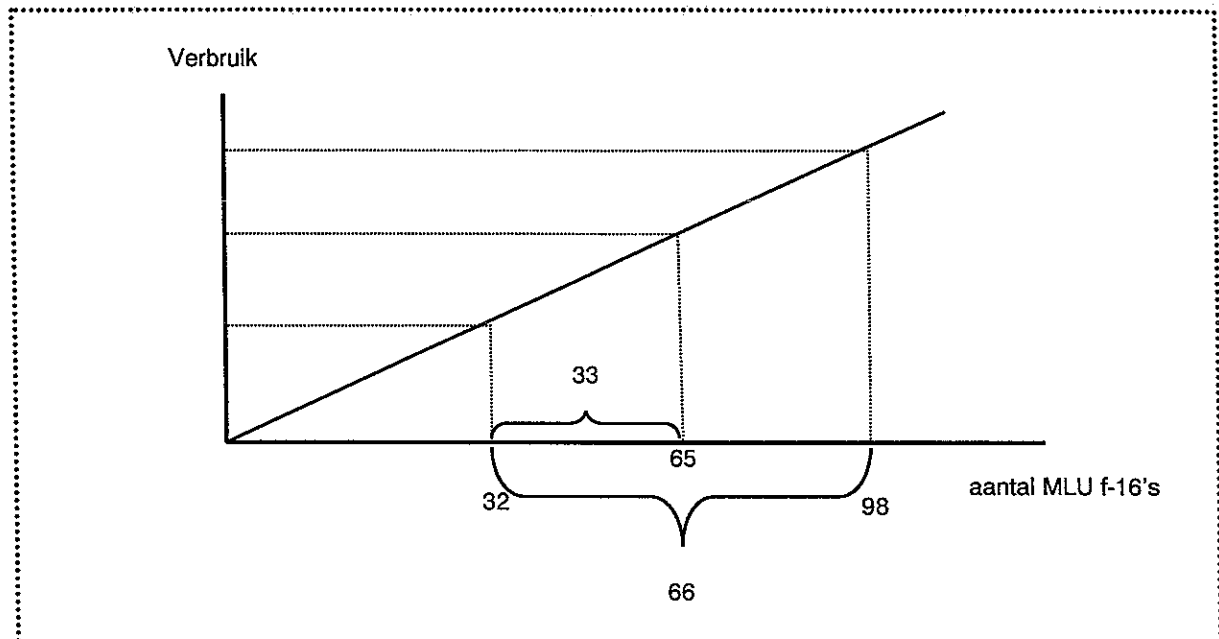
Naast de failure rates, moeten ook de eenheidsprijzen worden ingevoerd. Deze eenheidsprijzen worden per artikel in VA geregistreerd. De prijs die in VA staat is de prijs die als laatste voor het artikel is betaald. Failure rate en eenheidsprijzen zijn de enige twee inputvariabelen die rechtstreeks uit VA gehaald worden.

De causale kansen, q_{ij} , welke de kansen aangeven wanneer een bepaalde SRU verantwoordelijk is voor het defect aan een bepaalde LRU, worden afgeleid aan de hand van de verbruiken van de verschillende SRU's. Deze kansen zijn de fractie van het verbruik van een bepaalde SRU j ten opzichte van de som van de verbruiken van de geselecteerde onderliggende SRU's.

De reparatiedoorlooptijden van sommige artikelen worden in SAP geregistreerd. Deze reparatiedoorlooptijden worden in dagen gemeten. SAP registreert het tijdstip waarop een artikel binnen komt en het tijdstip waarop het artikel weer bruikbaar is. Niet voor alle artikelen worden de reparatiedoorlooptijden in SAP geregistreerd en voor deze artikelen zullen de reparatiedoorlooptijden aan de hand van expert opinions moeten worden bepaald. Afhankelijk van de locatie waar het artikel wordt gerepareerd, is een reparatiedoorlooptijd vastgesteld. De reparatiedoorlooptijd is niet zozeer afhankelijk van het artikel zelf, maar van de locatie waar het artikel gerepareerd wordt.

De laatste variabele die in het model moet worden ingevoerd is het aantal f-16's dat ondersteund moet worden. Wanneer uitgegaan wordt van een lineair verband tussen de vraag naar artikelen en het aantal gemodificeerde f-16's, mag niet gerekend worden met 138 f-16's (het uiteindelijk aantal gemodificeerde f-16's). Het verbruik van de artikelen, waarmee gerekend wordt, is bepaald over de laatste acht kwartalen. Acht kwartalen terug was het aantal gemodificeerde f-16's gelijk aan 32. Het verbruik in de laatste acht kwartalen is bepaald door deze 32 gemodificeerde f-16's en het is aannemelijk dat dit verbruik lineair is toegenomen. Op het moment dat de data uit VA gehaald zijn waren het aantal

gemodificeerde f-16's gelijk aan 98. Er kan gesteld worden dat het verbruik gerealiseerd is door gemiddeld 65 $((32 + 98)/2)$ f-16's. De artikelenselectie bestaat uit vrijwel allemaal MLU artikelen. De verbruiken die uit VA gehaald zijn, zijn periodieke verbruiken. Daarnaast registreert VA ook het niet periodiek verbruik. Niet periodiek verbruik, is bijvoorbeeld het inbouwen van een nieuw artikel, ongeacht of het artikel defect is. Bovenstaande staat in figuur 5.2 toegelicht.



Figuur 5.1: Bepaling aantal f-16's

5.2 Bepalen verbeterpotentieel

In deze paragraaf zal aan de hand van een voorbeeld worden beschreven hoe het verbeterpotentieel zal worden vastgesteld. In hoofdstuk 3 is het raamwerk van het model weergegeven. Er worden verschillende inputvariabelen in het model gestopt en deze inputvariabelen worden aan de hand van wiskundige formules en beslissingsvariabelen omgevormd tot outputvariabelen. Met behulp van de outputvariabelen kan de beschikbaarheidscurve worden opgesteld. De beschikbaarheidscurve geeft de optimale combinaties van investeringen en bijbehorende beschikbaarheden weer. Voor het bepalen van het verbeterpotentieel wordt METRIC met een viertal zaken vergeleken.

1. Met de huidige besturingsregel, zonder oorlogsvoorraad
2. Met de huidige besturingsregel met oorlogsvoorraad
3. Met de huidige streefniveaus
4. Met de huidige economische voorraad

Voor de vergelijking van METRIC met de huidige besturingsregel (met of zonder oorlogsvoorraad) worden de streefniveaus vastgesteld aan de hand van de ontwikkelde theorie én de gehanteerde inputdata. Echter, de inputdata die bij METRIC zijn gebruikt, zijn op verschillende manieren vergaard en de streefniveaus in VA zijn dan ook niet geheel conform de theorie vastgesteld. Om het verbeterpotentieel zo zuiver mogelijk vast te stellen, wordt m.b.v. de gehanteerde inputdata en de theorie zoals die bij de KLu is ontwikkeld het verbeterpotentieel vastgesteld. Zo is het verbeterpotentieel dat wordt bepaald puur afhankelijk van het verschil in methodiek. Dit wordt eerst gedaan zonder de oorlogsvoorraad (=2 maanden periodiek vredesverbruik) en vervolgens met de oorlogsvoorraad. De

oorlogsvoorraad behoort eigenlijk niet bij de streefniveaus, echter voor repareerbare artikelen is het in het geval van (kleine) modificaties van belang dat ze in de kringloop mee rouleren en zo ook gemodificeerd worden. Vervolgens wordt gekeken naar de huidige streefniveaus zoals die in VA staan. Deze streefniveaus zijn voor een groot deel van de artikelen niet gelijk aan de theorie zoals die door de KLu is ontwikkeld. Artikelmanagers hebben de bevoegdheid om de streefniveaus handmatig in te stellen, hetgeen de betrouwbaarheid van de theorie mogelijk negatief beïnvloedt. Als laatste wordt METRIC vergeleken met de economische voorraad zoals die nu is, zodat een indicatie wordt verkregen over hoe de theorie in praktijk is uitgevoerd. Er moet wel vermeld worden dat de laatste vergelijking niet eerlijk is aangezien de huidige economische voorraad het gevolg is van een gevoerd beleid en geen beheersingsmethodiek is.

5.2.1 METRIC

In hoofdstuk 4 is de METRIC methodiek in detail beschreven. Voor degenen die dit hoofdstuk hebben overgeslagen, wordt de methodiek nogmaals belicht, maar dan aan de hand van een voorbeeld. De inputdata die voor het model zijn gehanteerd staan in tabel 5.1 weergegeven.

Item	Trefwoord (LRU)	Trefwoord (SRU)	m_i (#/jaar)	c_i (Hfl.)	T_i (jaren)	q_{ij}
1	FUFLWIND		1,76	8788	0,06	
2	MP VV IND		7,56	13000	0,06	
3	VOICEMSUN		1,32	19032	0,15	
4	CIT		31,12	520000	0,06	
5	PNL/65 DE0		2,68	37175	0,06	
6	CRYPTO ASS		35,56	16000	0,33	
7		R/T ASSY		200000	0,32	0,49
8		INT PROC		75000	0,32	0,21
9		CCA		51856	0,32	0,03
10		TCCP MOD		120000	0,32	0,13
11		PWR SUPP		89000	0,32	0,14

Tabel 5.1: Inputdata voor de geselecteerde artikelen

Waarbij:

- m_i : het gemiddelde verbruik per jaar
- c_i : de eenheidsprijs van het artikel
- T_i : de reparatietijd van het artikel
- q_{ij} : de causale kans dat een defect aan LRU i wordt veroorzaakt door SRU j .

In het voorbeeld wordt voor slechts een deel van de geselecteerde artikelen het verbeterpotentieel van METRIC ten opzichte van de vier genoemde zaken bepaald. Voor de gehele KLu case worden 65 artikelen geselecteerd. In dit voorbeeld worden voor elk artikel de verschillende inputvariabelen in het model gestopt en aan de hand van het greedy algoritme worden vervolgens de verschillende streefniveaus bepaald. In tabel 5.2 worden volgens de METRIC methodiek verschillende iteratiestappen en de bijbehorende beschikbaarheden en investeringen weergegeven. Tevens is per iteratiestap aangegeven welk artikel is geselecteerd om in de voorraad te worden opgenomen. METRIC selecteert het artikel dat de grootste afname in het verwacht aantal backorders oplevert per extra geïnvesteerde gulden. In de tabel zijn niet alle voorraadhoogtes gelijk aan nul, hetgeen te maken heeft met het feit dat voor sommige artikelen een initiële voorraadhoogte is bepaald.

Inv. (Hfl.*1000)	Av. (%)	Artikel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2604	91,80	0	1	0	2	0	12	5	2	0	1	1
2620	92,36	0	1	0	2	0	13	5	2	0	1	1
2636	92,78	0	1	0	2	0	14	5	2	0	1	1
2652	93,08	0	1	0	2	0	15	5	2	0	1	1
2660,79	93,22	1	1	0	2	0	15	5	2	0	1	1
2679,82	93,48	1	1	1	2	0	15	5	2	0	1	1
2695,82	93,68	1	1	1	2	0	16	5	2	0	1	1
2708,82	93,79	1	2	1	2	0	16	5	2	0	1	1
2724,82	93,91	1	2	1	2	0	17	5	2	0	1	1
2776,68	94,27	1	2	1	2	0	17	5	2	1	1	1
2851,68	94,75	1	2	1	2	0	17	5	3	1	1	1
2888,86	94,97	1	2	1	2	1	17	5	3	1	1	1
2977,86	95,51	1	2	1	2	1	17	5	3	1	1	2
3177,86	96,54	1	2	1	2	1	17	6	3	1	1	2
3193,86	96,62	1	2	1	2	1	18	6	3	1	1	2
3313,86	97,07	1	2	1	2	1	18	6	3	1	2	2
3513,86	97,69	1	2	1	2	1	18	7	3	1	2	2
3529,86	97,74	1	2	1	2	1	19	7	3	1	2	2
3604,86	97,93	1	2	1	2	1	19	7	4	1	2	2
3693,86	98,12	1	2	1	2	1	19	7	4	1	2	3
3893,86	98,45	1	2	1	2	1	19	8	4	1	2	3
3909,86	98,48	1	2	1	2	1	20	8	4	1	2	3
3928,89	98,50	1	2	2	2	1	20	8	4	1	2	3
3941,89	98,52	1	3	2	2	1	20	8	4	1	2	3
4061,89	98,68	1	3	2	2	1	20	8	4	1	3	3
4581,89	99,26	1	3	2	3	1	20	8	4	1	3	3

Tabel 5.2: Optimale voorraadhoogtes METRIC voorbeeld

In de volgende subparagrafen wordt bovenstaand voorbeeld vergeleken met een viertal zaken zoals die aan het begin van paragraaf 5.2 zijn opgesomd.

5.2.2 De huidige besturingsregel zonder oorlogsvoorraad

Om het verbeterpotentieel van METRIC vast te stellen, kunnen een aantal zaken worden beschouwd. De meest zuivere benadering voor wat de METRIC methodiek aan verbeterpotentieel kan bieden wordt vrekregen door de voor zowel de huidige wijze van voorraadbeheersing (zie § 2.3) en METRIC dezelfde inputdata te hanteren en zo beide resultaten met elkaar te vergelijken. Het verschil zit hem dan enkel en alleen in de methodiek.

Zoals in § 2.3 beschreven is, is het streefniveau voor repareerbare artikelen opgebouwd uit een viertal lagen. De eerste laag is de veiligheidsvoorraad, welke afhankelijk is van de spreiding in zowel reparatiedoorlooptijd als in het verbruik. De formule die hierbij wordt gehanteerd ziet er als volgt uit:

$$VV = k \cdot (\text{rept} \cdot \text{sverbr}^2 + \text{mverbr}^2 \cdot \text{srept}^2)$$

Waarbij:

- VV = veiligheidsvoorraad
- k = vermenigvuldigingsfactor afhankelijk van de gewenste servicegraad van het artikel
- rept = de reparatiedoorlooptijd
- sverbr = spreiding op het verbruik
- mverbr = gemiddeld verbruik
- srept = spreiding van de reparatiedoorlooptijd.

Van bovenstaande data is de spreiding van de reparatiedoorlooptijd voor alle artikelen onbekend. Voor de berekening van de veiligheidsvoorraad wordt verondersteld dat de spreiding gelijk is aan nul en de reparatiedoorlooptijd dus deterministisch is. Ook voor het verbruik zijn niet alle spreidingen bekend. Als gevolg van de aanname dat het verbruik een Poisson proces volgt, wordt de spreiding gelijk gesteld aan het verbruik.

De tweede laag is het reparatieniveau. Wanneer de economische voorraad hieronder komt, wordt een reparatieadvies afgegeven. De hoogte van dit niveau hangt af van de turn around voorraad. Deze turn around voorraad wordt als volgt bepaald:

$$\text{RNIV} = \text{rept} * \text{mverbr}$$

Waarbij:

RNIV = het reparatieniveau
 rept = de reparatiedoorlooptijd
 mverbr = het gemiddelde verbruik

Als laatste wordt het aantal verschrotingen gedurende de levertijd opgeteld. Deze laag is toegevoegd om de theorie compleet te maken. In praktijk is het aantal verschrotingen tijdens de levertijd gelijk aan nul en bij het doorrekenen met METRIC is er vanuit gegaan dat er geen verschrotingen plaats vinden.

Bovenstaande lagen leveren voor het voorbeeld de volgende streefniveaus op:

Inv. (*1000 Hfl.)	A (%)	Artikel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5.005,86	99,23	1	2	1	4	1	16	8	4	1	3	3

Tabel 5.3: Investering en beschikbaarheid bij huidige besturing (zonder oorlogsvoorraad)

5.2.3 De huidige besturingsregel met oorlogsvoorraad

Wanneer de huidige besturingsregel wordt gehanteerd en de oorlogsvoorraad wordt bij de streefniveaus opgeteld, zullen de streefniveaus hoger zijn. De oorlogsvoorraad die bij de streefniveaus van uit tabel 5.3 wordt opgeteld, is gelijk aan twee maanden periodiek vredesverbruik. Deze extra laag volgt (in VA) uit de volgende formule:

$$\text{Oorlogsvoorraad} = 2/3 * \text{mverbr}$$

Waarbij:

mverbr = het gemiddelde verbruik per kwartaal

De investeringen en bijbehorende beschikbaarheden die met de nieuwe streefniveaus gepaard gaan staan in tabel 5.4 weergegeven:

Inv. (*1000 Hfl.)	A (%)	Artikel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8.471,90	99,92	1	3	1	9	2	21	10	5	2	4	4

Tabel 5.4: Investering en beschikbaarheid bij huidige besturing (met oorlogsvoorraad)

De beschikbaarheid die met de nieuwe streefniveaus gepaard gaat is niet significant verschillend van de beschikbaarheid die met de huidige besturingsregel zonder oorlogsvoorraad kan worden bereikt. De bijbehorende investering is echter wel een stuk groter.

5.2.4 De huidige streefniveaus

In de vorige subparagrafen is gekeken naar de huidige besturingsregel zoals die in beginsel is ontworpen. Bij de opbouw van de streefniveaus is rekening gehouden met reparatiedoorlooptijden, levertijden en het nastreven van een bepaalde servicegraad. Echter de streefniveaus die in VA staan zijn niet altijd conform de theorie. Dit heeft onder andere te maken met het feit dat artikelmanagers de streefniveaus zelf mogen veranderen. De derde vergelijking die wordt gemaakt met METRIC, is die van de streefniveaus zoals ze op dit moment in VA staan. In tabel 5.5 staat de investering in spare parts en bijbehorende beschikbaarheid weergegeven.

Inv. (*1000 Hfl.)	A (%)	Artikel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
13.570,90	99,27	1	5	1	21	2	40	6	4	2	2	0

Tabel 5.5: Investering en beschikbaarheid bij huidige streefniveaus

De beschikbaarheid die bij de huidige streefniveaus gehaald wordt, is nog steeds groot. Echter er moet vermeld worden dat de beschikbaarheid iets kleiner is dan bij de huidige besturingsregel met oorlogsvoorraad, terwijl de bijbehorende investering een aanzienlijk groter is.

5.2.5 De huidige economische voorraad

Als laatste wordt METRIC vergeleken met de huidige economische voorraad. Deze vergelijking is niet helemaal gerechtvaardigd, aangezien METRIC een besturingsmethodiek is en de huidige economische voorraad het resultaat is van een gevoerde voorraadbeheersingspolitiek. Daarentegen is het interessant om te kijken naar hoe de huidige beheersingsregels in praktijk worden nageleefd. In tabel 5.6 staan de verschillende economische voorraden van de verschillende artikelen weergegeven. Waarden waar de economische voorraad negatief is, is de waarde 0 ingevuld.

Inv. (*1000 Hfl.)	A (%)	Artikel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5.543,16	80,30	4	9	4	6	12	0	6	0	2	0	5

Tabel 5.6: Investering en beschikbaarheid bij de huidige economische voorraad

De investering in spare parts is ruim 1,5 keer groter dan de investering in spare parts bij de METRIC methodiek, terwijl de beschikbaarheid lager is. Deze lage beschikbaarheid komt vooral door het feit dat de economische voorraden van bepaalde LRU's gelijk is aan nul en dit heeft direct invloed op de beschikbaarheid van de vloot. Uit navraag is gebleken dat bepaalde LRU's eerst een tijd liggen te wachten voordat ze ter reparatie mogen worden aangeboden. De tijd dat de LRU's liggen te wachten is er ook een verbruik en wanneer het LRU's betreft met een lage MTBF, zal de economische voorraad, als gevolg van backorders, negatief worden.

5.2.5 Het verbeterpotentieel

Om het verbeterpotentieel van METRIC ten opzichte van bovenstaande vier gevallen, wordt gekeken naar de procentuele verandering van de investering in spare parts bij een nagenoeg gelijkblijvende beschikbaarheid. In tabel 5.7 staan voor alle vier vergelijkingen het verbeterpotentieel weergegeven.

METRIC		Huidige besturingsregel (zonder OV)		Huidige besturingsregel (met OV)		Huidige streefniveaus		Huidige economische voorraad		Verb. Pot. (%)
I (*1000 Hfl.)	A (%)	I (*1000 Hfl.)	A (%)	I (*1000 Hfl.)	A (%)	I (*1000 Hfl.)	A (%)	I (*1000 Hfl.)	A (%)	
4.581,89	99,26	5.005,86	99,23							-8
6.331,72	99,92			8.471,90	99,92					-25
4.606,86	99,28					13.570,90	99,27			-66
736,79	81,26							5.543,16	80,30	-87

Tabel 5.7: Verbeterpotentieel van METRIC

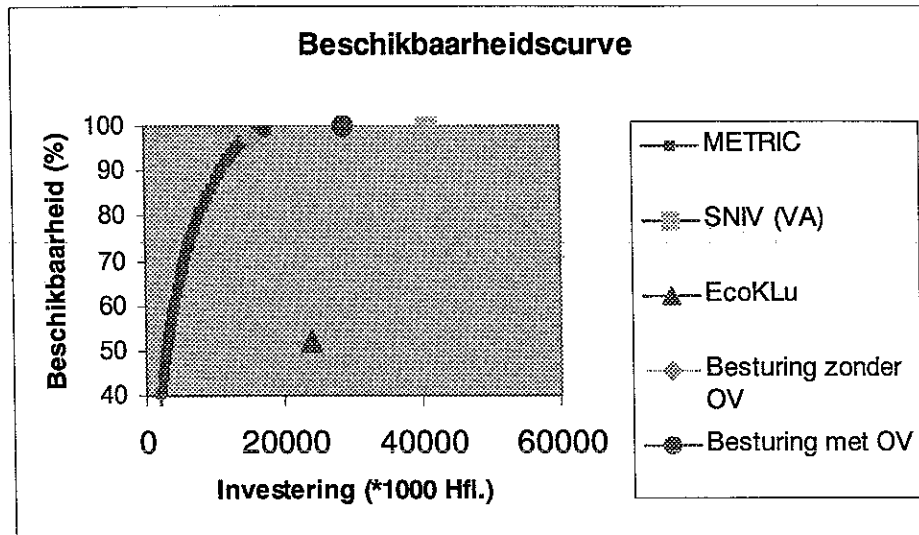
Uit tabel 5.7 is te lezen dat het verbeterpotentieel dat METRIC kan bieden t.o.v. de huidige besturingsregel vrij laag is. Er moet wel vermeld worden dat met deterministische reparatiedoorlooptijden is gewerkt terwijl de theorie stochastische reparatiedoorlooptijden veronderstelt. Deze variabele is bepaald aan de hand van expert opinions en de spreiding van deze variabele is dan ook onbekend. Wanneer de reparatiedoorlooptijd van de artikelen ook goed wordt geregistreerd en de spreiding van de reparatiedoorlooptijd ook bekend is zal de veiligheidsvoorraad toenemen en hiermee de investering in spare parts. Echter de availability zal dan ook toenemen. Om het verbeterpotentieel vast te stellen zal dan een nieuwe METRIC berekening gemaakt moeten worden en bij gelijke availability kan het verschil in investeringen bepaald worden

In deze paragraaf is aan de hand van een voorbeeld aangetoond hoe het verbeterpotentieel wordt bepaald. In paragraaf 5.3 worden dezelfde vergelijkingen gemaakt als in deze paragraaf, maar dan voor de volledige case.

5.3 Resultaten volledige case Koninklijke Luchtmacht

In deze paragraaf zullen de resultaten voor de volledige case worden gepresenteerd. Voor de volledige case zijn 65 artikelen geselecteerd. Een f-16 is opgebouwd uit ruim 44.000 artikelen. Het is echter niet interessant om voor alle artikelen de voorraad met METRIC te beheersen. Doelstelling binnen de KLu is het realiseren van een bepaalde beschikbaarheid van haar (wapen)systemen. De beschikbaarheid is afhankelijk van het beschikbaar zijn van de verschillende LRU's.

Voor de volledige case zijn van 17 LRU's en 48 SRU's alle benodigde inputdata in het model gegoten en aan de hand van het programma zijn de verschillende optimale streefniveaus bepaald. In bijlage F staan voor verschillende iteratiestappen de investeringen en de bijbehorende beschikbaarheden gegeven. Aan de hand van alle iteratiestappen, wordt de beschikbaarheidscurve afgeleid. Wanneer de beschikbaarheidscurve en de beschikbaarheden en investeringen voor de verschillende vergelijkingen zijn uitgezet in een grafiek, kan een indicatie worden verkregen voor het verbeterpotentieel. In figuur 5.2 staat de beschikbaarheidscurve en de beschikbaarheden en investeringen van de vergelijkingen aangegeven.



Figuur 5.2: Beschikbaarheidscurve volledige case Koninklijke Luchtmacht

Uit de beschikbaarheidscurve is af te lezen dat het verbeterpotentieel van METRIC t.o.v. de huidige besturing zonder oorlogsvoorraad zeer gering is. Wanneer de oorlogsvoorraad wordt meegenomen is het verbeterpotentieel een stuk groter. Wanneer METRIC wordt vergeleken met de huidige streefniveaus zoals ze nu in VA staan, is het verbeterpotentieel nog groter. Het feit dat de streefniveaus niet overeenkomen met de waarden zoals ze volgens de ontwikkelde theorie zouden moeten zijn komt grotendeels door het feit dat de artikelmanagers de streefniveaus handmatig kunnen veranderen. In § 5.2 is aangetoond op welke wijze het verbeterpotentieel wordt vastgesteld. In tabel 5.8 staan voor elk van de vier vergelijkingen het verbeterpotentieel gegeven.

METRIC		Huidige besturingsregel (zonder OV)		Huidige besturingsregel (met OV)		Huidige streefniveaus		Huidige economische voorraad		Verb. pot. (%)
I (*1000 Hfl.)	A (%)	I (*1000 Hfl.)	A (%)	I (*1000 Hfl.)	A (%)	I (*1000 Hfl.)	A (%)	I (*1000 Hfl.)	A (%)	
13.810,53	96,98	15.408,85	97,07							-10,4
21.623,73	99,9			28.978,87	99,9					-25,4
19.419,84	99,68					40.858,83	99,68			-52,5
2.318,45	52,69							23.837,66	52,33	-90,3

Tabel 5.8: Verbeterpotentieel volledige case Koninklijke Luchtmacht

In tabel 5.8 staat voor elke vergelijking met METRIC het verbeterpotentieel gegeven. Bij elke vergelijking is er een verbeterpotentieel voor METRIC weggelegd, echter de mate waarin is nogal uiteenlopend. Hieronder wordt per vergelijking aangegeven waar de grootte van het verbeterpotentieel in belangrijke mate door wordt beïnvloed

- *METRIC ten opzichte van de huidige besturingsregel (zonder oorlogsvoorraad)*

De mate waarin het verbeterpotentieel aanwezig is ten opzichte van de huidige besturingsregel, is niet indrukwekkend. Dit komt deels door het feit dat de reparatiedoorlooptijden bepaald zijn aan de hand van expert opinions. Hierdoor is de spreiding van deze variabele onbekend en is deze spreiding gelijk aan nul gesteld. In werkelijkheid mag verwacht worden dat de streefniveaus als gevolg hiervan hoger zijn en dat het verbeterpotentieel hierdoor ook hoger zal zijn. Daarnaast wordt het streefniveau nog bepaald door de kringloopvoorraad. METRIC bepaald aan de hand van de inputdata

juist de benodigde kringloopvoorraad, die een bepaalde beschikbaarheid realiseert. Het belangrijkste verschil wordt dus vooral bepaald door de extra veiligheidsvoorraad, welke als gevolg van een onbekende spreiding in reparatiedoorlooptijd dus kleiner is dan deze in theorie zou moeten zijn.

- *METRIC ten opzichte van de huidige besturingsregel (met oorlogsvoorraad)*

De besturingsregel is zodanig opgesteld dat de streefniveaus voor repairables ook afhankelijk zijn van de oorlogsvoorraad. Deze extra voorraad is bij de streefniveaus gevoegd, omdat ze in dat geval ook mee rouleren in de kringloop. Wanneer bijvoorbeeld (kleine) modificaties aan een artikel worden uitgevoerd worden op deze manier alle artikelen gemodificeerd. Deze extra voorraad schroeft met name de investering op, terwijl de extra beschikbaarheid niet evenredig toeneemt. Zodoende is het verbeterpotentieel groter dan wanneer er geen oorlogsvoorraad wordt meegenomen.

- *METRIC ten opzichte van de huidige streefniveaus*

De huidige streefniveaus zoals ze op dit moment in VA staan komen niet overeen met de streefniveaus zoals ze volgens de theorie zouden moeten zijn. Dit komt enerzijds door het feit dat de artikelmanagers deze streefniveaus handmatig kunnen aanpassen en anderzijds door het feit dat sommige data niet bekend zijn in VA. Tijdens dit onderzoek is gebleken dat de reparatiedoorlooptijd in VA voor negentig procent van de geselecteerde artikelen gelijk is aan nul. Aangezien met reparatie van een artikel altijd een doorlooptijd gepaard gaat, is deze reparatiedoorlooptijd bepaald met behulp van expert opinions. Wanneer in VA met de waarde nul wordt gerekend, vallen verschillende lagen die het streefniveau bepalen in VA weg. Door een gebrek aan inputdata en artikelmanagers die wellicht te veel bevoegdheid krijgen voor de voorraadbeheersing van spare parts, komen de streefniveaus niet overeen volgens de daarvoor ontwikkelde theorie, hetgeen een groter verbeterpotentieel genereert.

- *METRIC ten opzichte van de huidige economische voorraad*

Eerder is al vermeld dat het vergelijken van METRIC met de huidige economische voorraad eigenlijk niet helemaal rechtvaardig is. De economische voorraad van de KLU is tijdsafhankelijk en kan elk moment veranderen. Daarnaast is de economische voorraad het resultaat van een gevoerde methodiek. Deze vergelijking geeft dus wel een indicatie over hoe de theorie is toegepast. Zoals in § 5.2.5 al is vermeld zijn er artikelen die eerste een tijd liggen te wachten voordat ze überhaupt opgestuurd mogen worden om gerepareerd te mogen worden. Aangezien het verbruik van artikelen gedurende de tijd dat de artikelen liggen te wachten gewoon doorgaat, heeft dit een grote invloed op de economische voorraad van de betreffende artikelen.

5.4 De gevoeligheidsanalyse

In deze paragraaf wordt de gevoeligheidsanalyse beschreven. Het doel van deze analyse is om te toetsen wat de gevoeligheid van het model is voor *onnauwkeurige* inputdata. Bij deze gevoeligheidsanalyse wordt de wetenschappelijke invalshoek onder de loep genomen. Wanneer een gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd op basis van de wetenschappelijke invalshoek, wordt het verschil bepaald tussen de werkelijke beschikbaarheid en de optimale beschikbaarheid op basis van de werkelijke inputdata. Hier wordt getoetst wat de systeembeschikbaarheid had kunnen zijn als de inputdata beter bekend zouden zijn.

Tijdens dit onderzoek zijn verschillende inputdata vergaard. Deze data komen uit VA, de technische boeken, worden bepaald op basis van data uit VA of worden geregistreerd in SAP. Daar het verbruik van de verschillende artikelen nog niet is uitgekristalliseerd, worden tijdens dit onderzoek de verschillende failure rates aan een gevoeligheidsanalyse onderworpen. Zoals reeds beschreven wordt de werkelijke beschikbaarheid vergeleken met de optimale beschikbaarheid bij werkelijke inputdata. De werkelijke data worden nagebootst door variaties aan te brengen op de inputdata. Vergelijking 5.1 geeft aan hoe de werkelijke inputdata worden bepaald:

$$M_i = m_i + 2\hat{\sigma}(x_i - 0,5) m_i \quad (5.1)$$

Waarbij:

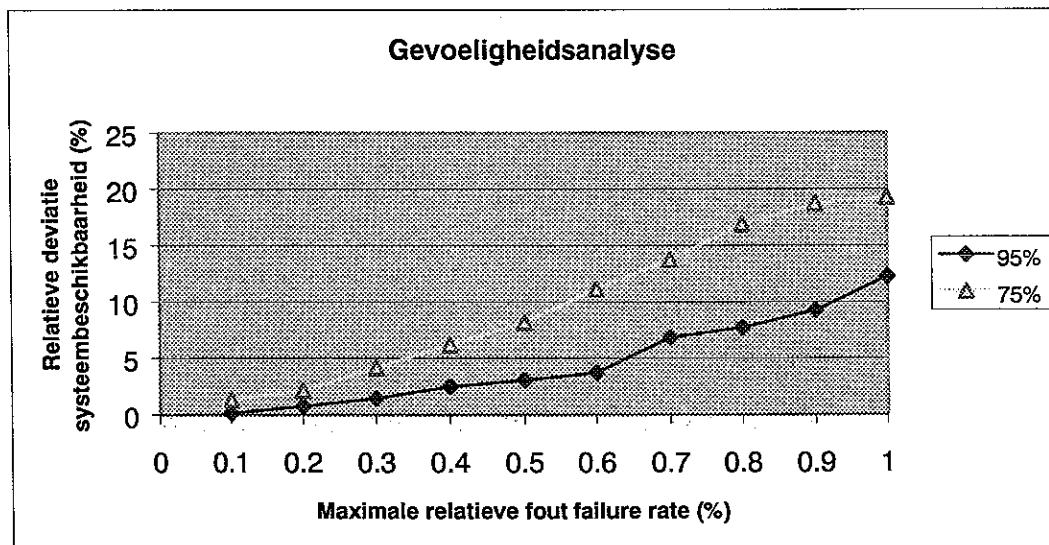
- M_i : werkelijke failure rates
- m_i : geschatte failure rates
- $\hat{\sigma}$: maximale relatieve fout
- x_i : random gekozen getal tussen 0 en 1 (uit een uniforme verdeling)

Stel dat de maximale relatieve fout gelijk is aan 50%. In dat geval wordt de werkelijke failure rate getrokken uit een uniforme verdeling op het interval $[0,5*m_i; 1,5*m_i]$. Na het inlezen van de werkelijke inputdata kan de relatieve deviatie in de output vast gesteld worden. Deze deviatie ziet er als volgt uit:

$$\Delta A_w = \frac{A(\hat{S}_0, \hat{S}_n) - A(S_0, S_n)}{A(S_0, S_n)}$$

Waarbij:

- $\hat{A}(\hat{S}_0, \hat{S}_n)$: werkelijke optimale systeembeschikbaarheid
- $\hat{A}(S_0, S_n)$: werkelijke systeembeschikbaarheid op basis van geschatte inputdata
- S_0, S_n : optimale voorraadniveaus op basis van de geschatte inputdata
- \hat{S}_0, \hat{S}_n : optimale voorraadniveaus op basis van de werkelijke inputdata



Figuur 5.3: Gevoeligheidsanalyse

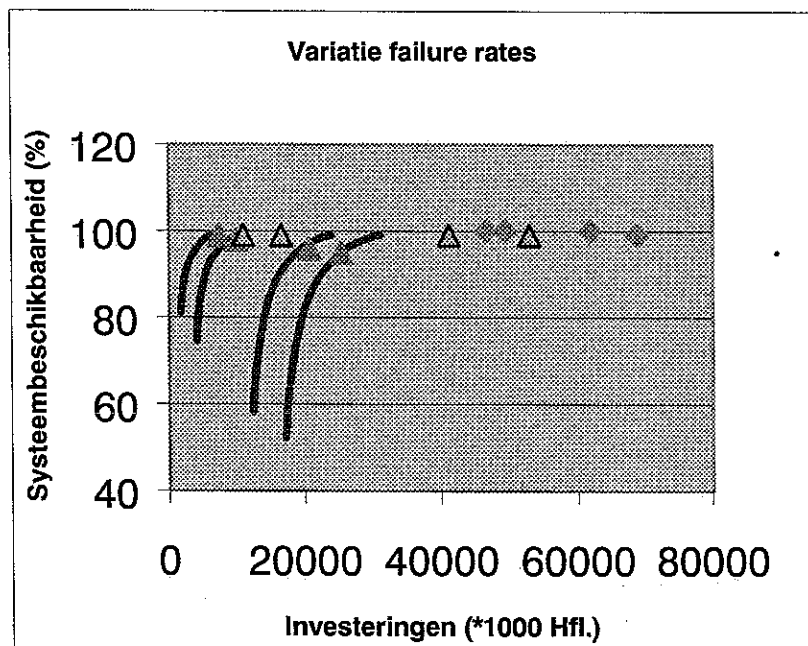
De gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd bij een target beschikbaarheid van 95% en 75%. In bovenstaande grafiek staan beide gevoeligheidsanalyses grafisch weergegeven. Voor een tiental maximale relatieve fouten zijn de relatieve deviaties in de systeembeschikbaarheid bepaald. Elk punt op de grafiek is de gemiddelde relatieve deviatie van 50 random trekkingen. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse geeft weer dat pas bij echt grote fouten voor wat betreft de failure rate, de relatieve deviatie in de systeembeschikbaarheid

boven de 5% komen. Men mag concluderen, dat vooral bij grotere target beschikbaarheden, het model vrij ongevoelig is voor foute schattingen van inputvariabelen.

5.5 What-if analyse

Het doel van een what-if analyse is het doen van uitspraken met betrekking tot het verbeterpotentieel en nagaan welke factoren een grote invloed hebben op dit verbeterpotentieel.

Het verbeterpotentieel dat METRIC kan bieden bij de voorraadbeheersing van spare parts, is afhankelijk van een aantal inputvariabelen. Hoe meer inputvariabelen worden meegenomen hoe nauwkeuriger het verbeterpotentieel kan worden vastgesteld. Aangenomen dat de betrouwbaarheid van deze inputvariabelen groot is. Bij een what-if analyse worden omgevingen gecreëerd door de inputvariabelen structureel te wijzigen. Van elke 'omgeving' kan vervolgens een verbeterpotentieel worden vastgesteld. Wanneer voor elk van de inputvariabelen een what-if analyse gemaakt is, kan worden vastgesteld welke inputvariabelen de grootste invloed hebben op het verbeterpotentieel. Welke omgevingen precies zijn gecreëerd staat in bijlage G weergegeven. In deze bijlage staat voor elke analyse de beschikbaarheidscurve weergegeven. In deze paragraaf wordt ter illustratie voor een inputvariabele (failure rate) een what if analyse uitgevoerd.



Figuur 5.4: What-if analyse variatie failure rates (0,25; 0,5; 1,5; 2)

Nu de what-if analyse is uitgevoerd voor het verbruik, is zichtbaar dat het verbeterpotentieel nauwelijks verandert bij andere verbruiken. Bij andere verbruiken veranderen de streefniveaus ook. Althans volgens de theorie. In praktijk is het zo, dat in VA voor vrijwel alle geselecteerde artikelen een reparatiedoorlooptijd met de waarde nul. Dit betekent dat de theorie niet goed wordt toegepast en dat er hierdoor in VA twee lagen wegvallen. Namelijk de veiligheidsvoorraad en het reparatieniveau. Wanneer echter met de gehanteerde inputdata wordt gewerkt, veranderen de streefniveaus wel degelijk. Dit is tevens af te lezen uit de grafiek, hetgeen wordt weergegeven door toenemende investeringen. Uit de what-if analyses uit de bijlagen is af te lezen dat het verbeterpotentieel, in het geval dat geen

oorlogsvoorraad wordt meegenomen, nauwelijks verandert. Wanneer de oorlogsvoorraad wel wordt meegenomen is een lichte stijging in het verbeterpotentieel op te merken. Wanneer de reparatiedoorlooptijd toeneemt bij de huidige werking van VA, vindt geen toename in de streefniveaus plaats, omdat deze data in VA gelijk zijn aan nul. Hetgeen betekent dat de beschikbaarheid allen maar afneemt. Uit de what-if analyse is aangetoond dat het verbeterpotentieel dat de methodiek te bieden heeft nauwelijks afhangt van de waarden van de verschillende inputdata.

5.6 Conclusie

Uit de gepresenteerde numerieke resultaten mag worden geconcludeerd dat METRIC in ieder geval een verbeterpotentieel kan bieden. Echter de mate waarin is onduidelijk, hetgeen te wijten is aan een slechte dataregistratie. In het geval dat METRIC wordt vergeleken met de huidige besturingsregel en er geen oorlogsvoorraad wordt meegenomen, is het verbeterpotentieel ten minste 8 %. Wanneer wel oorlogsvoorraad wordt meegenomen is het verbeterpotentieel van METRIC een stuk groter (25%). Gezien de aard van de organisatie en het feit dat het uitbreken van een oorlog nauwelijks voorspelbaar is, mag worden aangenomen dat deze extra voorraad gehandhaafd blijft. Dit verbeterpotentieel zal de waarheid dan ook het dichtst benaderen. Dit is een aanzienlijk verbeterpotentieel aangezien de totale investering in spare parts voor alle (wapen)systemen gezamenlijk, in de miljarden guldens loopt. Er moet vermeld worden dat de besparingen die met METRIC te behalen zijn voor wat betreft de cash flow slecht eenmalig zijn. Wanneer op lange termijn wordt gekeken zijn er ook andere (jaarlijkse) besparingen te onderkennen. Opslagkosten, energiekosten bijvoorbeeld dalen ook bij een lagere voorraad. Een ander voordeel van METRIC t.o.v. de huidige besturing, is dat bij METRIC de beschikbaarheid van de vloot bepaald wordt en bij de huidige besturingsmethodiek niet. Tevens is gebleken dat in sommige gevallen artikelen afwachtend zijn op een sein om opgestuurd te mogen worden ter reparatie. Dit zijn zaken waar METRIC geen rekening mee houdt, maar die wel degelijk invloed hebben op de beschikbaarheid. Voor een succesvolle implementatie van de methodiek zullen dergelijke zaken tot een minimum moeten worden beperkt. Daarnaast moeten de benodigde data die bij het gebruik van de methodiek benodigd zijn op een juiste en betrouwbare manier worden gemeten. Nu is gebleken dat de reparatiedoorlooptijd op geen enkele manier wordt gemeten, terwijl deze inputvariabele noodzakelijk is om de juiste base stock levels te bepalen. In het volgende hoofdstuk wordt kort op de verschillende implementatieaspecten ingegaan.

Hoofdstuk 6 Implementatieaspecten

In hoofdstuk 5 is het verbeterpotentieel dat METRIC aan de KLu kan bieden vastgesteld. Daar dit verbeterpotentieel t.o.v. de huidige besturingsmethodiek aanmerkelijk laag bleek, is het maar de vraag of METRIC geïmplementeerd gaat worden. In dit hoofdstuk zullen de verschillende implementatieaspecten aan bod komen, waarmee rekening moet worden gehouden bij een eventuele implementatie van METRIC. Uit het onderzoek is gebleken dat de registratie van de benodigde inputdata te kort schiet en hier wordt in paragraaf 6.1 kort op ingegaan. Wanneer men, op basis van de andere voordelen van METRIC, alsnog besluit om tot implementatie over te gaan, worden in paragraaf 6.2 enkele belangrijke implementatieaspecten besproken. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een algemeen conclusie (§ 6.3).

6.1 Registratie inputdata

Uit het onderzoek is duidelijk dat het registreren van verschillende data niet werkt zoals het hoort. Dit heeft vervolgens weer invloed op de hoogte van de streefniveaus, die als gevolg van het ontbreken van bepaalde inputdata, niet conform de ontwikkelde theorie worden bepaald. Het feit dat de streefniveaus niet conform de theorie kunnen worden vastgesteld, zorgt ervoor dat de streefniveaus intuïtief en handmatig worden aangepast. Voor de KLu is het in ieder geval van belang, of METRIC nu wel of niet wordt geïmplementeerd, dat de benodigde inputdata voor het vaststellen van de streefniveaus betrouwbaar en valide worden gemeten. Wanneer voldoende metingen en betrouwbare inputdata zijn gegenereerd, kan het verbeterpotentieel nauwkeuriger worden vastgesteld. Wanneer dan vervolgens blijkt dat het verbeterpotentieel dermate groot is, kan alsnog worden besloten om over te gaan tot implementatie van METRIC.

6.2 Implementatieaspecten bij invoering van METRIC

Bij de uitvoering van het onderzoek zijn verschillende zaken aan het licht gekomen die een succesvolle implementatie van METRIC mogelijk in de weg kunnen staan. Naast het feit dat de DMKLu volledig achter de nieuwe methodiek moet staan, is het van belang dat wordt gerekend met zowel betrouwbare inputdata als met een betrouwbaar programma. De juiste programmatuur is een kwestie van de juiste berekeningen te programmeren. Het verkrijgen van betrouwbare inputdata is een stuk omvangrijker. De verschillende data die in het model moeten worden ingevoerd, zouden volgens VA gemeten moeten worden. Echter wanneer sommige inputdata worden opgezocht in VA, blijken deze waarden niet te worden gemeten en worden de streefniveaus niet volgens de theorie vastgesteld. Tijdens dit onderzoek zijn de volgende inputdata in het model gevoerd.

1. aantal f-16's
2. systeemconfiguratie
3. failure rates
4. eenheidsprijzen
5. reparatiedoorlooptijden
6. causale kansen

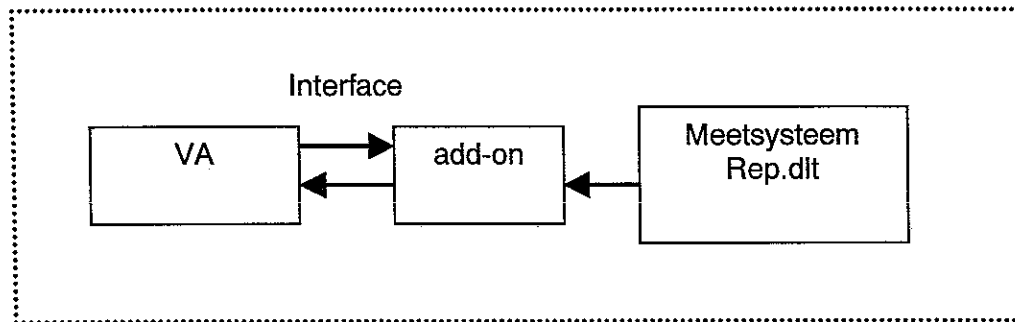
Van bovenstaande inputvariabelen zijn de laatste 4 het meest aan veranderingen onderhevig en dienen dan ook nauwkeurig gemeten te worden. De failure rates en eenheidsprijzen worden door VA gemeten. Voor wat betreft de failure rates wordt in VA onderscheid gemaakt tussen periodiek en niet-periodiek verbruik. Bij het bepalen van de optimale base stock levels moet alleen rekening worden gehouden met periodiek verbruik. De failure rates worden bepaald op basis van de (rekenkundige) gemiddelde verbruiken van de laatste 9 kwartalen.

Tevens worden in VA die eenheidsprijzen geregistreerd, die als laatste aan de leverancier is betaald voor het artikel.

De reparatiedoorlooptijden van de geselecteerde artikelen hebben in VA de waarde nul. Echter wanneer hiermee wordt verder gerekend vallen twee lagen uit het streefniveau weg. Dit heeft grote gevolgen voor de inzetbaarheid en een goede registratie van deze reparatiedoorlooptijden is dan ook een noodzaak. De vraag is of het handig is om deze module in VA te repareren. VA is een systeem dat al geruime tijd wordt gebruikt, en voortdurend wordt aangepast en uitgebreid. Wellicht is het eenvoudiger om een apart registratiesysteem voor het meten van de reparatiedoorlooptijden te ontwikkelen.

Daar in VA voor alle artikelen het verbruik wordt geregistreerd, kunnen de causale kansen het best worden benaderd zoals ze in § 5.1.2 beschreven zijn.

Wanneer alle variabelen bekend zijn moet óf een aparte module in VA ontwikkeld worden die gegeven de verschillende inputdata, de streefniveaus berekent, óf een 'add-on' worden ontwikkeld die met de verschillende registratiesystemen kan communiceren. Deze add-on is de software programmatuur, welke de optimale base stock levels berekent. In figuur 6.1 is het bovenstaande gevisualiseerd.



Figuur 6.1: Gewijzigde infrastructuur registratiesystemen

6.3 Algemene conclusie

Uit voorgaande paragrafen kan geconcludeerd worden dat het ontwikkelen van een goed registratiesysteem voor verschillende dat een must is. Voor zowel de huidige besturingsmethodiek, als METRIC is het noodzakelijk om met zo betrouwbaar mogelijke inputdata de streefniveaus (base stock levels) te bepalen. Er zal dus in de eerste plaats een goed registratiesysteem ontwikkeld moeten worden, waarna later alsnog overgegaan kan worden tot implementatie van METRIC. Laat het verbeterpotentieel dat puur vanwege de methodiek wordt bereikt tegenvallen; de wetenschap dat het kapitaalbeslag van het totale spare parts pakket in de miljarden loopt, kan toch aanleiding geven voor een vervolg onderzoek naar de mogelijkheden van METRIC. Daarnaast bepaald METRIC de availability, terwijl de huidige besturingsmethodiek dat niet doet. Wanneer uiteindelijk wordt besloten om over te gaan op de invoering van METRIC, is het noodzakelijk om een duidelijk migratiepad op te stellen, waarin de noodzakelijke stappen die uitgevoerd moeten worden duidelijk staan beschreven.

Hoofdstuk 7 Conclusies en aanbevelingen

Het bedrijfskundig probleem dat aan dit afstudeerproject ten grondslag ligt, is dat binnen de afdeling MXM het idee leeft dat de huidige investering in spare parts relatief hoog is in relatie tot de gerealiseerde inzetbaarheid van de (wapen)systemen. Om dit probleem op te lossen is de volgende opdracht geformuleerd: 'onderzoek of METRIC toepasbaar is in de situatie van de Koninklijke Luchtmacht en stel het verbeterpotentieel vast.' In dit hoofdstuk wordt op basis van voorgaande hoofdstukken conclusies geformuleerd met betrekking tot de Koninklijke Luchtmacht en METRIC als beheersingsmethodiek (§ 7.1). Hieruit volgen de aanbevelingen voor de KLu (§ 7.2).

7.1 Conclusies

Tijdens dit onderzoek is aangetoond dat er een verbeterpotentieel aanwezig is voor de METRIC methodiek. De grote vraag is de mate waarin dit verbeterpotentieel aanwezig is. Wanneer wordt gekeken naar de besturingsregel zoals die voor de KLu ontwikkeld is en de oorlogsvoorraad wordt buiten beschouwing gelaten, kan gesteld worden dat het verbeterpotentieel ongeveer 10 % bedraagt. Uit het onderzoek kan het volgende worden geconcludeerd:

- *de huidige besturingsmethodiek scoort vrij goed*
De huidige besturingsregel scoort in vergelijking met de METRIC methodiek vrij goed. Het verbeterpotentieel bedraagt slechts 10 % en middels een goede kosten / baten analyse zal moeten worden aangetoond, of implementatie van de methodiek rendabel is.
- *het verbeterpotentieel is aanwezig maar de mate waarin is onbekend*
Uit het onderzoek is gebleken dat er een verbeterpotentieel aanwezig is, maar de mate waarin is onbekend. Dit komt onder meer door het ontbreken van betrouwbare inputdata.
- *beschikbaarheid van de verschillende inputdata is niet compleet*
De meeste inputdata zijn bekend en kunnen uit VA worden gehaald. Echter de reparatiedoorlooptijden worden niet in VA geregistreerd en om de base stock levels zo optimaal mogelijk te bepalen, is een goede registratie van alle inputvariabelen noodzakelijk. Naast de reparatiedoorlooptijden zijn ook de causale kansen bepaald en niet gemeten.

Naast bovenstaande conclusies zijn tijdens het onderzoek ook nog de volgende constatering gedaan:

- *artikelen liggen te wachten om opgestuurd te worden*
Uit het onderzoek is aan het licht gekomen dat bepaalde artikelen eerst een tijd liggen te wachten op het depot, voordat ze überhaupt opgestuurd mogen worden om aangeboden te worden ter reparatie. Duidelijke redenen zijn hier niet voor te noemen en er wordt dan ook niet bewust aan batchvorming gedaan. De kringloopvoorraad kan dan wel in orde zijn, maar wanneer dergelijke zaken niet worden meegenomen bij de bepaling van de base stock levels, zullen deze altijd te laag zijn.
- *MTBF's afgegeven door de fabrikant zijn vaak onbetrouwbaar of onbekend*
Bij de aanschaf van een nieuw (wapen)systeem moet een spare parts pakket aangeschaft worden. De omvang wordt bepaald door het aantal gerealiseerde vliegrekken en de MTBF's. Deze MTBF's zijn in praktijk vaak te laag. De MTBF wordt bepaald op basis van de failura rates van de componenten en de menselijke interactie wordt buiten beschouwing gelaten. Wanneer de MTBF's onbekend zijn is het zelfs onmogelijk om een raming van het verbruik te maken.

Bovenstaande punten zullen in de volgende paragraaf nader worden toegelicht.

7.2 Aanbevelingen

In deze paragraaf zullen aan de hand van de belangrijkste conclusies uit paragraaf 7.1 enkele aanbevelingen worden gegeven. Deze aanbevelingen zullen per conclusie worden gegeven.

- *De huidige besturingsmethodiek scoort vrij goed*

Wanneer de streefniveaus op basis van de gehanteerde inputdata in het model worden gevoerd blijkt dat de huidige besturingsmethodiek goed presteert. Echter de verschillende data die noodzakelijk zijn om de streefniveaus te bepalen staan niet allemaal in VA en hierdoor wordt de huidige besturingsmethodiek niet conform de theorie uitgevoerd.

Aanbeveling: ga voor elk van de benodigde inputvariabelen na, hoe deze zo betrouwbaar mogelijk en valide kunnen worden gemeten en ontwikkel een meetsysteem.

- *het verbeterpotentieel is aanwezig maar de mate waarin is onbekend*

Uit de numerieke resultaten van hoofdstuk 5 is gebleken dat bij deterministische reparatiedoorlooptijden het verbeterpotentieel 10,4 % is. In werkelijkheid zullen de reparatiedoorlooptijden niet deterministisch zijn en wanneer het verbruik aanmerkelijk is, heeft dit toch zijn invloed op de hoogte van de base stock levels volgens de huidige besturingsmethodiek en dus op het verbeterpotentieel.

Aanbeveling: ga, bij betrouwbare metingen, na wat het exacte verbeterpotentieel van METRIC is t.o.v. de huidige besturingsmethodiek.

- *beschikbaarheid van de verschillende inputdata is niet compleet*

Uit de vorige conclusie is duidelijk geworden dat door het ontbreken van verschillende inputdata geen 'exact' verbeterpotentieel kan worden vastgesteld. Voor elk van de inputvariabelen moet worden nagegaan of ze überhaupt gemeten worden en zo ja hoe ze gemeten worden. Wanneer data nauwkeurig en betrouwbaar gemeten worden, moeten ze alleen nog kunnen communiceren met de eventuele add-on. Wanneer de data niet gemeten worden zal een meetsysteem opgezet moeten worden, waarbij de juiste data worden gemeten en welke eveneens met de add-on kunnen communiceren.

Aanbeveling: ontwikkel een add-on, welke met de verschillende dataregistratiesystemen kan communiceren.

Met betrekking tot onderstaande constatering, die tijdens het onderzoek aan het licht zijn gekomen kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan.

- *artikelen liggen te wachten om opgestuurd te worden*

Uit het onderzoek is gebleken dat sommige artikelen eerst een tijd liggen te wachten voordat ze opgestuurd mogen worden naar de industrie om gerepareerd te worden. Met dergelijke zaken houdt METRIC geen rekening en wanneer dit structureel voorkomt, zal het meetsysteem dat de reparatiedoorlooptijd meet, hierop aangepast moeten worden. Het feit dat artikelen liggen te wachten zorgt ervoor dat batchvorming optreedt. Wanneer wordt overgegaan tot implementatie van METRIC moet hiermee wel rekening worden gehouden en moet het model hierop worden aangepast.

- *MTBF's afgegeven door de fabrikant zijn vaak onbetrouwbaar of onbekend*

Wanneer een nieuw (wapen)systeem aangeschaft wordt, zijn er (nog) geen verbruikscijfers in VA bekend, maar moet wel een spare parts pakket worden aangeschaft. Het verwacht verbruik van de verschillende artikelen wordt bepaald op basis van het aantal vliegreuren en de MTBF, welke door de fabrikant is afgegeven. Bij eerdere aanschaf van dergelijke pakketten is gebleken dat de MTBF's in de werkelijkheid vaak veel kleiner zijn dan aangegeven door de fabrikant. Fabrikanten kijken alleen naar de technische kans van falen. De menselijke interactie met het artikel wordt dan buiten beschouwing gelaten, terwijl dit toch een grote invloed kan hebben op de MTBF van een artikel. Met behulp van METRIC kan op basis van MTBF's afgegeven door de fabrikant een raming van de availability worden gemaakt. Op basis van afspraken deze raming

kunnen met de fabrikanten afspraken worden gemaakt. In het geval van significante verschillen kunnen de fabrikanten tegemoet komen met bijvoorbeeld spoedleveringen. Bij het opstellen van contracten zullen dus een soort van 'vangnetconstructies' opgesteld moeten worden. Deze verschillen zullen echter wel aantoonbaar moeten zijn en wederom is een goed en betrouwbaar registratiesysteem onontbeerlijk en kan METRIC worden gebruikt bij het bepalen van de availability.

In vrijwel alle aanbevelingen komt naar voren dat een goed en betrouwbaar registratiesysteem van de verschillende inputdata noodzakelijk is. Wanneer een goed registratiesysteem voor handen is, is samen met de METRIC methodiek een ijzersterk tool in handen dat gebruikt kan worden bij de onderhandelingen tussen de verschillende partijen. Hierbij moet gedacht worden aan het overtuigen van de directie van het voordeel van METRIC of het afsluiten van contracten met fabrikanten, waarbij gegeven bepaalde MTBF's bepaalde inzetbaarheden behaald moeten worden.

Literatuurlijst

- [1] Adan I.J.B.F., Van Eenige M.J.A. en Resing J.A.C., Fitting discrete distributions on the first two moments, *Probability in the engineering and Informational Sciences*, 9:623-632, 1996
- [2] Avzar Z.M., en Zijm W.H.M., Resource-constrained two-echelon inventory models for repairable item systems, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2000
- [3] Bol H.J.P.G., METRIC in praktijk, afstudeerscriptie, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven 2000
- [4] Montgomery and Runger, *Applied statistics and probability for engineers*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1994
- [5] Oele, E., Een literatuurstudie voorafgaand aan het afstudeerproject bij de Koninklijke Luchtmacht, Bijzondere Opdracht, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2000
- [6] Rustenburg W.D., A system approach to budget-constrained spare parts management, PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2000
- [7] Rustenburg W.D., *Systeem gericht bevoorraden bij de KM*, Den Helder, 2000 (*niet gepubliceerd*)
- [8] Sherbrooke C.C., *Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques*, Wiley, New York, 1992
- [9] Sherbrooke C.C., *Multi-echelon Inventory Systems with Lateral Supply*, *Naval Research Logistics*, 39:29-40, 1992
- [10] Silver E.A., Pyke D.F., en Peterson R., *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, John Wiley, New York, 1998

Lijst van afkortingen

ANIV	: Aanvraagniveau
CBM	: Code Beheersmethodiek
DMKLu	: Directie Materieel Koninklijke Luchtmacht
ECOKLu	: Economische voorraad van de Koninklijke Luchtmacht
EMV	: Externe Materieel Voorziening
KLu	: Koninklijke Luchtmacht
LRU	: Line Replaceable Unit
METRIC	: Multi Echelon Technique for Recoverable Item Control
MLU	: Mid Life Update
MTBF	: Mean Time Between Failures
MVZE	: Materieel Voorzieningseenheid
NMCS	: Not Mission capable due to Supply
NSN	: Nato Stock Number
RNIV	: Reparationiveau
SNIV	: Streefniveau
SRU	: Shop Replaceable Unit
VA	: Voorraad Administratiesysteem
VV	: Veiligheidsvoorraad
WUC	: Work Unit Code

Bijlagen

Bijlage A	Systeembeschikbaarheid	51
Bijlage B	Afleidingen van vergelijkingen uit hoofdstuk 4	52
Bijlage C	Fitting procedure voor discrete verdeling.....	54
Bijlage D	Lijst van inputdata.....	56
Bijlage E	Verschillende iteratiestappen bij greedy algoritme case KLu.....	58
Bijlage F	Beschikbaarheidscurven What-if analyse.....	61
Bijlage G	Toetsing verbruiksprocessen.....	62
Bijlage H	Enkele iteratiestappen ter controle van de programmatuur.....	63

Bijlage A **Systeembeschikbaarheid**

Binnen de logistiek worden drie definities gehanteerd van systeembeschikbaarheid, namelijk: inherente, bereikte en operationele systeembeschikbaarheid. Het is van belang deze drie definities goed te onderscheiden, vandaar dat bovenstaande definities hieronder kort worden beschreven.

$$\text{Inherente systeembeschikbaarheid} = 100\% * \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

De MTBF is de gemiddelde tijd tussen failures en MTTR is de gemiddelde tijd tot de volgende reparatie. Deze definitie heeft te maken met de betrouwbaarheid van de hardware en heeft niets te maken met spare parts.

$$\text{Bereikte systeembeschikbaarheid} = 100\% * \frac{MTBM}{MTBM + MCMT + MPMT}$$

MTBM is de gemiddelde tijd tussen onderhoudswerkzaamheden, MCMT is de gemiddelde tijd voor correctief onderhoud en MPMT is de gemiddelde tijd voor preventief onderhoud. Deze definitie is vergelijkbaar met de vorige definitie. Deze definitie kijkt wederom naar de betrouwbaarheid van het systeem en kijkt niet naar mogelijke vertragingen die kunnen ontstaan als gevolg van het ontbreken van spare parts. Voor dit afstudeerproject zijn bovenstaande definities dan ook niet interessant, omdat er geen vertraging als gevolg van het ontbreken van spare parts in zit opgesloten.

$$\text{Operationele systeembeschikbaarheid} = 100\% * \frac{MTBF}{MTBM + MDT}$$

In bovenstaande definitie is MDT de gemiddelde downtime als gevolg van het ontbreken van spare parts, onderhoud (correctief en preventief) en andere vertragingen ten gevolge van onderhoudswerkzaamheden. Deze definitie sluit beter aan bij dit afstudeerproject. Een systeem is operationeel als het niet down is ten gevolge van onderhoud of het ontbreken van spare parts. Het is raadzaam om onderhoudsvertragingen en logistieke vertragingen van elkaar te onderscheiden. De operationele systeembeschikbaarheid kan bepaald worden als het product van onderstaande systeembeschikbaarheden. Voorwaarde is wel dat beide beschikbaarheden hoog zijn.

$$\text{Onderhoudssysteembeschikbaarheid} = 100\% * \frac{MTBM}{MTBM + MCMT + MPMT}$$

$$\text{Logistieke systeembeschikbaarheid} = 100\% * \frac{MTBM}{MTBM + MSD}$$

MSD is de Mean Supply Delay. In dit afstudeerverslag wordt met de beschikbaarheid van het systeem, de logistieke systeembeschikbaarheid bedoeld.

Bijlage B Afleidingen van vergelijkingen uit hoofdstuk 4

In hoofdstuk 4 zijn voor verschillende vergelijkingen slechts de eindvergelijkingen gegeven. In deze bijlage worden de exacte afleidingen van de betreffende vergelijkingen gegeven.

Afleiding vergelijking (4.5)

$$\begin{aligned} E[BO_j] &= \sum_{x=S_j}^{\infty} (x - S_j) P(DI_j = x) \\ &= \sum_{x=0}^{\infty} (x - S_j) P(DI_j = x) - \sum_{x=0}^{S_j} (x - S_j) P(DI_j = x) \\ &= E[DI_j] - S_j + \sum_{x=0}^{S_j} (S_j - x) P(DI_j = x) \end{aligned}$$

Afleiding vergelijking (4.6)

$$\begin{aligned} E[BO_j]^2 &= \sum_{x=S_j}^{\infty} (x - S_j)^2 P(DI_j = x) \\ &= \sum_{x=0}^{\infty} (x - S_j)^2 P(DI_j = x) - \sum_{x=0}^{S_j} (S_j - x)^2 P(DI_j = x) \\ &= \sum_{x=0}^{\infty} (x^2 - 2xS_j + S_j^2) P(DI_j = x) - \sum_{x=0}^{S_j} (S_j - x)^2 P(DI_j = x) \\ &= E[(DI_j)^2] - 2S_j E[DI_j] + S_j^2 - \sum_{x=0}^{S_j} (S_j - x)^2 P(DI_j = x) \end{aligned}$$

Afleiding van vergelijking (4.9)

BO_j^i = afhankelijk van het aantal SRU's in reparatie DI_j . De eerste twee momenten van BO_j^i kunnen geschreven worden als geconditioneerde verwachtingen. De uitdrukking voor het tweede moment is:

$$E[(BO_j^i)^2] = \sum_{x_j=0}^{\infty} E[(BO_j^i)^2 | DI_j = x_j] P(DI_j = x_j)$$

De vraag van SRU j , gegeven het totaal aantal backorders en de waarde van $BO_j = x_j$, is binomiaal verdeeld met parameters x_j en f_{ij} .

$$E[BO_j^i | DI_j = x_j] = \begin{cases} 0 & \text{if } x_j \leq S_j \\ \text{BIN}(x_j - S_j, h_{ij}) & \text{if } x_j > S_j \end{cases}$$

Het tweede moment kan worden geschreven als:

$$E[(BO_j^i)^2 | DI_j = x_j] = \begin{cases} 0 & \text{if } x_j \leq S_j \\ h_{ij}(1 - h_{ij})(x_j - S_j) + h_{ij}^2(x_j - S_j)^2 & \text{if } x_j > S_j \end{cases}$$

Door de som te nemen van alle mogelijke waarden van x_j kan het tweede moment bepaald worden:

$$\begin{aligned} E[(BO_j)^2] &= \sum_{x_j=S_j}^{\infty} E[(BO_j)^2 | DI_j] P(DI_j = x_j) \\ &= \sum_{x_j=S_j}^{\infty} [h_{ij}(1-h_{ij})(x_j - \bar{S}_j) + h_{ij}^2(x_j - S_j)^2] P(DI_j = x_j) \\ &= h_{ij}(1-h_{ij}) \sum_{x_j=S_j}^{\infty} (x_j - \bar{S}_j) P(DI_j = x_j) + h_{ij}^2 \sum_{x_j=S_j}^{\infty} (x_j - S_j)^2 P(DI_j = x_j) \\ &= h_{ij}(1-h_{ij})E[BO_j] + h_{ij}^2 E[BO_j]^2 \end{aligned}$$

Bijlage C Fitting procedure voor discrete verdeling

Deze beschrijving van de fitting procedure is overgenomen uit Rustenburg [6]

Stel X is een random variabele met distributie functie $F(X)$, dan wordt aangenomen dat $F(X) = 0$ for $X \leq 0$. Verder worden de eerste twee momenten van X weergegeven door $\mu_{1,x}$, $\mu_{2,x}$. De gekwadraterde variantie coefficient c_x^2 is gedefinieerd als:

$$c_x^2 = \frac{(\mu_{2,x} - \mu_{1,x}^2)}{\mu_{1,x}^2}$$

Daarbij wordt a gedefinieerd als $a = c_x^2 - \frac{1}{\mu_{1,x}}$. Het kan worden aangetoond dat de random variabele Y de eerste twee momenten van X weergeeft als Y als volgt wordt gekozen (zie Adan et al. [X]).

1. Als $\frac{-1}{k} \leq a \leq \frac{-1}{k+1}$ voor $k = 1, 2, 3, \dots$, dan volgt Y is een mix van twee binomiaal verdelingen zodat geldt:

$$Y = \begin{cases} \text{BIN}(k, p) & \text{w.p. } q; \\ \text{BIN}(k+1, p) & \text{w.p. } 1-q, \end{cases}$$

waarbij:

$$q = \frac{1 + a(1-k) + \sqrt{-ak(1+k) - k}}{1+a}, p = \frac{\mu_{1,x}}{k+1-q}$$

2. Als $a = 0$, dan volgt Y een Poisson verdeling $\text{Pois}(\lambda)$ met parameter $\lambda = \mu_{1,x}$
3. Als $0 < a < 1$ dan volgt Y een negatief binomiaal verdeling $\text{NB}(k, p)$ met parameters

$$k = \frac{1}{a}; p = \frac{a}{c_x^2}.$$

4. Als $a \geq 1$ dan volgt Y een mix van twee geometrische verdelingen zodat geldt:

$$Y = \begin{cases} \text{GEO}(p_1) & \text{w.p. } q_1; \\ \text{GEO}(p_2) & \text{w.p. } q_2, \end{cases}$$

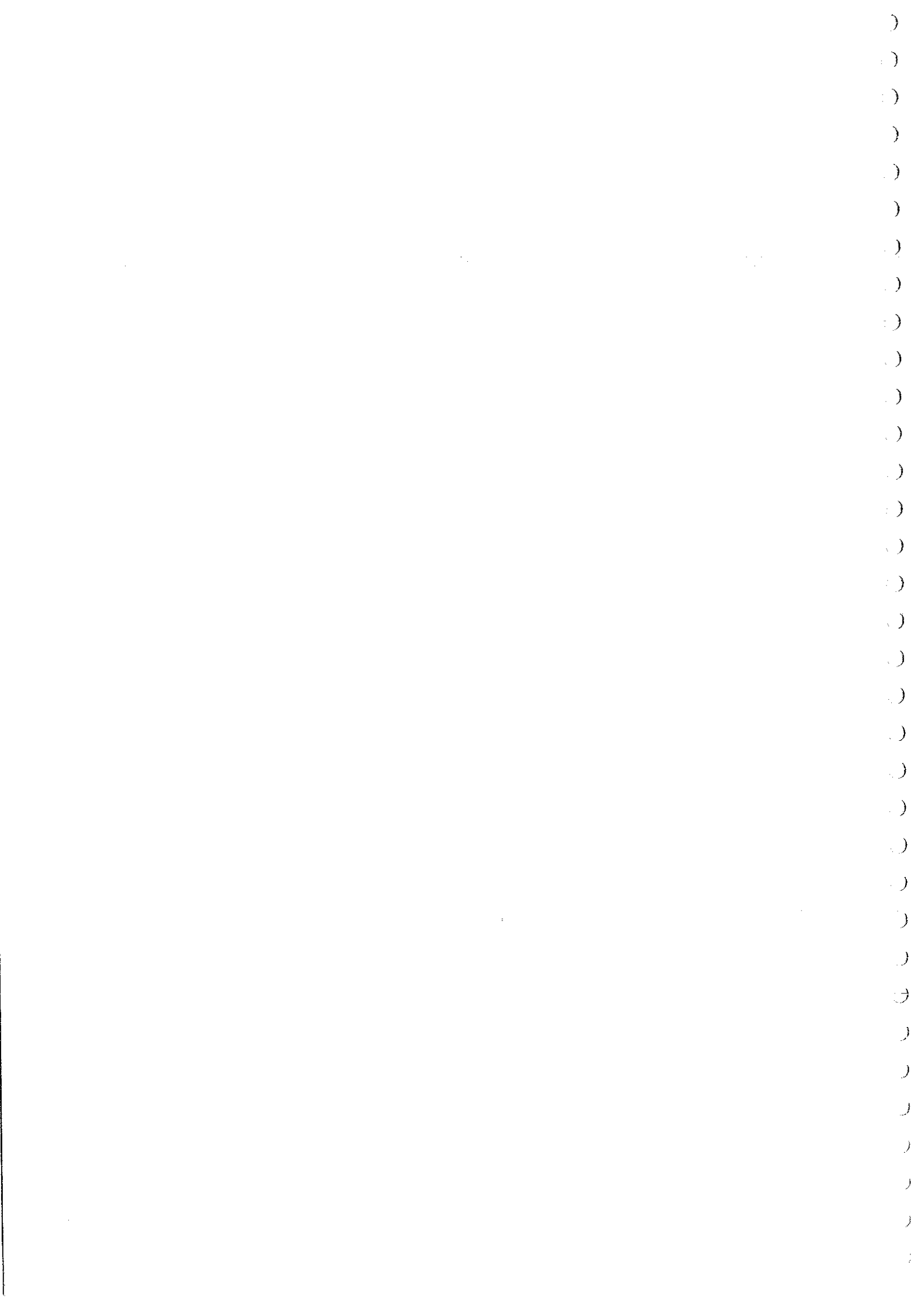
waarbij :

$$p_1 = \frac{\mu_{1,x}(1+a+\sqrt{a^2-1})}{2+\mu_{1,x}(1+a+\sqrt{a^2-1})}, q_1 = \frac{1}{1+a+\sqrt{a^2-1}};$$

$$p_2 = \frac{\mu_{1,x}(1+a+\sqrt{a^2-1})}{2+\mu_{1,x}(1+a+\sqrt{a^2-1})}, q_2 = \frac{1}{1+a+\sqrt{a^2-1}}.$$

Voor de analyse die in dit rapport wordt gebruikt, is het beter om de condities voor $\mu_{1,x}$ en c_x^2 te herschrijven in termen van $\mu_{1,x}$ en variance-to-mean ratios V_x . Omdat V_x het quotient is van de variantie en het gemiddelde en c_x^2 is het quotient van de variantie en het gemiddelde gekwadrateerd, kan V_x afgeleid worden als $V_x = c_x^2 \mu_{1,x}$. In onderstaande tabel zijn de typen verdelingen weergegeven die passen bij verschillende combinaties van $\mu_{1,x}$ en V_x . Voor de complete fitting procedure wordt verwezen naar Adan e.a. [X].

Combinaties van $E[X]$ en V_x	Type verdeling
$1-E[X] \leq V_x < 1$	Mix van twee binomiaal verdelingen
$V_x = 1$	Poisson verdeling
$1 < V_x \leq 1+E[X]$	Negatief binomiaal verdeling
$V_x > 1+E[X]$	Mix van twee geometrische verdelingen



Bijlage D Lijst van inputdata

In deze bijlage staan de verschillende inputdata die tijdens dit onderzoek gehanteerd zijn. In het raamwerk van figuur 3.1 staat naast de diverse inputdata, ook nog dat de systeemconfiguratie moet worden ingevoerd. Deze configuratie wordt ingevoerd door op een bepaalde manier in Excel de LRU's en SRU's neer te zetten. Om een indruk van de systeemconfiguratie te geven zijn de LRU's die tijdens dit onderzoek gehanteerd zijn gearceerd. De data die niet zijn gearceerd betreffen SRU's die tot de LRU behoren die boven de SRU's staat.

n Items 65

NrAircraft 65

itemno	name	Cost (*1000 Hfl.)	RepT (jaren)	Verbruik (#/jaar)	Qij
0	F-16	0	0	0	
1	FUFLWIND	8.79	0.06	1.76	
2	MP VV IND	13	0.06	7.56	
3	VOICEMSUN	19.03	0.15	1.32	
4	CIT	520	0.06	31.12	
18	R/T ASSY	200	0.32	0	0.49
19	INT PPROC	75	0.32	0	0.21
20	CCA	51.86	0.32	0	0.03
21	TCCP MOD	120	0.32	0	0.13
22	PWR SUPPL	89	0.32	0	0.14
5	AIFF CIT	420	0.06	0.88	
18	R/T ASSY	200	0.32	0	0.49
19	INT PPROC	75	0.32	0	0.21
20	CCA	51.86	0.32	0	0.03
21	TCCP MOD	120	0.32	0	0.13
22	PWR SUPPL	89	0.32	0	0.14
6	PNL	37.18	0.06	2.68	
7	CRYPTO ASS	16	0.33	35.56	
8	LPRF	350	0.06	52.48	
23	PLL 74ABJ	19.64	0.32	0	0.017
24	CCA74ABA	18.5	0.62	0	0.032
25	CCA74ABB	25	0.15	0	0.048
26	CCA74ABC	17	0.15	0	0.068
27	RECV74ABD	52.03	0.32	0	0.726
28	LNA74ABE	77	0.32	0	0.038
29	REF74ABG	44.35	0.32	0	0.048
30	PS74ABN	107.35	0.15	0	0.023
9	TRANSMMLU	450	0.06	40	
31	CCA74ACB	14.88	0.15	0	0.14
32	DET74ACC	9.49	0.32	0	0.19
33	CCA74ACD	5.34	0.62	0	0.05
34	PS74ACG	30.84	0.15	0	0.02
35	PVA74ACH	36	0.32	0	0.6

10 SDP	333	0.06	12	
36 CCA DISPL	32	0.33	0	0.043
37 CCASIGNP	34	0.33	0	0.192
38 CCAINPBF	35	0.33	0	0.047
39 CCAFFTR	24	0.33	0	0.052
40 CCASYNCH	35	0.33	0	0.038
41 CCAAUXIL	35	0.33	0	0.386
42 CCA1553B	40	0.33	0	0.041
43 CCACLOCK	35	0.33	0	0.025
44 CCACPU	22	0.33	0	0.048
45 CCANON-V	35	0.33	0	0.033
46 PWRSUPPLY	48	0.33	0	0.095
11 HUD	216	0.06	26.24	
47 TUBE UNIT	28.68	0.33	0	0.32
48 PANEL CRT	7.2	0.33	0	0.16
49 PWR SUPPL	9	0.33	0	0.008
50 PNLX DEFL	13.72	0.33	0	0.016
51 PNLV DEFL	17.05	0.33	0	0.046
52 HV/LV PS	17.2	0.33	0	0.046
53 PNL ASSY	22.04	0.15	0	0.404
12 AVTR TD	56.82	0.33	33.76	
13 CTVS	17	0.06	3.56	
54 VID SENS	7	0.33	0	0.2
55 ELECTR UN	9	0.33	0	0.8
14 DTU	90.38	0.06	34.24	
15 DED	64.88	0.33	1.32	
16 DED PWRSUPPL	45.53	0.15	0.44	
56 TRAY	33.63	0.33	0	1
17 EUPDG	87.09	0.06	17.32	
57 CHASSIS	43.5	0.33	0	0.116
58 SFP BRAM	76.19	0.62	0	0.235
59 UART CCA	6.65	0.33	0	0.036
60 CCA	29.21	0.62	0	0.029
61 1553 MUX	18	0.33	0	0.029
62 CGG CCA	74.19	0.62	0	0.073
63 CTVI CCA	8.46	0.33	0	0.043
64 DUALPWSPL	35	0.15	0	0.294
65 AVTR I/O	7.87	0.33	0	0.145

Bijlage E Verschillende iteratiestappen bij greedy algoritme case KLu

$I(10^5)$	A(%)	Artikel																																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
19251,7	98,65	2	3	2	4	0	2	21	6	4	2	4	19	2	5	2	1	6	11	7	2	4	5	2	5	2	3	31	2	3	0	4	10	7
19285,7	98,67	2	3	2	4	0	2	21	6	4	2	4	19	2	5	2	1	6	11	7	2	4	5	2	5	2	3	31	2	3	0	4	10	7
19301,7	98,67	2	3	2	4	0	2	22	6	4	2	4	19	2	5	2	1	6	11	7	2	4	5	2	5	2	3	31	2	3	0	4	10	7
19318,7	98,68	2	3	2	4	0	2	22	6	4	2	4	19	2	5	2	1	6	11	7	2	4	5	2	5	2	3	31	2	3	0	4	10	7
19518,7	98,77	2	3	2	4	0	2	22	6	4	2	4	19	3	5	2	1	6	12	7	2	4	5	2	5	2	3	31	2	3	0	4	10	7
19533,6	98,77	2	3	2	4	0	2	22	6	4	2	4	19	3	5	2	1	6	12	7	2	4	5	2	5	2	3	31	2	3	0	4	10	7
19883,6	98,90	2	3	2	4	0	2	22	7	4	2	2	19	3	5	2	1	6	12	7	2	4	5	2	5	2	3	31	2	3	0	5	10	7
20999,	99,07	2	3	2	4	0	2	22	7	4	2	2	19	3	5	2	1	6	12	7	2	4	5	2	5	2	3	31	2	3	0	5	10	7

$I(10^6)$	A(%)	Artikel																																
		33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
19251,7	98,65	1	2	1	3	1	2	1	6	1	1	2	1	2	9	7	1	1	2	2	6	1	4	1	1	1	1	5	2	1	1	2	2	4
19285,7	98,67	1	2	1	3	1	2	1	6	1	1	2	1	2	9	7	1	1	2	2	6	1	4	1	1	1	1	5	2	1	1	2	2	4
19301,7	98,67	1	2	1	4	1	2	1	6	1	1	2	1	2	9	7	1	1	2	2	6	1	4	1	1	1	1	5	2	1	1	2	2	4
19318,7	98,68	1	2	1	4	1	2	1	6	1	1	2	1	2	9	7	1	1	2	2	6	1	4	1	1	1	1	5	2	1	1	2	2	4
19518,7	98,77	1	2	1	4	1	2	1	6	1	1	2	1	2	9	7	1	1	2	2	6	1	4	1	1	1	1	5	2	1	1	2	2	4
19533,6	98,77	1	2	1	4	1	2	1	6	1	1	2	1	2	9	7	1	1	2	2	6	1	4	1	1	1	1	5	2	1	1	2	2	4
19883,6	98,90	1	2	1	4	1	2	1	6	1	1	2	1	2	9	7	1	1	2	2	6	1	4	1	1	1	1	5	2	1	1	2	2	4
20999,	99,07	1	2	1	4	1	2	1	6	1	1	2	1	2	9	7	1	1	2	2	6	1	4	1	1	1	1	5	2	1	1	2	2	4

Laatste 8 iteratiestappen case KLu

		Artikel																																	
(10 ⁵)	A(%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
15.408	97,07	1	2	1	4	1	1	1	5	4	2	3	15	1	4	2	1	3	8	4	1	3	3	1	3	1	2	18	2	2	1	2	4	3	
		3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7
		1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	1	2	1	2	5	1	1	1	2	1	2	2	2

Beschikbaarheid en bijbehorende investering (huidige bestuursregel zonder OV)

		Artikel																																	
(10 ⁵)	A(%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
28978	99,90	1	3	1	9	1	2	2	1	1	4	8	21	2	10	2	1	5	10	5	2	4	4	1	3	2	2	2	2	3	12	3	6	3	
		3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7
		1	1	1	3	1	1	1	4	1	1	1	1	2	6	4	1	1	2	2	5	1	3	1	2	5	1	1	1	2	1	2	1	3	3
		5																																	

Beschikbaarheid en bijbehorende investering (huidige bestuursregel met OV)

		Artikel																																
I(10 ⁷)	A(%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
54,397	99,88	1	5	1	2	6	4	2	2	5	1	2	40	24	1	2	4	5	37	3	3	1	29	1	2	2	10	8	10	5	4	1	1	5
		3	3	5	3	1	3	4	4	4	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	
		4	5	6	7	8	9	0	1	2																								
		5	2	5	5	4	5	5	1	1	15	5	3	9	0	1	29	3	2	3	2	3	2	1	0	14	3	3	1	0	1	0	3	2

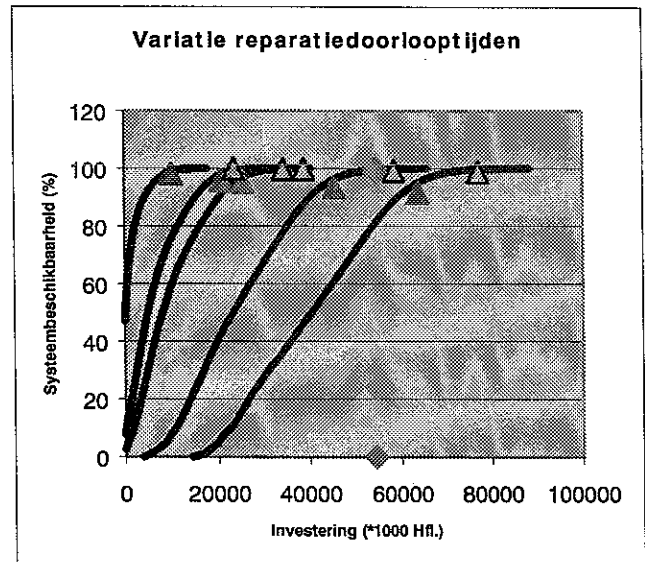
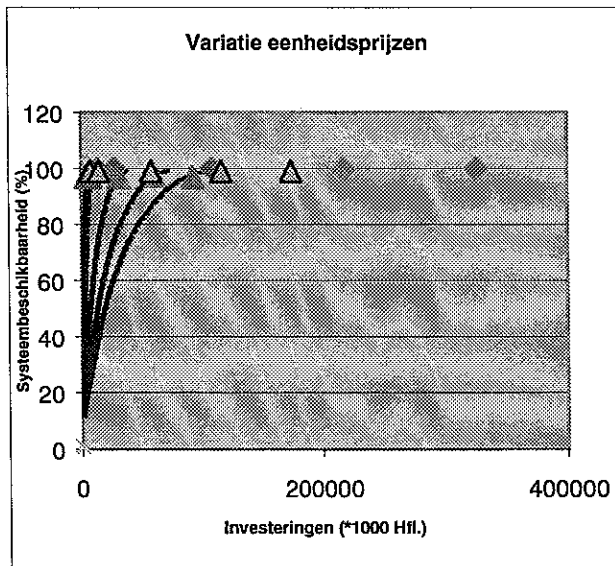
Beschikbaarheid bij huidige streefniveaus (VA)

		Artikel																																
I(10 ⁵)	A(%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
29,837	92,83	4	9	4	6	0	8	0	1	0	7	6	2	7	26	2	5	9	6	0	2	0	5	29	7	11	14	33	2	14	16	11	16	12
		3	3	3	3	3	4	4	4	4	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	
		1	5	6	7	8	9	0	1	2																								
		1	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	34	19	5	10	9	10	4	0	0	0	3	3	3	0	0	3	2	5	3	
		4																																

Beschikbaarheid bij Economische voorraad

Bijlage F Beschikbaarheidscurven What-if analyse

De conclusies die met betrekking tot de what-if analyse (hoofdstuk 5) zijn gebaseerd op figuur 5.4 en op onderstaande figuren. De what-if analyse is uitgevoerd om te laten zien dat het verbeterpotentieel nauwelijks verandert bij andere waarden voor de inputvariabelen. Voor deze what-if analyse zijn de verschillende inputvariabelen gevarieerd en is vervolgens weer vergeleken wat de beschikbaarheid zou zijn bij andere inputvariabelen.



De inputvariabelen zijn met de volgende factoren vermenigvuldigd:

Eenheidsprijzen : [0,25; 0,5; 2, 4, 6]
 Reparatiedoorlooptijden : [0,5; 1,5; 2; 4; 6]

Bij de eenheidsprijzen is zowel gekeken naar het verbeterpotentieel bij lagere als bij hogere eenheidsprijzen. Bij de reparatiedoorlooptijden is met name gekeken naar het verbeterpotentieel bij langere reparatiedoorlooptijden, omdat de indruk heerst dat de reparatiedoorlooptijden die in het model gebruikt zijn mogelijk aan de lage kant zijn.

Bijlage G Toetsing verbruiksprocessen

Om na te gaan in hoeverre de eerste aanname uit § 3.3 gerechtvaardigd is, wordt een χ^2 -toets uitgevoerd. Een χ^2 -toets toont aan of de aanname dat een bepaald proces een willekeurige verdeling volgt gerechtvaardigd is of verworpen dient te worden [4]. De χ^2 -toets is als volgt gedefinieerd:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Waarbij:

- O_i : gerealiseerd verbruik
- E_i : gemiddelde verbruik
- k : het aantal waarnemingen
- p : het aantal geschatte parameters
- α : onbetrouwbaarheid

Bij het uitvoeren van een χ^2 -toets wordt aan de hand van bovenstaande formule χ^2 vergeleken met $\chi^2_{k-p-1, \alpha}$. De nulhypothese bij een dergelijke toets is dat het verbruik een bepaalde verdeling volgt. Wanneer de waarde voor χ^2 groter is dan $\chi^2_{k-p-1, \alpha}$, wordt de nulhypothese verworpen en wordt aangenomen dat het verbruik een andere verdeling volgt.

Kwartaal (jaar)	Artikel			
	AVTR TD	GEN EUPDG	CMFD	CIT
4 (2000)	7	8	11	9
3 (2000)	18	3	14	4
2 (2000)	12	4	7	10
1 (2000)	10	8	11	14
4 (1999)	15	5	9	7
3 (1999)	9	3	7	10
2 (1999)	3	8	9	8
1 (1999)	2	4	8	9

Verbruiken per kwartaal

Op basis van de bovenstaande gerealiseerde verbruiken, wordt het gemiddelde verbruik bepaald. Deze data worden in bovenstaande formule gevoerd en zo wordt de waarde van χ^2 verkregen. De verschillende waarden voor χ^2 zijn, per artikel:

AVTR TD	:22,5
GEN EUPDG	:6,674
CMFD	:4,21
CIT	:6,4

Voor elk artikel zijn evenveel waarnemingen beschikbaar en evenveel parameters geschat. Wanneer de onbetrouwbaarheid gelijk wordt gesteld aan 5 % geldt bij 8 waarnemingen en 1 geschatte parameter dat de waarde voor $\chi^2_{6, 0,05}$ gelijk is aan 12,59.

Voor drie van de bovenstaande artikelen mag worden aangenomen dat het verbruik een Poisson verdeling volgt. Er mag op basis van bovenstaande toetsing *niet* zondermeer worden aangenomen dat het verbruik van *alle* geselecteerde artikelen een Poisson verdeling volgt.

Bijlage H Enkele iteratiestappen ter controle van de programmatuur

Om te verifiëren of de programmatuur juist werkt, worden aan de hand van het gebruikte voorbeeld in hoofdstuk 5 enkele iteratiestappen stappen handmatig nagerekend. In onderstaande tabel staat voor elke stock level vector het verwacht aantal backorders ($EBO(S_i)$) gegeven. Het artikel waar de afname van het verwacht aantal backorders per extra geïnvesteerde gulden het grootst is, wordt geselecteerd om in de voorraad opgenomen te worden.

EBO (S)	Artikel										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3,9195	0	1	0	2	0	15	5	2	0	1	1
3,8193	1	1	0	2	0	15	5	2	0	1	1
3,8431	0	2	0	2	0	15	5	2	0	1	1
3,7399	0	1	1	2	0	15	5	2	0	1	1
3,0473	0	1	0	3	0	15	5	2	0	1	1
3,7710	0	1	0	2	1	15	5	2	0	1	1
3,7723	0	1	0	2	0	16	5	2	0	1	1
3,5513	0	1	0	2	0	15	6	2	0	1	1
3,5732	0	1	0	2	0	15	5	3	0	1	1
3,6673	0	1	0	2	0	15	5	2	1	1	1
3,5541	0	1	0	2	0	15	5	2	0	2	1
3,5207	0	1	0	2	0	15	5	2	0	1	2
c_i	8,788	13	19,032	520	37,175	16	200	75	51,856	120	89
$\Delta(EBO)/C_i$	0,0114	0,0059	0,0094	0,0017	0,004	0,0092	0,0018	0,0046	0,0049	0,003	0,0045

De afname in het verwacht aantal backorders per extra geïnvesteerde gulden is het grootst voor artikel 1. Dit betekent dat artikel 1 wordt geselecteerd om in de voorraad te worden opgenomen. Dit betekent tevens een nieuwe stock level vector. Met deze nieuwe vector wordt vervolgens doorgerekend.

EBO (S)	Artikel										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3,8193	1	1	0	2	0	15	5	2	0	1	1
3,8141	2	1	0	2	0	15	5	2	0	1	1
3,7429	1	2	0	2	0	15	5	2	0	1	1
3,6397	1	1	1	2	0	15	5	2	0	1	1
2,9471	1	1	0	3	0	15	5	2	0	1	1
3,6708	1	1	0	2	1	15	5	2	0	1	1
3,6721	1	1	0	2	0	16	5	2	0	1	1
3,4511	1	1	0	2	0	15	6	2	0	1	1
3,4730	1	1	0	2	0	15	5	3	0	1	1
3,5671	1	1	0	2	0	15	5	2	1	1	1
3,4539	1	1	0	2	0	15	5	2	0	2	1
3,4205	1	1	0	2	0	15	5	2	0	1	2
c_i	8,788	13	19,032	520	37,175	16	200	75	51,856	120	89
$\Delta(EBO)/C_i$	0,0006	0,006	0,0094	0,0017	0,004	0,0092	0,0018	0,0046	0,0049	0,003	0,0045

Bovenstaande iteraties komen overeen met de iteratiestappen uit tabel 5.2. Het programma lijkt het algoritme dus goed uit te voeren.