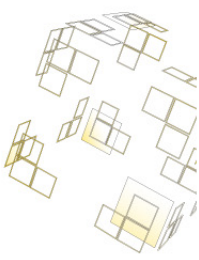


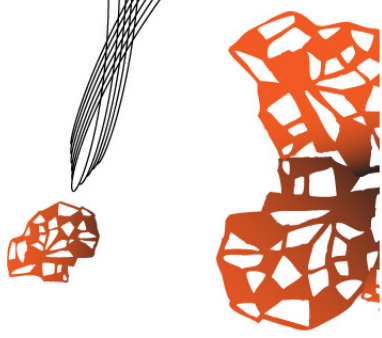
Bacheloropdracht
Technische Wiskunde

**Het optimaliseren van het voorraad-
beheer van verbruiksgoederen in de
voorraadkamers in het AMC**



Sjors van Baar
Inge Krul
Selmar van der Veen

Begeleiders:
Prof. dr. R.J. Boucherie
Dr. N. Kortbeek
Mr. M.D.A. Stam



17 juni 2013

UNIVERSITEIT TWENTE.



MANAGEMENT SUMMARY

In het Academisch Medisch Centrum (AMC) in Amsterdam wordt met een voorraadsysteem de voorraad van verbruiksgoederen beheerd aan de hand van een minimale en maximale voorraadhoogte voor ieder product. De waarden voor de minimale en maximale voorraadhoogte zijn gebaseerd op verouderde gegevens en zijn daarom op dit moment niet meer optimaal.

In dit verslag wordt gekeken naar een andere methode om deze voorraadhoogtes te bepalen. De minimale voorraadhoogte is nodig om aan een bepaald servicelevel te voldoen. Er mag namelijk niet te vaak een spoedbestelling geplaatst worden. De maximale voorraadhoogte zorgt er voor dat er niet te veel producten op voorraad liggen. Dit zorgt namelijk voor hogere voorraadkosten. Door deze waarden te optimaliseren wordt er geld bespaard en kan dit geld voor andere doeleinden, zoals bijvoorbeeld onderzoek, gebruikt worden. Daarnaast wordt er een optimale reviewperiode bepaald. Deze geeft aan hoe vaak de voorraad per kamer gereviewd moet worden. Tot slot worden de kamers verdeeld over de medewerkers die de voorraad aanvullen. Zodat ook duidelijk is dat er in het AMC gewerkt kan worden met de optimale voorraadhoogtes

Het bovenstaande is verwerkt in een model. Uit het model kwam naar voor dat wanneer een kamer eens in de twee weken gereviewd werd, deze kamer niet kon voldoen aan het servicelevel. Zodoende zal voor geen enkele kamer aangeraden worden om deze eens in de twee weken te reviewen, want het servicelevel is van groot belang in een ziekenhuis. Verder kon het model toegepast worden op een kleine verzameling van kamers, een klein onderdeel van het ziekenhuis. Hier kwam een goede verdeling van de kamers uit met optimale voorraadhoogtes voor een product. Dit principe kan, door extra kamers toe te voegen, het gehele voorraadbeheer in het AMC beschrijven.

Om het model nog accurater te maken, zal vooral de input specifiekere moeten. De meeste kosten, bijvoorbeeld voor het reviewen en het bestellen, zijn nu gebaseerd op schattingen. Wanneer de exacte kosten bekend zijn, zal het model een realistischer beeld geven. Het model gebruiken om beter de minimale- en maximale voorraadhoogtes te bepalen is zeer aan te raden, zeker wanneer het AMC de gebruiksgegevens van producten zal bijhouden die daarna gebruikt kunnen worden als basis van het model.

ABSTRACT

In dit verslag wordt het reorderlevel en het order-up-to-level van de producten in de voorraadkamers van een ziekenhuis geoptimaliseerd bij periodieke reviewmomenten. Dit gebeurt door middel van het minimaliseren van de kosten, rekening houdend met een gewenst servicelevel.

Om dit te bereiken, zijn de voorraadhoogtes van de producten als toestanden in een Markovketen gemodelleerd. Aan de hand van het vraagproces dat Poisson is, worden de overgangskansen tussen de toestanden berekend. Met de evenwichtsvergelijkingen die hieruit volgen, wordt de evenwichtsverdeling bepaald, de kans om in een bepaalde toestand te beginnen. De kosten die hierbij worden beschouwd, zijn product-, review-, bestel-, tekort- en voorraadkosten. Met de evenwichts- en overgangskansen en de kosten die hierbij horen, worden vervolgens de totale kosten berekend. Deze zijn afhankelijk van de reviewperiode R , het reorderlevel s en order-up-to-level S . Door voor een aantal vaste keuzes van R , en daarna ook van S , de totale kostenfunctie voor s te optimaliseren, ontstaat er een optimale voorraadstrategie voor één product.

Omdat er onafhankelijkheid is tussen de producten, zijn de kosten voor meerdere producten op één kamer gelijk aan de som van alle individuele kosten. Voor iedere reviewperiode R en de daarbij behorende kosten wordt met een toewijzingsalgoritme bepaald wat de optimale verdeling is van al deze reviewmomenten over meerdere voorraadkamers.

VOORWOORD

Het verslag dat voor u ligt, is het resultaat van een klein half jaar onderzoek, in de periode van februari tot en met juni 2013, naar het voorraadbeheer in het Academisch Medisch Centrum (AMC) in Amsterdam. Als afsluiting van de bachelor Technische Wiskunde aan de Universiteit Twente (UT) in Enschede hebben wij er in een groep van drie mensen aan gewerkt.

Deze opdracht draait om het project Scannen, Plannen en Aanvullen (SPA). Om kennis te maken met dit project werden we met een flinke ochtendwandeling wegwijs gemaakt met dit systeem en in het AMC. Hierbij werden de eerste contacten gelegd met alle medewerkers die betrokken zijn bij het project SPA. Na deze dag konden we aan de slag met de opdracht en heeft dat geresulteerd in het verslag dat nu voor u ligt.

Tallose mensen, verbonden aan de UT en het AMC verleenden hun medewerking. Het opsommen van hen allen is een onmogelijke taak. Langs deze weg danken wij hen niettemin voor hun bijdragen.

Onze speciale dank gaat uit naar Richard Boucherie voor zijn begeleiding vanuit de UT en verhelpende hulp bij het opstellen van het model, Nikky Kortbeek voor zijn hulp op het vlak van projectmatig werken en zijn begeleiding vanuit de UT en het AMC, en Maarten Stam voor zijn begeleiding vanuit het AMC en zijn contacten in het AMC.

We hebben veel gehad aan de aanwijzingen en opmerkingen die we kregen op ons verslag en het werken aan deze bacheloropdracht.

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	11
2	Het Academisch Medisch Centrum	13
2.1	Informatie AMC	13
2.2	Huidige situatie voorraadbeheer AMC	13
2.3	SPA: Scannen, Plannen, Aanvullen	14
2.3.1	Scannen	15
2.3.2	Plannen	16
2.3.3	Aanvullen	16
2.3.4	Frequentie SPA	16
3	Literatuur	17
3.1	Voorraadmodellen	17
3.1.1	Belangrijkheid producten	17
3.1.2	Continue of periodieke reviewmomenten	18
3.1.3	Verschillende voorraadsystemen	18
3.1.4	Restricties van een voorraadstelsel	21
3.2	Theorie Markovketens	22
4	Model voor één product op één kamer	25
4.1	Aannames	25
4.2	Situatieschets	26
4.3	Markovmodel	26
4.3.1	Markovketens	27
4.3.2	Overgangsmatrix	28
4.3.3	Evenwichtskansen	28
4.4	Verwachte kosten in een vast reviewinterval	29
4.4.1	Productkosten	30
4.4.2	Bestelkosten	30
4.4.3	Reviewkosten	30
4.4.4	Tekortkosten	31
4.4.5	Voorraadkosten	32
4.5	Betrouwbaarheid	34
4.6	Bepalen optimale waarden	35
4.7	Samenvatting model voor één product in één voorraadkamer	35
5	Model voor meerdere producten op meerdere kamers	37
5.1	Cumulatieve kosten per kamer	37
5.2	Kamertoewijzing	37
6	Resultaten	39
6.1	Variabelen schatten	39
6.2	Resultaten	40
6.3	Optimale R per kamer	44
6.4	Kamers toewijzen	44
6.5	Variaties van variabelen	45
7	Conclusie	47
8	Discussie	49

9	Aanbevelingen	51
9.1	Aanbevelingen voor het AMC	51
9.2	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	51
A	Tabel met variabelen	55
B	Recurisie	57
C	Input model	59
D	Tabellen bij variaties van α, K, B, J	61
D.1	α variabel	61
D.2	K variabel	62
D.3	J variabel	64
D.4	B variabel	65
E	Code	67

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

In Nederland wordt er op steeds meer gebieden geld bespaard om het op een andere plek beter te besteden. De zorg wordt hier niet buiten gelaten. Zo is in de afgelopen jaren het eigen risico verhoogd, zit de rollator niet meer in het basispakket en moeten slechthorenden een deel van hun gehoorapparaat zelf betalen [1]. Het geld wat hierbij vrijkomt, kan gebruikt worden om meer onderzoek te doen. Naast deze algehele bezuinigingen zijn ziekenhuizen zelf ook aan het besparen en dat gebeurt ook op niet-medische gebieden.

Het Academisch Medisch Centrum (AMC) in Amsterdam wil geld gaan besparen op het voorraadbeheer, zodat dit geld gebruikt kan worden voor medische doeleinden. Op iedere afdeling in het AMC zijn voorraadkamers aanwezig waaruit de medewerkers de benodigde spullen kunnen halen die nodig zijn voor de behandeling van de patiënten. Al deze voorraadkamers worden vanuit een groot magazijn in de kelder bevoorraadt. Het is noodzakelijk om producten op voorraad te hebben om aan de vraag te kunnen voldoen, het gaat hier namelijk om de gezondheid van de patiënten. Aan de andere kant geldt dat te veel voorraad ook niet wenselijk is, omdat dit meer kosten met zich meebrengt. Voor het geld wat is geïnvesteerd in producten die op voorraad liggen, kan namelijk geen rente worden ontvangen, al is het vaker zo dat hier juist geld voor moet worden geleend. Daarnaast is er het risico dat producten bederven of dat ze verouderen, omdat er al nieuwe en betere versies te verkrijgen zijn. Andere risico's zijn dat door schade van bijvoorbeeld een brand of wateroverlast de producten niet meer te gebruiken zijn. Als laatste onderdeel van de kosten moet de ruimte worden beschouwd. De voorraden moeten ergens worden opgeslagen en hierbij moet gedacht worden aan kosten voor het huren van de ruimte en vaste lasten, zoals elektriciteit.

De voorraadkosten die hierboven beschreven zijn, zijn de factoren rente, risico en ruimte. Deze zorgen voor onnodige kosten en die bedragen kunnen beter besteed worden aan medische doeleinden. Om te bepalen op welke manier het beste kosten bespaard kunnen worden op de voorraad, is er een onderzoek gedaan wat in dit verslag wordt gepresenteerd. Het doel van dit onderzoek is als volgt:

“Het optimaliseren van het voorraadbeheer van verbruiksgoederen in de voorraadkamers in het AMC.”.

De voorraadkosten moeten geminimaliseerd worden, maar er zijn enkele restricties waar rekening mee gehouden moet worden. Zo moet er bijna altijd een item van een product op voorraad liggen. Daarnaast kan er ook een spoedbestelling geplaatst worden. Dit betekent dat er direct een product vanuit het magazijn naar een afdeling wordt gebracht, dit brengt alleen wel extra kosten met zich mee.

In dit verslag is eerst de huidige situatie van het voorraadbeheer in het AMC beschreven, samen met een schematische weergave van deze situatie. Dit wordt vervolgd met aan ons onderzoek gerelateerde literatuur over voorraadmodellen, ook de basis van Markovtheorie zal beschreven worden. Vervolgens wordt er een model opgesteld om het voorraadbeheer in het AMC te beschrijven. Daarna worden de resultaten gepresenteerd en waar mogelijk vergeleken met gegevens uit het AMC. Uit deze resultaten worden conclusies getrokken. Daarna worden de aannames besproken en worden er aanbevelingen gedaan aan het AMC en voor vervolgonderzoek. Het verslag wordt afgesloten met de literatuurlijst en een aantal bijlagen.

HOOFDSTUK 2

HET ACADEMISCH MEDISCH CENTRUM

In dit hoofdstuk is informatie te vinden over het Academisch Medisch Centrum (AMC) in Amsterdam en het voorraadbeheer aldaar. Dit gebeurt eerst door het gehele systeem globaal te beschrijven, waarna er verder wordt ingegaan op een aantal delen van het systeem.

2.1 Informatie AMC

Het Academisch Medisch Centrum is één van de acht Universitair Medische Centra in Nederland. Vanzelfsprekend is de hoofdtak van het AMC de behandeling van patiënten, maar daarnaast wordt er ook medisch onderzoek verricht en geneeskundig onderwijs gegeven.

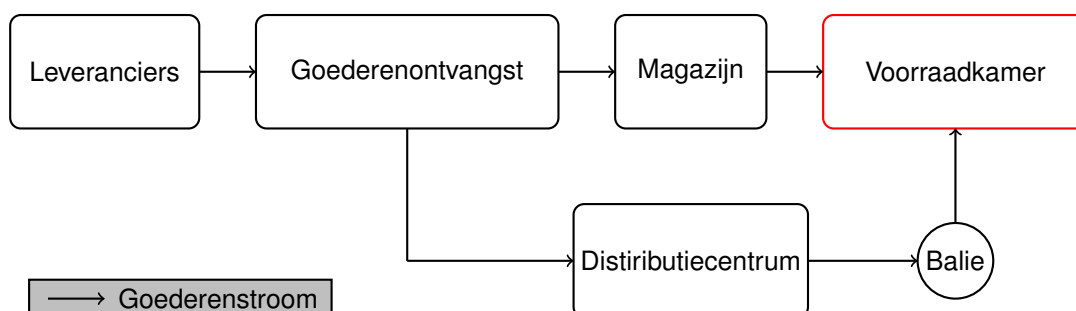


Het AMC is in 1983 ontstaan uit een fusie van twee Amsterdamse ziekenhuizen en werd toen ondergebracht onder de geneeskundefaculteit van de Universiteit van Amsterdam. In 1988 voegde het Emma Kinderziekenhuis zich bij het AMC. Daarnaast zijn vele onderzoeksinstituten en -bedrijven op het terrein van of in het AMC gevestigd. Inmiddels werken er ruim zeventuizend mensen in het AMC.

Het logistieke gedeelte van het AMC is bij de verbouwing terecht gekomen in de kelder. De focus van het AMC ligt op de patiëntenbehandeling, hierdoor is er aan het logistieke gedeelte en de logistieke infrastructuur weinig aandacht besteed. In de laatste jaren wordt er wel steeds meer gekeken naar de logistiek, zowel die van patiënten als die van het voorraadbeheer.

2.2 Huidige situatie voorraadbeheer AMC

In dit gedeelte is beschreven hoe het huidige voorraadsysteem in het AMC werkt. Allereerst is in figuur 2.1 een schematische weergave terug te vinden van het systeem. Met de pijlen in de figuur zijn de goederenstromen aangegeven.



Figuur 2.1: Schematische weergave goederenstroom in het AMC.

De verschillende processen zullen hierna kort worden beschreven.

Voorraadkamers

Eén of meerdere keren per week worden de voorraadhoogtes in de kamers bepaald met behulp van Enterprise Resource Planning (ERP). Dit kan met behulp van het scansysteem of zonder te scannen. Indien het laatste het geval is, betekent het dat een medewerker handmatig alles opschrijft en later in een computer invoert. Deze aanvraag moet door een leidinggevende worden goedgekeurd en wordt doorgestuurd naar afdeling Inkoop. De afdeling Inkoop beslist dan uiteindelijk om het product al dan niet te bestellen.

In de voorraadkamers die wel gescand worden liggen in principe drie soorten producten. Dit zijn producten die het ziekenhuis zelf in haar magazijn op voorraad heeft liggen en producten die bij leveranciers worden besteld. Magazijnproducten zijn aangegeven met blauwe kaartjes en producten die bij leveranciers worden besteld zijn herkenbaar aan rode kaartjes. Alle producten met rode kaartjes gaan vanuit het distributiecentrum via de Balie naar de voorraadkamers. Daarnaast zijn er de groene kaartjes voor producten die met de hand besteld worden door het personeel van die afdeling.

Met behulp van het scansysteem worden de huidige voorraden vergeleken met de minima en maxima die al eerder zijn vastgesteld. Deze minima en maxima zijn gebaseerd op gegevens uit eerdere jaren en zijn zo opgesteld dat er in principe ruim aan de vraag voldaan kan worden.

Het scansysteem geeft een overzicht met de producten uit de voorraadkamers die aangevuld moeten worden en aanwezig zijn in het magazijn. De orders die bij een leverancier besteld worden, gaan via de afdeling Inkoop die kant op.

Met behulp van de pick-orderlijsten die het scansysteem heeft uitgeven, worden de orders uit het magazijn gehaald en via een aantal rondes worden zo alle voorraadkamers aangevuld. Het project dat er voor moet zorgen dat al het voorraadbeheer door middel van scannen wordt gedaan, heet Scannen, Plannen, Aanvullen (SPA). SPA is ongeveer tien jaar geleden opgezet en zal later uitgebreider worden beschreven.

Leveranciers en magazijn

Natuurlijk moet ook het magazijn aangevuld worden om zo aan de vraag vanuit de voorraadkamers te kunnen voldoen. Dit gebeurt vanuit het Bureau Logistiek Dienstencentrum. Zij zorgen ervoor dat er genoeg voorraad aanwezig is in het magazijn zodat de voorraadkamers altijd aangevuld kunnen worden. Wanneer de voorraadmiveaus in het magazijn te laag zijn, plaatsen zij de orders bij de leveranciers. De leveranciers leveren de orders die geplaatst zijn vanuit het magazijn, maar ook de orders die via de afdeling Inkoop bij de leveranciers zijn aangekomen.

Goederenontvangst en distributiecentrum

Alle producten die door de leveranciers geleverd worden, komen binnen bij de goederenontvangst. Op deze afdeling worden de goederen verdeeld en doorgegeven aan het magazijn of het distributiecentrum. In het magazijn worden zo de voorraadhoogtes op peil gebracht en vanuit het distributiecentrum worden de goederen direct naar een opslagplaats van een cluster gebracht. Bij ieder cluster is een aantal afdelingen en dus voorraadkamers aangesloten.

2.3 SPA: Scannen, Plannen, Aanvullen

Zoals hier boven te lezen is, zijn er veel verschillende mensen bezig met het bijvullen van de voorraad als deze niet gescand worden. Om dit proces te vereenvoudigen, is er het SPA-project opgezet. Hierbij wordt, in het kort, de voorraad gescand, gepland en aangevuld. Hieronder staat een beschrijving van dit project.

2.3.1 Scannen

Elke doordeweekse dag begint om half acht 's ochtends met het scannen van de voorraadkamers. Met een groep van ongeveer tien medewerkers van het Logistiek Dienstencentrum (LDC) worden de voorraadkamers gescand, gepland een aangevuld. De medewerkers krijgen een aantal voorraadkamers toegewezen die zij in die ochtend moeten bevoorraden. Deze liggen niet altijd dicht bij elkaar. In een voorraadkamer liggen alle producten die op een afdeling worden gebruikt. Dit varieert van verbanden, bloedbuisjes en pampers tot koffiebekers, pennen en theezakjes en deze producten zijn allemaal langere tijd (minstens een aantal maanden) houdbaar. Elke drie maanden worden de producten in de voorraadkamers op houdbaarheid gecontroleerd, zodat de medewerkers van het LDC hier niet altijd op hoeven te letten. Door de voorraadkasten FIFO (First In, First Out) te vullen, wordt er gezorgd dat de producten die al langer op voorraad liggen het eerst worden gebruikt.



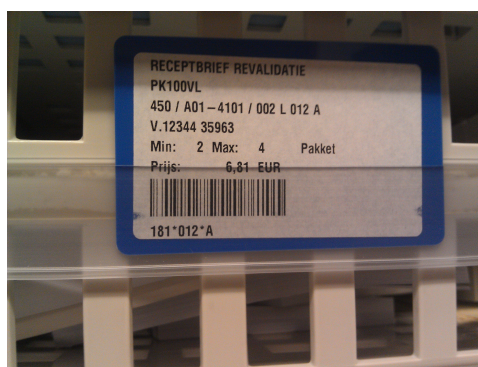
(a) De voorraadkasten.



(b) Verschillende kleuren scankaartjes.

Figuur 2.2: Een voorraadkamer in het AMC.

Op deze kaartjes staat veel informatie, waarvan de min-waarde voor de medewerker het belangrijkste is. Als een voorraad onder het minimum is, voert de medewerker de huidige voorraad in op zijn scanapparaat.



Figuur 2.3: Voorbeeld van een scankaartje.

Op een scankaartje, zoals in figuur 2.3, staan, in dezelfde volgorde, de volgende gegevens:

- de productomschrijving;
- de basishoeveelheid van één eenheid van het product;

- de productcode met de afdeling, verdieping, kamer, kast en lade;
- het productnummer;
- de minimumvoorraad, de maximumvoorraad (tot waar aan te vullen) en de vorm waarin het product geleverd wordt. Dit kan bijvoorbeeld per stuk, per pakket of per doos;
- de productprijs per eenheid;
- de streepjescode voor het scannen.

Na het controleren van alle voorraden wordt het scanapparaat naar het kantoor van de leidinggevende gebracht, die het apparaat uitleest zodat overgegaan kan worden op het plannen.

2.3.2 Plannen

Na het scannen wordt er een orderlijst geprint waarop precies staat hoeveel producten er moeten worden bijgevuld en waar deze te vinden zijn. Het aantal wordt berekend door het verschil te meten van de (gescande) huidige voorraad en de maximumvoorraad. Het achterliggende systeem dat hiervoor wordt gebruikt heet CareCTRL. Vervolgens wordt er een lijst uitgedraaid waarmee de medewerkers van het LDC in het magazijn de order kunnen ophalen.

Er wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen steriele en niet-steriele producten. Deze staan in aparte magazijnen en moeten ook apart van elkaar worden opgeslagen in de voorraadkamer. De lijsten zijn zodanig samengesteld dat de medewerkers een vaste route kunnen lopen, waarbij de gangpaden en stellingnummers zijn gegeven. Als alle producten opgehaald zijn, wordt deze lijst weer gescand bij een computer. Daaruit komt dan een nieuwe lijst per voorraadkamer. Deze lijsten blijven achter in de voorraadkamers en medewerkers van die afdeling kunnen deze nog nakijken. De medewerker van de LDC kan nu met de gevulde kar de voorraadkamers aanvullen.



Figuur 2.4: Het magazijn met niet-steriele producten. Links in beeld staat een voorraadkar.

2.3.3 Aanvullen

Het aanvullen is de meest eenvoudige stap van het proces. De producten waarvan de voorraad te laag is, worden bijgevuld met de gepickte producten. In figuur 2.2a is een voorbeeld van een kast in een voorraadkamer te zien.

2.3.4 Frequentie SPA

In de huidige situatie in het AMC verschilt het per afdeling hoe vaak er gescand wordt. Bij het bepalen van de min- en max-niveaus wordt wel rekening gehouden met de frequentie van het scannen. Als er bijvoorbeeld één keer per week gescand wordt, dan is het min-niveau gelijk aan twee keer het gemiddelde verbruik per week en het max-niveau is gelijk aan vier keer het gemiddelde verbruik per week. Als er twee keer per week gescand wordt, zijn de min- en max-niveaus gelijk aan respectievelijk één en twee keer het gemiddelde verbruik per week. Als er een min-niveau aangegeven wordt op een scankaartje van 0, dan wordt er gescand als er minder dan de helft van een doos nog aanwezig is in de voorraadkamer.

HOOFDSTUK 3

LITERATUUR

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de literatuur die relevant is voor dit onderzoek. In de voorraadtheorie wordt er onderscheid gemaakt tussen verschillende soorten voorraadmodellen. Om de juiste voorraadstrategie te bepalen moet het goede voorraadmodel gebruikt worden. Hieronder komen verschillende modellen ter sprake en wordt een aantal verschillen naar voren gehaald.

3.1 Voorraadmodellen

Het boek van Silver, Pyke, and Peterson [5] is als referentie gebruikt voor de informatie in dit hoofdstuk en bekijkt de volgende punten:

1. de frequentie van het reviewen;
2. het moment van bestellen;
3. de grootte van een bestelling.

Per punt wordt gekeken welk voorraadmodel het beste aansluit bij de werkelijkheid. De vraag naar de producten is niet bekend, maar kan wel benaderd worden. Er is dus sprake van een stochastische vraag. Hierdoor is er kans op tekorten door een hoge vraag in een periode, maar zal er bij weinig vraag veel op voorraad liggen. De volgende punten komen ook aan bod om voorraadmodellen te analyseren:

1. de waarde van een product;
2. het continu of periodiek reviewen van de voorraadhoogten;
3. de invloed van verschillende systemen;
4. bepaalde restricties, zoals kosten en capaciteit van personeel.

Bovenstaande punten worden nu per stuk behandeld.

3.1.1 Belangrijkheid producten

In een grote organisatie zoals een ziekenhuis zijn er veel verschillende producten met ieder hun eigen doorlooptijd. Dit houdt in dat het ene product vaker nodig is dan het andere. Naast deze eigenschap kan er ook sprake zijn van producten die bederfelijk zijn of producten die een erg belangrijke waarde hebben voor de organisatie. In een ziekenhuis zijn dit bijvoorbeeld medicijnen en bloed. Om niet voor elk product een apart model te maken, is er de zogenaamde ABC-classificatie. Deze classificatie deelt ieder product in een bepaalde klasse in om zo onderscheid te kunnen maken tussen de verschillende producten. Bij ABC-classificatie worden producten voornamelijk ingedeeld aan de hand van de kosten van een product. Bij klasse A producten hoort ongeveer 20% van de producten, die in totaal voor ongeveer 80% van de kosten zorgen. Ongeveer 30% van de producten zijn klasse B producten en zorgen voor 15% van de kosten. Ten slotte zorgt ongeveer 50% van de producten voor slechts 5% van de totale kosten. Als er producten zijn die maar voor weinig kosten zorgen maar wel kritisch zijn, dan kan de organisatie alsnog ervoor kiezen om deze in te delen in klasse A.

Met deze indeling van producten is het duidelijk dat de meeste kosten kunnen worden bespaard bij klasse A producten. Elke klasse heeft verschillende eigenschappen en daarbij horen verschillende voorraadsystemen.

3.1.2 Continue of periodieke reviewmomenten

Om te bepalen of er te weinig van een product op voorraad ligt en of er al dan niet besteld moet worden, moet de hoogte van de voorraad bekeken worden. Dit kan continu of periodiek gebeuren. Bij een continu model wordt elke transactie bijgehouden en dus is op elk moment de exacte voorraadhoogte bekend. Dit kan digitaal, maar gebeurt op sommige afdelingen ook nog handmatig met behulp van voorraadkaartsystemen.

Bij een periodiek model wordt er elke R tijdseenheden naar de voorraadhoogte van de producten gekeken. Daarna wordt er besloten of er al dan niet besteld wordt en wat de grootte van deze bestelling dan is.

Op dit moment is het nog niet mogelijk om in het AMC de voorraad continu te gaan bekijken. Hoewel dit er in principe wel voor zou zorgen dat de veiligheidsvoorraad omlaag kan, wegen hier de kosten van het systeem op dit moment nog niet tegenop. In de rest van de literatuur wordt vanaf nu alleen gekeken naar modellen die gebruik maken van periodieke reviewmomenten.

3.1.3 Verschillende voorraadsystemen

Bij een periodieke reviewmomenten zijn er twee systemen die gebruikt worden. De eerste is het zogenaamde (R, S) -systeem en het tweede het (R, s, S) -systeem.

In een (R, S) -systeem wordt er elke R tijdseenheden naar de voorraadhoogte gekeken en deze wordt aangevuld tot het zogenaamde order-up-to-level S . Het verschil met het (R, s, S) -systeem is dat er daarbij enkel besteld wordt als de voorraad onder het reorderlevel s zit. Het voordeel van het eerste systeem is dat elke R tijdseenheden het order-up-to-level S aangepast kan worden, als de vraag verandert. Het nadeel in vergelijking met een continu systeem is dat de totale voorraadkosten veel hoger zijn, omdat er voor een langere periode genoeg voorraad moet liggen.

Bij een (R, s, S) -systeem zijn er veel minder kosten voor bevoorradingen, voorraad en tekorten dan bij andere systemen. Het grote nadeel is dat het heel lastig is en veel rekenkracht kost om de optimale waarden van de drie factoren R , s en S te berekenen.

Om de laatstgenoemde reden is het lastig om voor alle producten dit systeem te hanteren. Er is een simpel overzicht om voor de verschillende klassen een geschikt systeem te kiezen. Voor iedere productklasse is in tabel 3.1 weergegeven welk voorraadsysteem gebruikt kan worden.

Productklasse	Vorraadsysteem
Klasse A	(R, s, S)
Klasse B	(R, S)
Klasse C	(s, Q) of (R, S)

Tabel 3.1: Productklassen met bijbehorend voorraadsysteem.

Het (R, S) -systeem en het (R, s, S) -systeem zullen hieronder worden uitgelegd. Het (s, Q) -systeem is voor een continue review en daarom wordt hier niet naar gekeken. Omdat er op producten van klasse A meer bespaard kan worden, wordt hier een ingewikkelder systeem voor gebruikt. Voor de lagere klasse C volstaat een simpel systeem, omdat er minder geld zit in deze klasse.

(R, s, S) -systeem

Een (R, s, S) -model wordt beschreven in Silver, Pyke, and Peterson [5]. Bij het (R, s, S) -model wordt er iedere periode R gekeken naar de voorraadhoogte, op het moment dat deze lager is dan s wordt het niveau aangevuld tot S , zit het niveau tussen s en S dan gebeurt er niets.

Het bepalen van de waarden die horen bij een (R, s, S) -model is vrij ingewikkeld. In 1979 ontwikkelde Ehrhardt [2] als eerste de zogeheten 'Original Power Approximation' die in 1984 [3] herzien werd tot de 'Revised Power Approximation'.

De 'Revised Power Approximation' maakt gebruik van de parameters $Q = S - s$ en s . Deze worden, zoals de naam al zegt, benaderd met behulp van een aantal formules. Om een idee te geven hoe het algoritme werkt en waarom het niet gemakkelijk is optimale waarden te vinden met het algoritme, staat hieronder in een aantal stappen het algoritme uitgewerkt.

Stap 1 Bereken

$$Q_p = 1,30 \hat{x}_R^{0,494} \left(\frac{K}{vr} \right)^{0,506} \left(1 + \frac{\sigma_{R+L}^2}{\hat{x}_R^2} \right)^{0,116}$$

en

$$s_p = 0,973 \hat{x}_{R+L} + \sigma_{R+L} \left(\frac{0,183}{z} + 1,063 - 2,192z \right)$$

met behulp van

$$\begin{aligned} z &= \sqrt{\frac{Q_p r}{\sigma_{R+L} B_3}}; \\ \hat{x}_R &= DR; \\ \hat{x}_{R+L} &= D(R+L). \end{aligned}$$

Stap 2 If $Q_p / \hat{x}_R > 1,5$, definieer dan

$$\begin{aligned} s &= s_p; \\ S &= s_p + Q_p. \end{aligned}$$

Anders ga door naar stap 3.

Stap 3 Bereken

$$S_0 = \hat{x}_{R+L} + k\sigma_{R+L}$$

zodanig dat voor k geldt

$$p_{u \geq}(k) = \frac{r}{B_3 + r}.$$

Kies vervolgens

$$\begin{aligned} s &= \min\{s_p, S_0\}; \\ S &= \min\{s_p + Q_p, S_0\}. \end{aligned}$$

Over dit model zijn meerdere artikelen bekend die bijvoorbeeld het omzetten naar een computermodel beschrijven. Het bovenstaande algoritme geeft een benadering van dat soort computermodellen.

(R, S) -model

In Winston and Goldberg [6] wordt het (R, S) -model beschreven. Hierbij is de term on-order inventory level nodig. Met deze term wordt de totale voorraad bedoeld die bestaat uit de fysieke voorraad in het magazijn en de bestelde voorraad die nog 'onderweg' is. Als er dus 40 eenheden op voorraad liggen in het magazijn en 30 eenheden besteld zijn, is het on-order inventory level gelijk aan 70.

Een (R, S) -model werkt als volgt. Na iedere tijdsperiode met lengte R wordt de voorraadhoogte bekeken en deze aangevuld tot en met hoogte S . Het werken met dit model neemt hogere kosten met zich mee ten opzichte van een soortgelijk, maar continu, (r, q) -model, maar een (R, S) -model is makkelijker te implementeren dan het continue (r, q) -model.

Voor het beschrijven van het model en het bepalen van de hoogte van S bij een bepaalde R -waarde, zijn de volgende variabelen nodig:

- S = order-up-to-level;
- R = aantal tijdseenheden tussen reviewmomenten;
- D = vraag (willekeurig) gedurende een tijdsperiode;
- K = vaste bestelkosten;
- J = reviewkosten om de voorraadhoogte te bepalen;
- h = kosten om één item gedurende een tijdsperiode op voorraad te hebben;
- c_B = kosten van een item dat wordt nabesteld (backlogged);
- c_{LS} = kosten van het kwijtraken van een order;
- L = levertijd van een order;
- D_{L+R} = willekeurige vraag gedurende een tijdsperiode met lengte $L + R$;
- $\sigma_{D_{L+R}}$ = standaarddeviatie van D_{L+R} ;
- $I(t)$ = netto voorraadhoogte op tijdstip t ;
- $OHI(t)$ = on-hand inventory level op tijdstip t .

Voor een gegeven waarde van R kan nu de waarde van S bepaald worden met als criterium het minimaliseren van de verwachte kosten in een bepaald tijdsbestek. De totale verwachte kosten bestaan uit productkosten, reviewkosten, bestelkosten, voorraadkosten en tekortkosten.

Per jaar worden er $\frac{1}{R}$ reviews gedaan. Dit betekent dat de reviewkosten gelijk zijn aan $\frac{J}{R}$. Na het plaatsen van een order zal het 'on-order inventory level' altijd gelijk zijn aan S . Omdat de vraag D_{L+R} een continue random variabele is, en deze per definitie nooit gelijk aan nul is, zullen er altijd producten besteld worden. Dit betekent dat de jaarlijkse bestelkosten gegeven worden door $\frac{K}{R}$. De jaarlijkse bestel- en reviewkosten zijn onafhankelijk van de hoogte van S , wat betekent dat S alleen nog afhangt van de jaarlijkse voorraad- en tekortkosten.

Om nu de voorraadkosten te bepalen die optreden, wordt een periode gedefinieerd die gelijk is aan de lengte tussen twee levermomenten van producten. Als hier de verwachte voorraadhoogte over bepaald kan worden, zijn de verwachte kosten gemakkelijk uit te rekenen door die hoogte te vermenigvuldigen met h . Bij de aanname dat het aantal backorders ten opzichte van het 'on-hand inventory level' relatief klein is, kan gezegd worden dat

$$E(I(t)) \cong E(OHI(t)).$$

Hierin is $I(t)$ de netto voorraadhoogte en $OHI(t)$ het on-hand inventory level op tijdstip t , met $I(t) = OHI(t) - B(t)$. De verwachte waarde van $I(t)$ gedurende één periode kan benaderd worden door het gemiddelde te nemen van de verwachte waarde van $I(t)$ net voor een orde geleverd wordt en de verwachte waarde van $I(t)$ net nadat een orde geleverd wordt. Net voor een orde geleverd wordt, kan gezegd worden dat de maximale voorraadhoogte S verminderd is met een gemiddeld aantal producten gelijk aan $E(D_{L+R})$. Voor de verwachte voorraad net voordat een orde geleverd wordt, aangeduid met behulp van $I(t)^-$, kan worden gezegd

$$E(I(t)^-) = S - E(D_{L+R}).$$

Per jaar worden er $\frac{1}{R}$ orders geplaatst waarbij gemiddeld $E(D)$ eenheden worden besteld. Dit betekent dat de gemiddelde ordergrootte gelijk is aan $E(D)R$. Voor de verwachte waarde van $I(t)$ net nadat een orde geleverd is, geldt nu

$$E(I(t)^+) = S - E(D_{L+R}) + E(D)R.$$

Door het gemiddelde van deze twee waarden te nemen en te vermenigvuldigen met de voorraadkosten h , geldt dat de gemiddelde jaarlijkse voorraadkosten gelijk zijn aan

$$h \left[S - E(D_{L+R}) + \frac{E(D)R}{2} \right].$$

Uit bovenstaande uitdrukking volgt dat bij een verhoging Δ van S de verwachte voorraadkosten stijgen met $h\Delta$. Er wordt nu gekeken wat de invloed is op de verwachte tekortkosten als S wordt verhoogd naar $S + \Delta$. Neem aan dat bij iedere bestelling de tekortkosten die optreden gelijk zijn aan de kosten van de tekorten in de periode na de levering tot aan de volgende levering. Voor een bestelling op tijdstip 0 komen de tekortkosten dus uit de periode $[0, R + L]$. Er treedt in die periode een tekort op als de vraag in die periode groter is dan het 'order-up-to-level' S . Het tekort dat dan optreedt is gelijk aan $D_{L+R} - S$. Met behulp van marginaalanalyse kan de waarde voor S bepaald worden bij een gegeven waarde voor R . Bij een verhoging van S naar $S + \Delta$, stijgen de voorraadkosten met $h\Delta$. Tegelijkertijd verlagen dan de tekortkosten indien $D_{L+R} \geq S$. Met de fractie $P(D_{L+R} \geq S)$ van alle orders, een verhoging van Δ brengt een besparing van $c_B \Delta$ aan tekortkosten met zich mee. Omdat er $\frac{1}{R}$ bestellingen per jaar worden gedaan, zorgt de verhoging Δ ervoor dat de verwachte jaarlijkse tekortkosten dalen met $\frac{1}{R} c_B \Delta P(D_{L+R} \geq S)$. De waarde van S die ervoor zorgt dat de gevraagde kosten geminimaliseerd worden, voldoet aan de vergelijking

$$h\Delta = \frac{1}{R} c_B \Delta P(D_{L+R} \geq S).$$

Omschrijven hiervan geeft

$$P(D_{L+R} \geq S) = \frac{Rh}{c_B}.$$

Indien er niet gebruik wordt gemaakt van backlogging, maar een tekort een verkoopverlies inhoudt, geldt de formule

$$P(D_{L+R} \geq S) = \frac{Rh}{Rh + c_{LS}},$$

met c_{LS} de kosten van een verloren verkoop.

Bepaling van R

Vaak wordt er de lengte van een interval R gelijkgesteld aan $\frac{EOQ}{E(D)}$. Dit is ook het geval bij het gebruik van een simpel EOQ-model. Omdat in het geval een (R, S) -model bij iedere order een review komt kijken, zijn de kosten per order gelijk aan $(K + J)$, voor de EOQ geldt nu

$$EOQ = \sqrt{\frac{2(K + J)E(D)}{h}}.$$

3.1.4 Restricties van een voorraadstelsel

De vraag naar producten die hier bekeken wordt, is stochastisch. De kans op tekorten is aanwezig en dat houdt in dat er in sommige gevallen niet geleverd kan worden. Bij een zogenaamde stockout wordt er een spoedbestelling geplaatst. Als dit geen mogelijkheid is, kan ook een ander soortgelijk, waarschijnlijk duurder, product geleverd worden. Om dit soort toestanden zo veel mogelijk te voorkomen, wordt er gewerkt met safety stocks (SS), ook wel veiligheidsvoorraden genoemd. Deze zijn op verschillende manieren te bepalen en die staan hieronder.

1. De simpele aanpak

Deze manieren van aanpak zijn makkelijk te implementeren en worden daarom ook bij veel organisaties gebruikt. Het grote nadeel hiervan is dat door de variantie van de vraag de kans op een stockout aanwezig is, maar ook dat er te veel op voorraad ligt en daarom de voorraadkosten te hoog zijn.

(a) Op basis van verbruik per tijdseenheid

Bij deze aanpak wordt er een veiligheidsvoorraad gehanteerd die genoeg is voor een aantal keer het verbruik per tijdseenheid en dat voor een groep (of alle) producenten. Het nadeel van deze aanpak is dat er geen rekening wordt gehouden met de onzekerheid van de voorspellingen van elk product. Bij een hoge vraag in een periode is de kans op een stockout groot.

(b) **Op basis van veiligheidsfactor**

Om wel rekening te houden met de variantie in de vraag wordt de veiligheidsvoorraad ook wel als volgt bepaald:

$$SS = f\sigma_L.$$

Hierbij is f de veiligheidsfactor en σ_L de standaardafwijking van de voorspelde totale vraag gedurende de levertijd L . Deze veiligheidsfactor wordt bij een brede groep producten gebruikt.

2. **Verschillende stockoutkosten**

Hierna zijn verschillende manieren beschreven als het gaat om het rekenen met stockoutkosten, ook wel boetekosten genoemd.

(a) **B_1 : Vaste kosten per stockout**

Er is een vaste bedrag B_1 aan kosten, onafhankelijk van de duur en de grootte van de stockout. Een bedrijf die harder gaat werken om een stockout te voorkomen krijgt deze vaste kosten.

(b) **B_2 : Vast percentage van de productkosten per product tekort**

In dit geval zijn de boetekosten gelijk aan een percentage B_2 van de kosten van een product. Door in overuren deze producten te gaan produceren, worden boetekosten verminderd. Kosten van de vorm bij B_1 zijn niet op te lossen met overuren, omdat de kosten al gemaakt zijn.

(c) **B_3 : Vast percentage van de productkosten per product per tijdseenheid tekort**

Een vast percentage B_3 van de prijs van een product per tijdseenheid wordt hier als tekortkosten gezien. Als n het aantal dagen is, dan worden de stockoutkosten p_p van een product p gelijk aan $B_3 C_p n$.

(d) **B_4 : Vaste kosten per product tekort**

Het verschil met B_2 is dat er nu geen percentage van de kosten van het product worden berekend, maar een vaste boete per product.

3. **Servicelevel**

Hieronder staat een opsomming van de meest voorkomende servicelevels. Servicelevels geven aan wat het minimale 'niveau' moet zijn van de service.

(a) **α_1 : Het aantal cycli dat er geen stockout is**

Dit is de kans α_1 en is ook de kans dat er geen stockout is tussen twee bevoorradingen. Als dezelfde kans wordt gebruikt voor een groep producten dat wordt deze ook wel als gemeenschappelijk veiligheidsfactor f gebruikt. Dit servicelevel wordt ook wel de cykel service level genoemd.

(b) **α_2 : Het percentage van de vraag dat direct uit voorraad leverbaar is**

Dit percentage α_2 van de totale hoeveelheid producten moet direct geleverd worden en er is dus geen backorder nodig. Dit wordt ook wel fill rate genoemd.

(c) **α_3 : Het percentage van de tijd dat er wel producten op voorraad liggen**

Deze is ook wel bekend onder de naam 'ready rate' en is bij een Poisson verdeelde vraag gelijk aan α_2 .

Met behulp van bovenstaande vragen kan de meest geschikte voorraadstrategie gekozen worden.

3.2 Theorie Markovketens

Voor het analyseren van de voorraadhoogtes wordt gebruik gemaakt van Markovketens. De theorie is voornamelijk gehaald uit Ross [4].

Een Markovketen beschrijft een wiskundig systeem dat een aantal (mogelijk oneindig veel) toestanden bevat waartussen deze Markovketen zich beweegt. Op ieder tijdstip bevindt de Markovketen zich in één van zijn toestanden. Het specifieke kenmerk van een Markovketen is het feit dat "gegeven het heden,

de toekomst onafhankelijk is van het verleden". Het maakt dus niet uit hoe je ergens terecht bent gekomen, de toekomst hangt alleen af van het moment waar je nu bent. Hiervan wordt later een voorbeeld gegeven.

Met zogenoemde overgangskansen, de kans om van de ene toestand naar de andere toestand te gaan, wordt dan de kans of fractie van de tijd om in een bepaalde toestand te zijn uitgerekend. In een overgangsmatrix P worden al deze kansen voor alle toestanden beschreven. Met n toestanden ziet deze er als volgt uit, waarbij $p_{i,j}$ de kans is om van toestand i naar j te gaan:

$$P = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & & p_{2,n} \\ \vdots & & \ddots & \\ p_{n,1} & p_{n,2} & & p_{n,n} \end{bmatrix}.$$

Hieruit volgen dan de evenwichtsvergelijkingen $\pi = \pi P$ met de extra voorwaarde $\sum \pi = 1$. Dit ziet er als volgt uit:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= p_{1,1}\pi_1 + p_{2,1}\pi_2 + \cdots + p_{n,1}\pi_n; \\ \pi_2 &= p_{1,2}\pi_1 + p_{2,2}\pi_2 + \cdots + p_{n,2}\pi_n; \\ &\vdots \\ \pi_n &= p_{1,n}\pi_1 + p_{2,n}\pi_2 + \cdots + p_{n,n}\pi_n; \\ \pi_1 + \pi_2 + \cdots + \pi_n &= 1. \end{aligned}$$

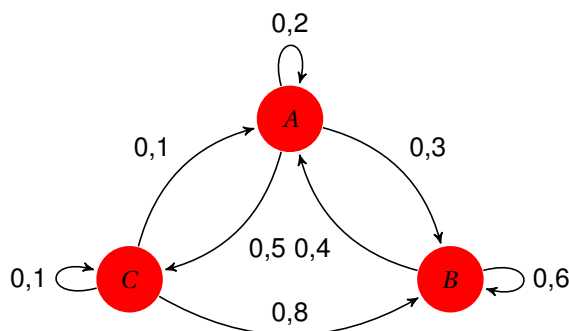
Door dit stelsel van vergelijkingen op te lossen, worden de evenwichtskansen π_i berekend. Later in dit verslag worden op een recursieve manier de evenwichtskansen bepaald.

Voorbeeld Markovketen

Zoals eerder genoemd kijken we naar een ambulance die zich in drie toestanden kan bevinden:

- A: aanwezig bij een ongeluk;
- B: wachten in de garage;
- C: aanwezig op de eerste hulp.

In figuur 3.1 zijn de kansen om van de ene positie (toestand) naar de andere te gaan, te zien. Hierbij moet opgemerkt worden dat er elk kwartier naar de toestand van de ambulance wordt gekeken.



Figuur 3.1: Een Markovketen met drie toestanden.

Voor dit markovstelsel zijn de overgangskansen in de volgende matrix weergegeven:

$$\begin{bmatrix} 0,2 & 0,3 & 0,5 \\ 0,4 & 0,6 & 0 \\ 0,1 & 0,8 & 0,1 \end{bmatrix}.$$

De waarde 0,3 in de matrix geeft de kans weer om van toestand A naar toestand B te gaan, de rest van de matrix is op een soortgelijke manier ingedeeld.

Met behulp van zogeheten evenwichtsvergelijkingen kunnen de fracties van de tijd berekend worden waarin de Markovketen zich in iedere toestand bevindt. Deze vergelijkingen zijn:

$$\begin{aligned}\pi_A &= 0,2\pi_A + 0,4\pi_B + 0,1\pi_C; \\ \pi_B &= 0,3\pi_A + 0,6\pi_B + 0,8\pi_C; \\ \pi_C &= 0,5\pi_A + 0,1\pi_C; \\ \pi_A + \pi_B + \pi_C &= 1.\end{aligned}$$

De π 's geven de percentages weer van de tijd. Dus $\pi_A = 0,5$ zou betekenen dat bij benadering de helft van de tijd de Markovketen zich in toestand A bevindt. In dit voorbeeld geldt $\pi_A = \frac{36}{123} = 29,27\%$, $\pi_B = \frac{67}{123} = 54,47\%$ en $\pi_C = \frac{20}{123} = 16,26\%$.

De ambulance heeft dus 29,27% kans om bij een ongeluk te zijn en zal daar ook in 29,27% van de tijd zijn. Net zo geldt dat in 54,47% van de gevallen de ambulance in de garage staat en de resterende 16,26% bij de eerste hulp.

HOOFDSTUK 4

MODEL VOOR ÉÉN PRODUCT OP ÉÉN KAMER

In dit hoofdstuk zal het model voor het voorraadbeheer in de voorraadkamers in het AMC worden opgesteld. Allereerst worden hiervoor de aannames die zijn gedaan beschreven. Daarna zal vanuit een situatieschets een Markovketen worden opgesteld. Van deze Markovketen worden de evenwichtstoestanden bepaald en de bijbehorende kosten berekend. Het hoofdstuk sluit met een kort overzicht van het model.

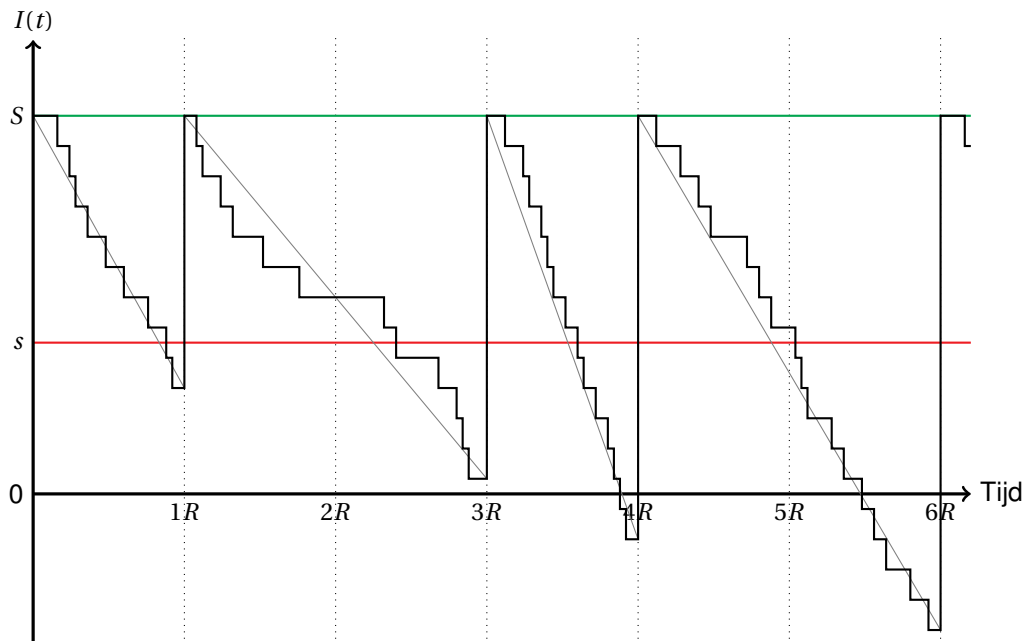
4.1 Aannames

Bij het opstellen van het model is een aantal aannames gemaakt. Deze zijn als volgt:

- het vraagproces naar elk van de producten volgt een Poissonverdeling;
- er wordt gebruik gemaakt van een (R, s, S) -model, dit is een periodiek model waarin R de lengte is van de reviewperiode, s het reorderlevel en S het order-up-to-level. De waarden s en S zijn per product per kamer verschillend en de waarde R kan per kamer verschillend zijn;
- er wordt vanuit gegaan dat de reviewperiodes elke keer gelijk zijn. Indien er drie keer per week gereviewd wordt, duurt de periode 1/3 week, ook al wordt er op maandag, woensdag en vrijdag gereviewd;
- er wordt aangevuld indien het voorraadniveau op een reviewmoment kleiner of gelijk aan s is;
- in het model zijn tekorten toegestaan. Indien een tekort optreedt, dit houdt in dat de virtuele voorraad negatief wordt, vindt er een spoedbestelling plaats. Deze spoedbestelling heeft grootte s ;
- de reviewkosten per reviewperiode zijn vast en hangen dus niet af van het aantal producten dat gereviewd wordt;
- de bestelkosten wordt alleen gerekend voor producten die besteld moeten worden. De vaste kosten voor het bestellen worden opgenomen in de reviewkosten;
- de vraag naar eenzelfde soort product op verschillende voorraadkamer is onafhankelijk;
- de vraag naar verschillende producten op dezelfde voorraadkamer is onafhankelijk;
- ieder product dat nodig is op een voorraadkamer komt rechtstreeks uit het magazijn, lateral shipments zijn niet toegestaan;
- het magazijn kan altijd aan de vraag van de voorraadkamers voldoen;
- de levertijd van een spoedbestelling is nul.

4.2 Situatieschets

In figuur 4.1 is een mogelijk verloop van de voorraadhoogte van één product te zien over meerdere reviewperiodes. Een negatieve voorraad betekent hier dat er wel vraag naar het product is, maar dat deze niet direct uit de (oorspronkelijke) voorraad geleverd wordt. Door middel van spoedbestellingen kan er wel aan de vraag worden voldaan. De voorraad na deze spoedbestellingen is in dit figuur niet meegenomen. Hier wordt later nog verder op ingegaan.



Figuur 4.1: Mogelijk verloop van de voorraad van een willekeurig product (zonder spoedbestellingen).

Op ieder reviewmoment, in dit geval een veelvoud van R , kan de virtuele voorraadhoogte I zich in een bepaalde toestand bevinden. Deze drie toestanden zijn als volgt:

1. $s < I \leq S$: het is niet nodig om een bestelling te plaatsen, in de figuur is dit het geval voor de tijdstippen $2R$ en $5R$;
2. $0 \leq I \leq s$: er wordt een bestelling geplaatst zodat het voorraadniveau aangevuld wordt tot niveau S , dit gebeurt op tijdstippen $1R$ en $3R$;
3. $I < 0$: net zoals in de vorige toestand zal er nu een bestelling worden geplaatst en de voorraad zal worden bijgevuld tot niveau S . Echter is er een tekort opgetreden omdat het product op een bepaald moment niet meer op voorraad lag. Dit heeft als gevolg dat er een spoedbestelling is geplaatst. Deze spoedbestelling brengt extra kosten met zich mee, omdat er speciaal voor een product een kleine hoeveelheid op voorraad wordt gebracht.

Als eerste wordt er gekeken naar vaste waarden voor R om vanuit daar waarden voor s en S te bepalen.

4.3 Markovmodel

Het model voor het voorraadbeheer van verbruiksgoederen is opgesteld met de kennis van Markovtheorie (zie ook hoofdstuk 3.2). Deze modellering kan op drie manieren worden weergegeven met Markovketens. Uiteindelijk zal het voorraadbeheer met twee van de drie Markovketens worden gemodelleerd. De toestanden voor deze Markovketens zijn gebaseerd op de voorraadhoogtes, maar hebben alle drie een andere toestandsruimte.

4.3.1 Markovketens

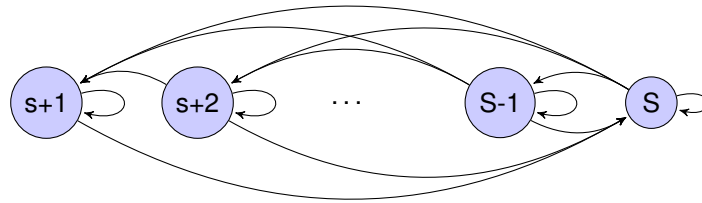
De drie Markovketens worden aangegeven met M_1 , M_2 en M_3 en zijn hieronder omschreven.

Markovketen M_1 : Voorraadhoogte na het aanvullen direct aan het begin van een reviewperiode

Deze Markovketen heeft als toestanden alle mogelijke beginvoorraden van een reviewperiode, vlak na het reviewmoment en dus inclusief eventuele bestellingen. Voor de toestandruimte geldt:

$$U_1 = \{s+1, s+2, \dots, S\}.$$

Deze Markovketen is in figuur 4.2 weergegeven. Het is vanuit alle toestanden $s+i$ mogelijk om in dezelfde toestand $s+i$ te blijven, naar een lagere toestand $s+j$, $j < i$ te gaan of in S te komen. In het laatste geval geldt dat de voorraadhoogte vlak voor het reviewmoment onder het reorderlevel zit.



Figuur 4.2: Markovketen M_1 .

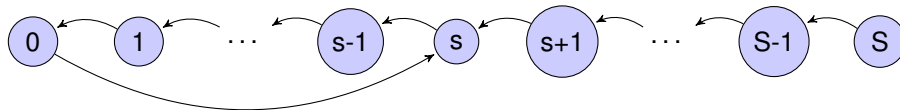
Deze Markovketen wordt gebruikt om de evenwichtstoestanden van de voorraadhoogtes te bepalen.

Markovketen M_2 : Voorraadhoogte inclusief spoedbestellingen gedurende een reviewperiode

Deze heeft als toestanden de voorraadhoogte in een reviewperiode inclusief spoedbestellingen. Voor de toestandruimte geldt:

$$U_2 = \{0, 1, \dots, s-1, s, s+1, \dots, S\}.$$

De voorraadhoogte aan het begin van een reviewperiode is één van de toestanden $\{s+1, s+2, \dots, S\}$ en de Markovketen zal hier dan ook beginnen. De overgangen in deze Markovketen zijn weergegeven in figuur 4.3. Het gaat hier om een continu Markovproces, omdat de overgang van toestand i naar $i-1$ elk moment plaats kan vinden. De overgangen boven de toestanden geven de Poissonkansen voor de vraag naar één eenheid product. Zodra de voorraadhoogte van dit product op 0 uitkomt, vindt er een spoedbestelling plaats ter grootte s , de pijl aan de onderkant van de Markovketen. Deze Markovketen geeft alleen de overgangen binnen een reviewperiode aan en daarom zijn er geen overgangen naar S .



Figuur 4.3: Markovketen M_2 .

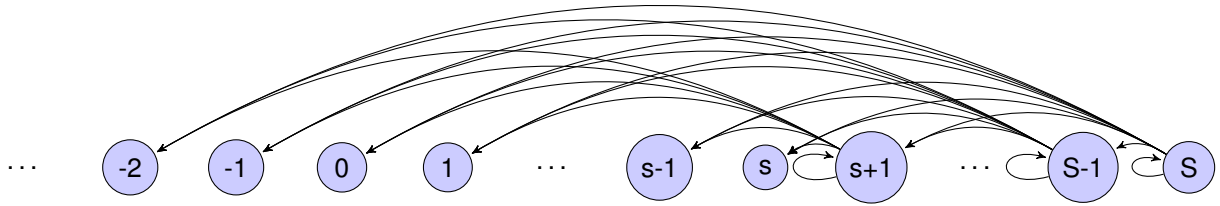
In het model zijn spoedbestellingen toegestaan, waardoor er ook een virtuele voorraadhoogte bekeken wordt. Markovketen M_2 wordt daarom niet gebruikt in het model, hiervoor wordt gekeken naar Markovketen M_3 .

Markovketen M_3 : Virtuele voorraadhoogte gedurende een reviewperiode

Markovketen M_3 heeft als toestanden de virtuele voorraadhoogte vanaf het begin van periode tot vlak voor het eind van de reviewperiode zoals in figuur 4.4. Hierbij worden spoedbestellingen niet meegenomen in de voorraadhoogte. Voor de toestandsruimte geldt:

$$U_3 = \{\dots, -1, 0, 1, \dots, s-1, s, s+1, \dots, S\}.$$

De overgangen in deze Markovketen geven de kans aan om van een begintoestand $a \in U_1$ naar een eindtoestand $b' \in U_3$ te gaan.



Figuur 4.4: Markovketen M_3 .

Deze Markovketen zal de basis zijn voor het model van waaruit de kosten worden gemodelleerd.

4.3.2 Overgangsmatrix

Voor het berekenen van de evenwichtskansen, de kans om in een toestand te beginnen, zijn de overgangskansen uit M_1 nodig. Deze overgangskansen geven voor alle mogelijke toestanden $U_1 = \{s+1, s+2, \dots, S\}$ de kans om naar de andere toestanden te springen.

Zoals eerder gezegd, wordt er aangenomen dat het vraagproces naar producten een Poissonverdeling volgt. De overgangsmatrix P is als volgt:

$$P = \begin{pmatrix} \beta_0 & 0 & \dots & & & p_0 \\ \beta_1 & \beta_0 & 0 & \dots & & p_1 \\ \beta_2 & \beta_1 & \beta_0 & 0 & \dots & p_2 \\ \beta_3 & \beta_2 & \beta_1 & \beta_0 & 0 & \dots & p_3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \beta_{S-s-2} & \beta_{S-s-3} & \dots & \dots & \dots & \beta_0 & p_{S-s-2} \\ \beta_{S-s-1} & \beta_{S-s-2} & \dots & \dots & \dots & \beta_1 & p_{S-s-1} \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

met

$$\beta_i = \text{Poisson}(i) = \frac{\lambda^i}{i!} e^{-\lambda};$$

$$p_i = \begin{cases} 1 - \sum_{j=0}^i \beta_j & (i = 0, \dots, S-s-2) \\ 1 - \sum_{j=1}^i \beta_j & (i = S-s-1) \end{cases}.$$

4.3.3 Evenwichtskansen

Voor het berekenen van de evenwichtsverdeling van Markovketen M_1 zijn de toestandsvergelijkingen nodig. Met P zoals in 4.1 en π alle toestanden uit U_1 zijn de evenwichtsvergelijkingen als volgt:

$$\begin{aligned} \pi &= \pi P; \\ \sum \pi &= 1. \end{aligned}$$

Hieruit volgen de volgende vergelijkingen:

$$\begin{aligned}
\pi_n &= \sum_{i=n}^S \beta_{i-n} \pi_i \quad (n = s+1, \dots, S-1) \\
&= \sum_{i=0}^{S-n} \beta_i \pi_{n+i}; \\
\pi_S &= \pi_{s+1} p_0 + \pi_{s+2} p_1 + \dots \\
&= \sum_{i=s+1}^S \pi_i p_{i-s-1} \\
&= \sum_{i=0}^{S-s-1} \pi_{i+s+1} p_i.
\end{aligned}$$

Met behulp van onderstaande recursie zijn alle waarden π_i uit te drukken in π_S . Hieruit volgt dan met $\sum \pi = 1$ een uitdrukking waaruit de waarde voor π_S te bepalen is en vervolgens de waarde voor de andere toestanden π_i .

Voor de recursie geldt het volgende:

$$\gamma_{S-j} = \sum_{i=1}^j \gamma_{S-j+i} \beta_i \quad (j = 1, 2, \dots, S-s-1),$$

met

$$\gamma_S = 1.$$

Hieruit is af te leiden dat

$$\pi_S = \left(\sum_{j=0}^{S-s-1} \gamma_{S-j} \right)^{-1}.$$

De factor γ_i wordt met behulp van een recursieve formulie bepaald. De volledige uitwerking hiervan is terug te vinden in de bijlage. Uit het algoritme volgt dat geldt:

$$\begin{aligned}
\pi_{S-j} &= \frac{\sum_{i=1}^j \beta_i \gamma_{S-j+i}}{1 - \beta_0} \pi_S \\
&= \gamma_{S-j} \pi_S
\end{aligned}$$

met

$$\gamma_{S-j} := \frac{\sum_{i=1}^j \beta_i \gamma_{S-j+1}}{1 - \beta_0}.$$

4.4 Verwachte kosten in een vast reviewinterval

Voor iedere toestand is nu bekend hoe groot de kans is dat de Markovketen zich aan het begin van een reviewperiode daarin bevindt. Met de volgende formule worden de verwachte totale kosten $E(T)$ per reviewperiode berekend:

$$E(T) = \sum_{a=s+1}^S \left(\pi_a \sum_{b=s+1}^S p_{a,b} T_{a,b} \right).$$

Hierbij geldt dat a een van de mogelijke begintoestanden bij het begin van een reviewperiode is en b alle toestanden die vanuit a bereikt kunnen worden. De waarde π_a geeft de kans om in toestand a te beginnen, $p_{a,b}$ is de kans om vanuit a naar b te gaan en $T_{a,b}$ zijn de daarbijhorende kosten. De begintoestand is de hoogte van de beginvoorraad van een periode.

Om het rekenen makkelijker te maken, wordt er gekeken naar de toestand b' . Dit is de toestand aan het eind van een reviewperiode, zonder (spoed)bestellingen en kan dus ook een negatieve waarde hebben.

Als $b' > s$, dan geldt $b' = b$, er is dan geen (spoed)bestelling geweest in de reviewperiode. Indien $b' \leq s$ moet er aan het einde van de reviewperiode bijbesteld worden en geldt eigenlijk $b' = b$. Zo kan de som voor alle kosten waarbij $b' \leq s$ samen worden genomen, om zo van toestand a naar b te gaan, waarbij $a \in \{s+1, \dots, S-1, S\}$ en $b \in \{s+1, \dots, a-1, a, S\}$.

De formule voor de totale verwachte kosten wordt dan eigenlijk

$$E(T) = \sum_{a=s+1}^S \left(\pi_a \sum_{b'=-\infty}^a \beta_{a-b'} T_{a,b'} \right).$$

De factor $T_{a,b'}$ wordt hieronder gespecificeerd en bestaat uit:

1. productkosten;
2. bestelkosten;
3. reviewkosten;
4. tekortkosten;
5. voorraadkosten.

De totale kosten als een product van toestand a naar b' gaat, is de som van bovenstaande kosten:

$$T_{a,b'} = D_{a,b'} p + G_{b'} K + J + F_{b'} Z_{b'} B + I_{a,b'} h.$$

Hieronder volgt per kostensoort een toelichting waarbij ook de gebruikte symbolen worden gegeven.

4.4.1 Productkosten

Als de voorraadhoogte van een product van a naar b gaat in een reviewperiode, dan zijn er $a - b$ producten verbruikt en dan is dat ook de vraag $D_{a,b}$ van die periode. De kosten voor één product worden aangeduid met p , dus de productkosten zijn als volgt:

$$\text{productkosten} = D_{a,b} p = (a - b) p.$$

De productkosten hebben geen invloed op het optimalisatieprobleem maar zijn voor de volledigheid toch meegenomen in het model.

4.4.2 Bestelkosten

Per product dat besteld wordt, komen bovenop de reviewkosten nog aparte bestelkosten. Deze bestelkosten worden gemaakt voor ieder product en ontstaan doordat een medewerker het product vanuit het magazijn via de voorraadkar uiteindelijk in de voorraadkamer legt. Deze bestelkosten per soort product worden aangegeven met K .

Voor een enkel product geldt dat er op een reviewmoment besteld is als $b = S$. Het voorraadiniveau aan het eind van een reviewperiode zonder (spoed)bestellingen wordt weergegeven met b' . Als geldt dat $b' \leq s$, dan komt dit overeen met $b = S$ en dan zijn er bestelkosten. In formulevorm is dit als volgt:

$$\text{bestelkosten} = G_b K = \begin{cases} 0 & b' > s \\ K & b' \leq s \end{cases}.$$

De factor $G_b \in \{0, 1\}$ zorgt dat er geen bestelkosten zijn als $b' > s$ en wel bestelkosten K als $b' \leq s$.

4.4.3 Reviewkosten

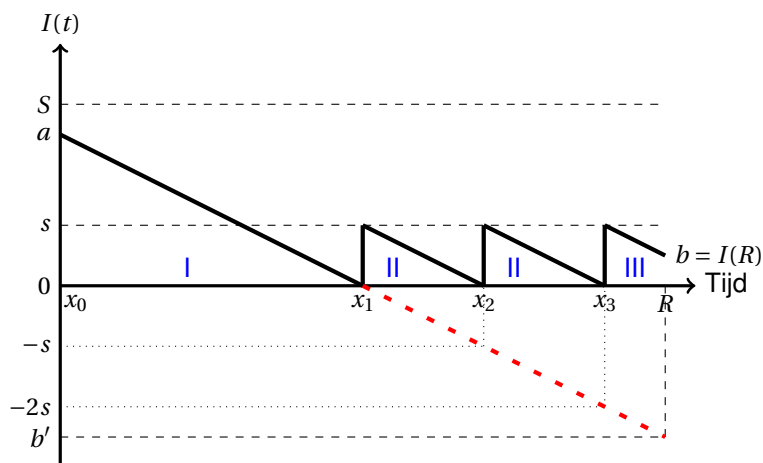
De kosten van het reviewen hangen niet af van de bestelling zelf. Ook wordt er vanuit gegaan dat het huidige voorraadiniveau geen invloed heeft op de hoogte van de reviewkosten. De reviewkosten worden één keer per periode gemaakt en worden weergegeven met J . De reviewkosten per periode zijn dan als volgt:

$$\text{reviewkosten} = J.$$

4.4.4 Tekortkosten

Tekortkosten ontstaan als de voorraad op is, maar er wel vraag naar een product is. Er wordt aangenomen dat er een hoeveelheid s wordt bijbesteld zodra de voorraad op 0 komt en dat de levertijd van deze spoedbestelling 0 is. Het voorraadniveau is daarna weer aangevuld tot s en het vraagpatroon van het product blijft gelijk aan dat ervoor, totdat er weer een reviewmoment is. Voor iedere spoedbestelling die daarna nog nodig is, komen er per extra spoedbestelling weer dezelfde tekortkosten bij.

In figuur 4.5 is een mogelijk patroon van de verwachte vraag over een periode van lengte R te zien waarbij tekorten ontstaan. Gedurende de periode $[x_0, x_1]$ is het product nog uit voorraad leverbaar. Op tijdstip x_1 is het voorraadniveau tot 0 gedaald en vindt er een spoedbestelling van grootte s plaats. Gedurende de periode $[x_1, x_2]$ is er weer een voorraad aanwezig totdat er op tijdstip x_2 weer moet worden bijbesteld. Dit herhaalt zich tot het volgende reviewmoment na een periode van lengte R . Omdat bij een spoedbestelling een hoeveelheid s wordt bijbesteld, wordt er op een reviewmoment altijd bijbesteld tot S als er spoedbestellingen zijn geweest. Als er in een reviewperiode geen spoedbestelling is geweest en het voorraadniveau $I(R)$ groter is dan s , dan zal de beginvoorraad van de nieuwe reviewperiode gelijk zijn aan de eindvoorraad van de huidige periode.



Figuur 4.5: Voorraadniveau $I(t)$ bij spoedbestellingen.

Om onderscheid te maken tussen een voorraadhoogte $I(R)$ waarbij er wel en geen spoedbestellingen zijn geweest, wordt er een voorraadniveau bijgehouden, dat geen rekening houdt met spoedbestellingen. Deze doorgetrokken rode gestreepte lijn geeft dit voorraadniveau b' aan. Als op een reviewmoment R het voorraadniveau gelijk is aan b' , dan kan hieruit worden opgemaakt hoeveel spoedbestellingen er zijn geweest. Voor het aantal spoedbestellingen $Z_{b'}$ geldt dan:

$$Z_{b'} = \begin{cases} 0 & 0 \leq b' \\ \left\lceil \frac{|b'|}{s} \right\rceil & b' < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Om aan te geven of er al dan niet spoedbestellingen zijn geplaatst over de afgelopen reviewperiode, wordt de factor $F_{b'}$ gebruikt:

$$F_{b'} = \begin{cases} 0 & 0 \leq b' \\ 1 & b' < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Als een spoedbestelling B kosten met zich meebrengt en er zijn $E(Z)$ spoedbestellingen, dan zijn de totale verwachte tekortkosten per periode als volgt:

$$\text{tekortkosten} = F_{b'} Z_{b'} B.$$

4.4.5 Voorraadkosten

Voor het berekenen van de voorraadkosten wordt er van figuur 4.5 uitgegaan. Hierbij is er sprake van spoedbestellingen. Als er in een periode een spoedbestelling plaatsvindt, dan schommelt het voorraadniveau in een voorraadkamer daarna tussen 0 en s , zoals ook in figuur 4.5. De voorraadkosten van zo'n product zijn te bepalen door de oppervlakte onder de grafiek te vermenigvuldigen met de voorraadkosten h . Het oppervlakte onder de grafiek representeert het aantal producten dat op voorraad ligt. De voorraadhoogte aan het begin van een periode R wordt aangeduid met een waarde $a \in \{s+1, \dots, S-1, S\}$ en de voorraadhoogte (waarbij (spoed)bestellingen niet worden meegenomen) aan het einde van een periode met waarde $b' \leq a$.

Voor de voorraadkosten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\begin{aligned} I_{a,b'} &= \text{Gebied I} + \text{Gebied II} + \text{Gebied III} \\ &= \frac{a^2 R}{2(a-b')} + F_{b'}(Z_{b'}-1) \frac{s^2 R}{2(a-b')} + xy + \frac{(s-x)y}{2} \\ &= \frac{R}{2(a-b')} (a^2 + F_{b'}(Z_{b'}-1)s^2) + \frac{(s+x)y}{2}, \end{aligned}$$

met

$$x = Z_{b'} s - |b'|; \quad (4.4)$$

$$y = \frac{R(s-x)}{a-b'}. \quad (4.5)$$

Er zal nu worden uitgelegd hoe deze formule is opgebouwd. De grafiek in figuur 4.5 is grofweg op te delen in drie stukken. Deze zijn aangeven met I, II en III in figuur 4.5

Gebied I: $[x_0, x_1]$

Dit zijn de producten die uit voorraad geleverd kunnen worden. De grafiek wordt beschreven met de volgende functie:

$$I(t) = a - \frac{a-b'}{R} t,$$

waarin $I(t)$ de voorraadhoogte is die vanuit deze functie continu wordt bekeken.

Het punt x_1 in de grafiek is het tijdstip t waarop geldt dat $I(t) = 0$, de voorraad is dan in principe volledig gebruikt. De waarde voor x_1 wordt als volgt bepaald:

$$\begin{aligned} I(t) &= a - \frac{a-b'}{R} t = 0; \\ a &= \frac{a-b'}{R} t; \\ t &= \frac{aR}{a-b'}. \end{aligned}$$

Hieruit volgt dat $x_1 = \frac{aR}{a-b'}$ wat dus ook de breedte is van het interval $[x_0, x_1]$. De maximale hoogte is a en voor de gemiddelde voorraad op het interval geldt dat dit gelijk is aan:

$$\frac{a}{2} \frac{aR}{a-b'} = \frac{a^2 R}{2(a-b')}.$$

Gebied II: $[x_1, x_2], [x_2, x_3]$

Dit gebied is een deel van een reviewperiode waarin aan het begin van dit interval, dus bijvoorbeeld op tijdstip x_1 , een spoedbestelling wordt geplaatst. In deze periode wordt de voorraad vanuit de spoedbestelling compleet gebruikt. In alle intervallen $[x_1, x_2], [x_2, x_3], \dots, [x_{n-1}, x_n]$ waarin een spoedbestelling is

geplaatst, worden er s eenheden van een product gebruikt. Dit omdat de aanname is gedaan dat als er bij een spoedbestelling aangevuld wordt, dit met een hoeveelheid s gebeurt. Er wordt nog steeds vanuit gegaan dat de vraag hetzelfde patroon heeft als in het interval $[x_0, x_1]$.

Net zoals in een gebied van type I wordt het punt t uit de vergelijking $s - \frac{a-b'}{R}t = 0$ berekend. Op dezelfde manier als bij gebied I komt hieruit dat

$$\frac{sR}{a-b'}$$

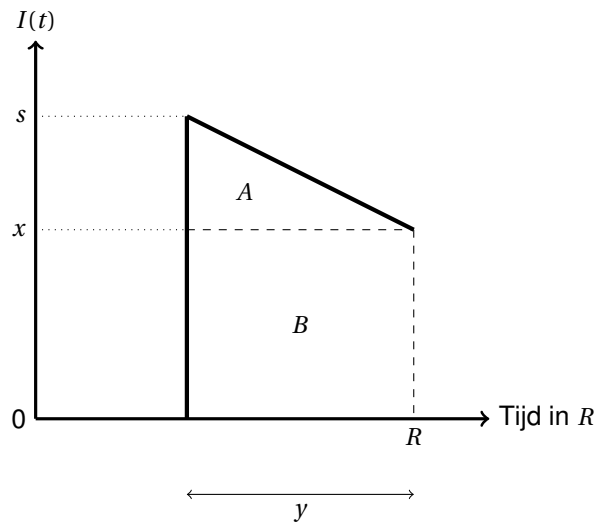
de lengte is van een gebied van type II. Voor de gemiddelde voorraad geldt dan dat deze gelijk is aan

$$\frac{s}{2} \frac{sR}{a-b'} = \frac{s^2 R}{2(a-b')}.$$

Er zijn in totaal $(Z_{b'} - 1)$ van dit soort gebieden. Als er überhaupt geen tekorten zijn opgetreden dan moet hiervoor gecompenseerd worden. Dit gebeurt met de factor F_b uit vergelijking 4.3.

Gebied III: $[x_3, R]$

Het laatste type gebied is van type III en is een gebied waarin wel een spoedbestelling wordt gedaan, maar waarin niet de volledige spoedbestelling wordt gebruikt. Bekend is dat het voorraadniveau op tijdstip R gelijk is aan x , dit is het einde van de reviewperiode. In figuur 4.6 is een gebied van type III in



Figuur 4.6: Gebied van type III

twee deelgebieden A en B gesplitst. Het voorraadniveau x komt overeen met de voorraad die aan het eind van de periode over is. De waarde y geeft de tijdsduur sinds de laatste spoedbestelling aan.

Om het oppervlak onder deze grafiek te berekenen moet eerst het punt x worden bepaald. Bekend is het punt b' , de (negatieve) voorraad als er geen spoedbestellingen zijn geweest. Het aantal spoedbestellingen is al eerder bepaald bij het bepalen van de tekortkosten en wordt aangegeven met $Z = \left\lceil \frac{|b'|}{s} \right\rceil$. De waarde x is dan als volgt:

$$x = Zs - |b'|.$$

De tijd sinds de laatste spoedbestelling y is de tijd waarin het voorraadniveau van s naar x gaat. Dit

wordt als volgt bepaald:

$$s - \frac{a - b'}{R} t = x;$$

$$t = -\frac{R}{a - b'} (x - s) = \frac{R(s - x)}{a - b'}.$$

Voor y volgt nu:

$$y = \frac{R(s - x)}{a - b'}.$$

Nu alle variabelen bekend zijn, kan ook voor dit type gebied de gemiddelde voorraad bepaald worden. Voor gebied A geldt dat dit gelijk is aan

$$\frac{s - x}{2} y = \frac{s - x}{2} \frac{R(s - x)}{a - b'} = \frac{R(s - x)^2}{2(a - b')}$$

en voor gebied B is dit gelijk aan

$$xy = \frac{Rx(s - x)}{a - b'}.$$

Dit geeft voor de totale oppervlakte van een gebied van type III:

$$\frac{(s - x)y}{2} + xy = \frac{(s + x)y}{2}.$$

Met bovenstaande berekeningen volgt uiteindelijk

$$I_{a,b'} = \frac{R}{2(a - b')} (a^2 + F_{b'}(Z_{b'} - 1)s^2) + \frac{(s + x)y}{2}.$$

4.5 Betrouwbaarheid

De leverbetrouwbaarheid van een product is gedefinieerd aan de hand van het aantal reviewperiodes waarin een tekort optreedt. Een betrouwbaarheid $\alpha = 0,8$ houdt in dat er op de lange duur naar verhouding in acht van de tien periodes geen tekort optreedt.

In een reviewperiode gaat het voorraadniveau van a naar b' . Een tekort treedt op indien voor b' geldt dat $b' < 0$. De kans dat dit gebeurt mag dus niet groter zijn dan $1 - \alpha$. Voor iedere a is bekend dat

$$\sum_{\forall b'} p_{a,b'} = 1 \quad (\forall a),$$

wat om te schrijven is naar

$$\sum_{b'=-\infty}^{-1} p_{a,b'} + \sum_{b'=0}^S p_{a,b'} = 1 \quad (\forall a).$$

Om te bepalen of deze vergelijking voldoet aan de betrouwbaarheid, moet gekeken worden naar de ongelijkheid

$$\sum_{\forall a} \left(\pi_a \sum_{b'=-\infty}^{-1} p_{a,b'} \right) \leq 1 - \alpha;$$

$$\sum_{\forall a} \left(\pi_a \left(1 - \sum_{b'=0}^S p_{a,b'} \right) \right) \leq 1 - \alpha.$$

Indien deze ongelijkheid geldt, is het zo dat het bijbehorende model een betrouwbaarheid α heeft.

4.6 Bepalen optimale waarden

De optimale waarden voor R , s en S worden bepaald door te kijken bij welke combinatie de kosten het laagst zijn en waarbij deze combinatie voldoet aan de restrictie voor het servicelevel.

4.7 Samenvatting model voor één product in één voorraadkamer

Kort samengevat ziet het model er als volgt uit. Er vanuit gaande dat R bekend is, kan voor s en S de overgangsmatrix P van de Markovketen uit figuur 4.2 bepaald worden. Uit deze matrix zijn de volgende vergelijkingen te halen:

$$\begin{aligned}\pi_n &= \sum_{i=0}^{S-n} \beta_i \pi_{n+i} \quad (n = s+1, \dots, S-1); \\ \pi_S &= \sum_{i=0}^{S-s-1} \pi_{i+s+1} p_i. \\ \text{Samen met} \quad &\sum_{i=s+1}^S \pi_i = 1\end{aligned}$$

worden uit deze vergelijkingen met recursie de waarden van π_i bepaald, de waarden $\beta_{a-b'}$ komen uit de matrix P en samen met de formule

$$T_{a,b'} = D_{a,b'} p + G_{b'} K + J + F_{b'} Z_{b'} B + I_{a,b} h$$

worden de totale verwachte kosten berekend:

$$E(T) = \sum_{a=s+1}^S \left(\pi_a \sum_{b'=-\infty}^a \beta_{a-b'} T_{a,b'} \right).$$

Hierbij is π_a de kans om in toestand a te beginnen, $\beta_{a-b'}$ de Poissonkans om van toestand a naar b' te gaan en $T_{a,b'}$ de kosten om van toestand a naar b' te gaan.

Voor de recursie geldt het volgende:

$$\gamma_{S-j} = \sum_{i=1}^j \gamma_{S-j+i} \beta_i \quad (j = 1, 2, \dots, S-s-1),$$

met

$$\gamma_S = 1.$$

Hieruit is af te leiden dat

$$\pi_S = \left(\sum_{j=0}^{S-s-1} \gamma_{S-j} \right)^{-1}.$$

De optimale combinatie voor R , s en S is de combinatie die de kosten $T_{a,b'}$ minimaliseert onder voorwaarde dat

$$\sum_{a=s+1}^S \pi_a \left(1 - \sum_{b'=0}^S p_{a,b'} \right) \leq 1 - \alpha.$$

HOOFDSTUK 5

MODEL VOOR MEERDERE PRODUCTEN OP MEERDERE KAMERS

In dit hoofdstuk wordt het model voor één product uitgebreid, zodat er gekeken kan worden naar de kosten voor meerdere producten en meerdere kamers.

5.1 Cumulatieve kosten per kamer

Voor ieder product is nu bekend hoe de minimale kosten berekend kunnen worden als de reviewperiode R bekend is. De volgende stap is het bepalen van een optimale reviewperiode voor een kamer waarop meerdere producten liggen.

De vraag van een bepaald product hangt niet af van de eigenschappen van een ander product. Ook op andere vlakken zijn de producten niet van elkaar afhankelijk. Daarom zijn simpelweg de kosten voor één kamer die horen bij een R te bepalen door de afzonderlijke kosten van ieder product bij elkaar op te tellen. In formulevorm:

$$T_{R,k} = \sum_{\forall p} T_{R,i}.$$

Hierbij zijn $T_{R,k}$ de kosten voor kamer k bij een reviewperiode R en $T_{R,i}$ de kosten van het reviewen van product i bij eenzelfde reviewperiode R . Verder geldt dat alle producten p op kamer k moeten liggen en er verder geen andere producten liggen.

De optimale waarde voor R voor een kamer is de waarde die $T_{R,k}$ minimaliseert:

$$R^* = \{R \mid T_{R,k} = \min_R \{T_{R,k}\}\}.$$

Deze oplossing zal gebruikt worden bij het toewijzingsprobleem dat hierna zal worden uitgelegd.

5.2 Kamertoewijzing

Nu voor iedere kamer met meerdere producten te bepalen is wat de kosten zijn bij verschillende reviewperiodes, dient er een rooster opgesteld te worden op welke dag welke kamers gereviewd gaan worden. In de praktijk kan er maar beperkt gereviewd worden omdat het beschikbare personeel beperkt is. Het aantal uren aan beschikbaar personeel wordt de capaciteit genoemd en aangeduid met C . Het aantal reviewmomenten dat per week uitgevoerd wordt, kan dan ook niet hoger zijn dan de beschikbare capaciteit. Er dient dus een optimale afweging gemaakt te worden tussen de reviewperiodes van de kamers en de kosten die dat met zich meebrengt.

Om deze optimale verdeling te bepalen, zal er gebruik worden gemaakt van dynamisch programmeren. Dat geeft het volgende probleem:

$$\min_{R_k \in \{\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2\}} \sum_{k=1}^n T_{R_k,k}$$

waarbij moet gelden dat

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \leq C.$$

Het toewijzen van één kamer is gemakkelijk. De mogelijkheden zijn bekend en de goedkoopste optie die binnen de capaciteit past, is de ideale strategie.

Voor het toewijzen van twee kamers zal eerst de eerste kamer worden toegewezen, bij een verbruik van een deel van de beschikbare capaciteit zijn de minimale kosten bekend. Bij het toewijzen van een reviewperiode aan de tweede kamer wordt gekeken naar de totale kosten van het toewijzen van beide kamers. Deze kosten zijn bekend voor ieder verbruik van de capaciteit voor die twee kamers. Zolang de gebruikte reviewmoment binnen de capaciteit blijven, zijn de optimale reviewperiodes de periodes die de kosten minimaliseren. Dit principe gaat door voor meer kamers. Het toewijzen kan bepaald worden met de volgende recursieformule:

$$f(k, g) = \begin{cases} T_{R_k, k} & \text{met } R_k = \frac{1}{g} & k = 1 \\ \min_{\forall R_k: f(k-1, g - \frac{1}{R_k}) \neq 0} \left\{ f\left(k-1, g - \frac{1}{R_k}\right) + T_{R_k, k} \right\} & 1 < k \leq n \end{cases} .$$

Waarbij $f(k, g)$ de minimale kosten zijn na het toewijzen van n kamers en het verbruiken van g reviews met $g \in \left\{0, \frac{1}{2}, 1, \dots, C\right\}$.

Voor de eerste kamer die toegewezen wordt, zijn alle opties nog met minimale kosten. Dus voor deze kamer kunnen alle mogelijkheden worden ingevuld. Daarna zal voor iedere volgende kamer gekeken worden naar de kosten van de kamer ervoor en zal voor iedere g de kleinste $f(k, g)$ ingevuld worden. Nadat alle kamers zijn toegewezen, is door middel van $\min(f(n, g))$ te bepalen wat de goedkoopste manier is om alle kamers toe te wijzen. Met de recursieformule is dan de gelopen route te bepalen en is dus bekend welke R -waarden de kamers hebben om het met minimale kosten te verdelen.

HOOFDSTUK 6

RESULTATEN

In dit hoofdstuk zijn de resultaten te vinden. Voor een aantal parameters moeten er schattingen gemaakt worden. De precieze kosten van bijvoorbeeld reviews en bestellen zijn lastig in te schatten. Dit komt doordat het afhankelijk is van de tijd die een werknemer er aan kwijt is, maar ook het aantal producten dat gescand moet worden. Voor de resultaten zijn er daarom een aantal aannames gemaakt, die in de paragraaf Variabelen schatten wordt uitgelegd.

Daarna zullen enkele resultaten getoond worden. Daaruit blijkt ook dat er bij andere waarden van de parameters andere conclusies worden getrokken. Dit is te vinden in het deel met gevoeligheidsanalyse.

6.1 Variabelen schatten

Om het model te kunnen doorrekenen, zijn er waarden nodig om in het programma te zetten. Hieronder volgt een overzicht van de benodigde kostenwaarden. Er wordt vanuit wordt gegaan dat een werknemer die het reviews doet, in totaal €32,50 per uur aan kosten met zich meebrengt, hiervoor wordt de variabele c gebruikt. Voor de kosten van een werknemer per uur die op een afdeling in het ziekenhuis werkt of bij de administratie, wordt dezelfde variabele c genomen. Dit is het brutoloon inclusief het verwerken van de administratie van deze werknemer. Daarnaast wordt er van een rentepercentage (r) van 12% per jaar uitgegaan. Dit is het rentepercentage dat het ziekenhuis per jaar moet betalen over de leningen die zij uit hebben staan.

Tekortkosten

Er wordt aangenomen dat het oplossen van een tekort in totaal één uur aan personeelskosten met zich meebrengt. Hierin zitten de kosten die gemaakt worden omdat er een verpleger van de afdeling waarop het tekort is ontstaan, naar de kelder moet om het product op te halen. Daarnaast worden er kosten gemaakt bij de administratie die onder andere een extra factuur moet verwerken. Voor de tekortkosten geldt:

$$B = c = 32,50.$$

Voorraadkosten

Voor de kosten om een product op voorraad te hebben gedurende een reviewperiode, wordt gebruik gemaakt van het rentepercentage r per jaar. Per reviewperiode is er de prijs van het product p waarover als het ware rente wordt betaald. Voor de voorraadkosten geldt het volgende:

$$h = p \cdot ((1 + r)^{R/52} - 1).$$

Bestelkosten

Per reviewperiode worden er voor één uur aan administratieve kosten gerekend. Dit betekent dat de bestelkosten gelijk zijn aan c .

Productkosten

De productkosten zijn de kosten om een product in te kopen bij een leverancier en worden aangegeven met p .

Reviewkosten

Er wordt vanuit gegaan dat de reviewkosten voor één kamer gelijk zijn aan c . Per product worden deze kosten gelijk verdeeld. Mocht er in totaal gekeken worden naar vijf producten op één kamer, dan wordt gemodelleerd met een waarde voor de reviewkosten die gelijk is aan $\frac{1}{5}c$.

Vraag

Bij het schatten van de vraag per week naar een product wordt gebruik gemaakt van de min- en max-niveaus die bekend zijn vanuit het AMC. De richtlijn is dat het min-niveau overeenkomt met de vraag voor twee reviewperiodes en het max-niveau overeenkomt met de vraag voor vier reviewperiodes. De vraag per week is dan af te schatten met behulp van de reviewperiode en het min- en max-niveau. Door eerst met het min- en max-niveau van een product de vraag per week te bepalen en hiervan vervolgens het gemiddelde te nemen, wordt de vraag geschat. Om het getal in het model te stoppen, wordt dit naar boven afgerond. De formule om de vraag mee af te schatten is dus als volgt:

$$D = \left\lceil \frac{\frac{\min}{2R} + \frac{\max}{4R}}{2} \right\rceil = \left\lceil \frac{\min}{4R} + \frac{\max}{8R} \right\rceil.$$

6.2 Resultaten

Voor het generen van de resultaten is een programma gebruikt dat geprogrammeerd is in Matlab. De programmacode is terug te vinden in bijlage E op pagina 67 en de gegevens van de producten die zijn bekeken staan in bijlage C op pagina 59.

Het programma heeft als bekende input het gewenste servicelevel α , de vraag per week van een product D en de prijs van het product p . Voor alle combinaties van reviewperiodes R en order-up-to-levels S berekent het de kosten voor een bepaald reorderlevel $s \in \{1, 2, \dots, S-2\}$. De optimale s -waarde is die waarde waarbij de kosten minimaal zijn, maar waarbij het (R, s, S) -systeem wel aan het servicelevel α voldoet.

Eén product

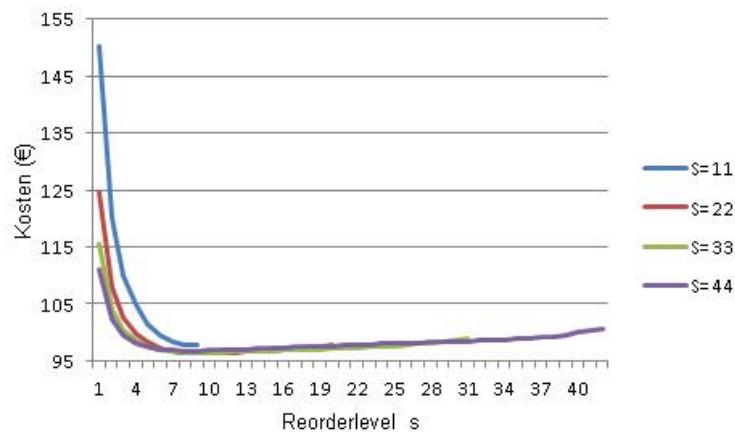
In dit hoofdstuk zullen resultaten worden gegeven aan de hand van een aantal voorbeelden. Als eerste wordt gekeken naar één enkel product, in dit voorbeeld vacutainers, beter bekend als bloedbuisjes. Naast het algemene servicelevel $\alpha = 0,98$, zijn van deze vacutainers de volgende gegevens bekend:

- prijs per doosje $p = \text{€ } 8,44$;
- vraag per week $D = 11$.

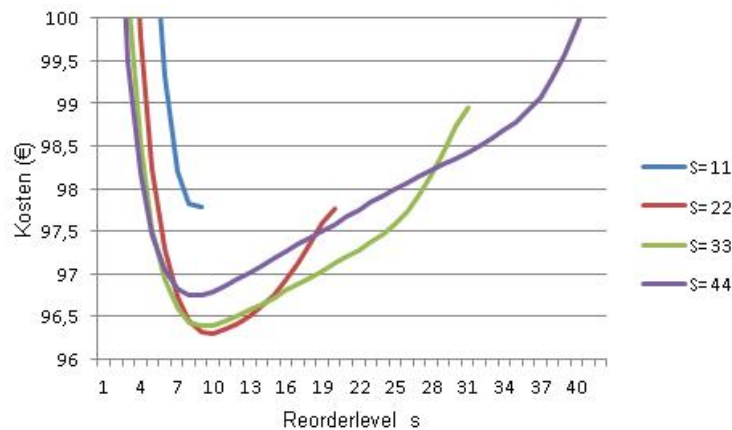
Dit product wordt nu twee keer in de week gereviewd en heeft een reorderlevel van $s = 14$ en een order-up-to-level van $S = 15$; de getallen staan voor het aantal doosjes van honderd stuks. Dit product is gesimuleerd voor $R = 1/2$ en $S = \{11, 22, 33, 44\}$. De resultaten zijn terug te vinden in figuur 6.2 en figuur 6.3. Bij $S = 22$ wordt het minimum bereikt voor de kosten, in tabel 6.1 is af te lezen dat dit gebeurt bij een reorderlevel van $s = 10$. De minimale kosten voor $R = 1/2$, $S = 22$ en $s = 10$ zijn gemiddeld €96,30 per week.



Figuur 6.1: Vacutainers.



Figuur 6.2: Kosten bij $R = 1/2$ op het interval $[95, 155]$.



Figuur 6.3: Kosten bij $R = 1/2$ op het interval $[96, 100]$.

Modelleren huidige situatie

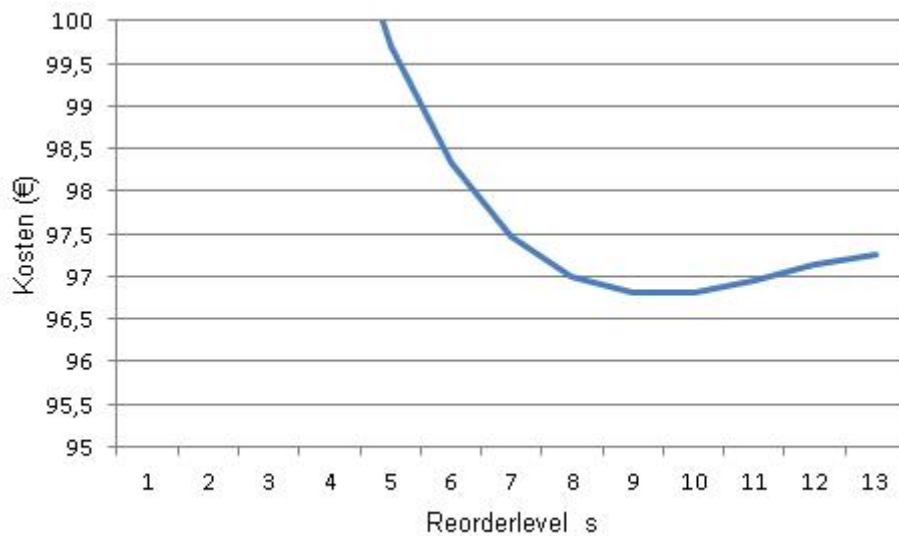
In de huidige situatie zijn de waarde voor het reorderlevel en het order-up-to-level gelijk aan $s = 14$ en $S = 15$. Om te kijken wat het model doet in dit geval, is uitgerekend wat de kosten zijn in deze situatie. De grafiek van de kosten is te zien in figuur 6.4. Het minimum treedt op bij $s = 9$, wat lager is dan het reorderlevel in de huidige situatie, en geeft als kosten €96,81.

Optimale kosten

Om de optimale waarden te bepalen voor de vacutainers, zijn alle kosten uitgerekend voor iedere combinatie van R , s en S . In tabel 6.2 is voor ieder van de vier R -waarden terug te vinden welke s en S optimaal zijn. Daarnaast zijn ook de bijbehorende kosten en het bijbehorende servicelevel gegeven. De combinatie $(R, s, S) = (2, 31, 33)$ is volgens het model de optimale situatie met €95,58 aan kosten en een servicelevel van 98,95%. In figuur 6.5 zijn alle grafieken voor de vacutainers afgebeeld.

s	Kosten	Servicelevel
1	€124,66	85,14%
2	€107,96	88,49%
3	€102,47	91,63%
4	€99,79	94,32%
5	€98,24	96,42%
6	€97,29	97,90%
7	€96,74	98,86%
8	€96,44	99,42%
9	€96,32	99,73%
10	€96,30	99,88%
11	€96,35	99,95%
12	€96,42	99,98%
13	€96,51	99,99%
14	€96,62	100,00%
15	€96,75	100,00%
16	€96,92	100,00%
17	€97,13	100,00%
18	€97,37	100,00%
19	€97,59	100,00%
20	€97,76	100,00%

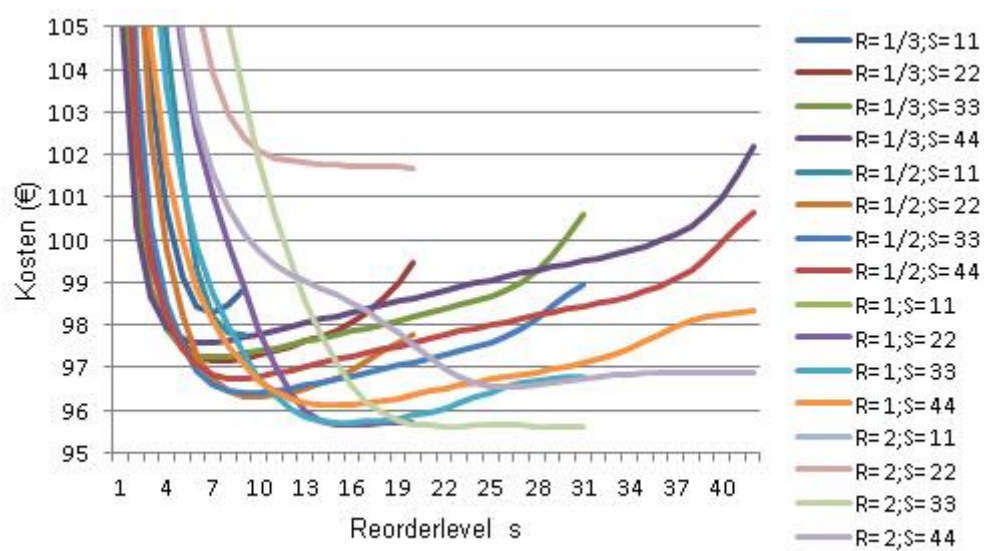
Tabel 6.1: Kosten en servicelevel bij $R = 1/2$ en $S = 22$.



Figuur 6.4: Kosten volgens model in huidige situatie.

R	s	S	Kosten	Servicelevel
1/3	7	22	€97,15	99,88%
1/2	10	22	€96,30	99,88%
1	16	22	€95,64	99,81%
2	31	33	€95,58	98,95%

Tabel 6.2: Optimale s , S voor iedere R .



Figuur 6.5: Kosten voor alle mogelijke R , s en S .

6.3 Optimale R per kamer

In totaal is voor vier kamers alles doorgerekend. Dit betekent dat voor ieder product op iedere kamer afzonderlijk de optimale waarden voor R , s en S zijn bepaald en de daarbij behorende kosten. Vervolgens zijn voor iedere kamer de kosten berekend voor een vaste R . In tabel 6.3 zijn voor één kamer met negen producten de kosten per product terug te vinden voor iedere waarde van R . Uit de totale kosten is af te lezen dat de optimale waarde $R = 1$ is. Hierbij wordt ook rekening gehouden met het servicelevel van 98%, waardoor $R = 2$ wegvalt.

Product	$R = 1/3$	$R = 1/2$	$R = 1$	$R = 2$
14604	€86,42	€83,18	€80,41	€79,76
14611	€13,25	€9,67	€6,18	€4,56
14719	€15,00	€11,44	€8,01	-
14730	€76,34	€73,07	€70,21	€69,39
14734	€15,04	€11,45	€7,90	€6,26
14758	€26,81	€23,23	€19,72	€18,07
44842	€341,95	€338,60	€335,88	-
44846	€107,10	€103,81	€100,74	€100,22
44847	€79,27	€75,93	€72,77	€71,79
Totaal	€761,19	€730,38	€701,82	-

Tabel 6.3: Kosten per R voor een kamer met negen producten.

Voor de vier kamers zijn in tabel 6.4 de kosten terug te vinden die bij de verschillende waarden van R horen. Met deze kostentabel kan het toewijzingsalgoritme toegepast worden.

Kamer	$R = 1/3$	$R = 1/2$	$R = 1$	$R = 2$
1	€6.130,04	€6.107,31	€6.138,48	-
2	€761,19	€730,38	€701,82	-
3	€421,43	€390,69	€362,86	-
4	€1.147,54	€1.120,08	€1.100,21	-

Tabel 6.4: Kosten per kamer bij verschillende R .

6.4 Kamers toewijzen

De kosten bij een bepaalde R voor een hele kamer zijn bekend, enkel bij de waarde $R = 2$ zijn geen kosten mogelijk die binnen het servicelevel passen. Daardoor zullen de kamers toegewezen worden voor $R_k = \{\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1\}$, de rest gaat precies volgens het model. Aangezien het om vier kamers gaat en er aangenomen wordt dat de capaciteit 6 is, is het probleem als volgt te omschrijven:

$$\min_{R_k \in \{\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1\}} \sum_{k=1}^4 T_{R_k, k}$$

waarbij moet gelden dat

$$\sum_{k=1}^4 \frac{1}{R_k} \leq 6.$$

Het probleem is niet heel groot, dus in tabel 6.5 zijn alle stappen te volgen die gemaakt worden bij het toewijzen van de kamers.

	$g = 0$	$g = 1$	$g = 2$	$g = 3$	$g = 4$	$g = 5$	$g = 6$
$f(0, g)$	€0,00	€0,00	€0,00	€0,00	€0,00	€0,00	€0,00
$f(1, g)$	€0,00	€6.138,48	€6.107,31	€6.130,04	€0,00	€0,00	€0,00
$f(2, g)$	€0,00	€0,00	€6.840,30	€6.809,13	€6.831,86	€6.860,42	€6.891,23
$f(3, g)$	€0,00	€0,00	€0,00	€7.203,16	€7.171,99	€7.194,72	€7.222,55
$f(4, g)$	€0,00	€0,00	€0,00	€0,00	€8.303,37	€8.272,20	€8.292,07

Tabel 6.5: Toewijzen van vier kamers met reviewcapaciteit van $C = 6$.

In de tabel zijn alle kamers toegewezen en zoeken het minimum in de rij $f(4, g)$. Deze is te vinden op positie $f(4, 5) = €8.272,20$. Door middel van recursie is het ideale pad terug te vinden en deze is in het groen weergegeven. De volgende reviewperiodes moeten dus worden toegewezen: $R_1 = 1/2$ en $R_2 = R_3 = R_4 = 1$. Door deze reviewperiodes te kiezen, zijn de gezamenlijke kosten van de vier kamers minimaal.

6.5 Variaties van variabelen

Er wordt gekeken naar de invloed van bepaalde variabelen op de uitkomsten van het model. Hiervoor zijn steeds verschillende waarden van de variabelen genomen. De resultaten zijn weergegeven in de tabellen in bijlage D op pagina 61. In dit deel wordt een toelichting gegeven op deze tabellen, waarbij de oorspronkelijke waarden die gebruikt zijn in het model als leidraad worden genomen.

Variatie van α

Voor α zijn de waarden $\alpha \in \{0,98; 0,999; 0,95\}$ genomen. Bij het verhogen van α naar 0,999 is er nauwelijks een verhoging in de kosten waar te nemen.

Bij de waarde $R = 2$ kan een α van 0,999 niet gehaald worden bij de waarden voor S waarmee wordt gesimuleerd. Dit is te verklaren doordat bij een langere reviewperiode er niet genoeg capaciteit (de waarde van S) is om aan de vraag te kunnen voldoen bij deze α . De kans op een tekort neemt daardoor ook toe. De onzekerheid kan opgevangen worden door de waarde van het order-up-to-level te verhogen.

Als er geen restrictie gelegd wordt op het servicelevel, verandert er bij onze waarden voor $R \in \{1/3, 1/2, 1\}$ niets aan de minimale kosten. Wel is het zo dat nu voor $R = 2$ wel een waarde gevonden kan worden waarbij de minimale kosten gegeven worden. Dit is tevens ook al het geval bij $\alpha = 0,95$, met uitzondering van één van de producten.

Variatie van K

In het model is de waarde $K = 1$ genomen. De variaties zijn $K \in \{50; 0,25; 0\}$. Voor iedere waarde van R neemt bij $K = 50$ het servicelevel af. Dit heeft er mee te maken dat er bij hogere bestelkosten minder vaak, maar in grotere hoeveelheden wordt besteld. De waarde van S komt hierdoor hoger te liggen. Naast een lager servicelevel nemen ook de totale kosten toe.

De waarde $K = 0,25$ verschilt weinig van de waarde $K = 1$ en heeft dan ook weinig invloed op de meeste resultaten. In de meeste gevallen verandert er weinig aan het servicelevel en aan de kosten.

Als er vanuit gegaan wordt dat er geen bestelkosten zijn, nemen bij iedere R de totale kosten af en het servicelevel toe, voor zover dat nog mogelijk is.

Variatie van J

De reviewkosten J hebben geen invloed op de servicelevels, wel op de totale kosten. Omdat van een vaste R wordt uitgegaan, zijn reviewkosten kosten die elke periode moeten worden gemaakt.

Variatie van B

Bij het rekenen met hoge boetekosten ($B = 250$) neemt het servicelevel in alle gevallen toe, voor $R = 1/3$ en $R = 1/2$ zijn deze bijna honderd procent. De kosten daarentegen nemen maar in kleine mate toe, omdat de boetekosten maar in een geringe mate meetellen en de servicelevels al hoog zijn. Voor lagere boetekosten neemt het servicelevel in mindere mate af. Dit is te verklaren door het feit dat lagere boetekosten het minder erg maken om een tekort op te laten treden.

HOOFDSTUK 7

CONCLUSIE

Het model over het voorraadbeheer van het AMC minimaliseert de kosten voor de reviewperiode R , het reorderlevel s en het order-up-to-level S bij een gegeven servicelevel α . Uit de resultaten blijkt dat dit servicelevel van 98% in bijna alle gevallen wordt gehaald. Het is alleen bij veel producten niet mogelijk om het servicelevel te halen als er slechts één keer per twee weken wordt gekeken. Dit wordt op dit moment ook niet in het AMC gedaan. Mocht dit wel het plan worden, dan moet er een grotere capaciteit voor die producten op die kamers zijn. In het model is dit gelimiteerd door vier maal de verwachte vraag per week, ongeacht de reviewperiode van die voorraadkamer.

In dit verslag is gekeken naar een klein stuk van het AMC, vier voorraadkamers met in totaal 57 producten. Per product zijn de optimale R , s en S te bepalen. Doordat de producten met elkaar verbonden zijn door de reviewperiode kunnen de optimale kosten van de kamer groter zijn dan van alle losse producten gesommeerd. Wanneer een afdeling de beschikking heeft over meerdere voorraadkamers is het mogelijk om per voorraadkamer een andere reviewperiode te hebben. Hierdoor geldt voor meer producten dat zij hun optimale kosten kunnen behouden en zo ook dat de afdeling zo min mogelijk kosten kwijt is. Dit laatste is op te lossen met het kamertoewijzingsalgoritme waarbij zo veel mogelijke producten in een kamer komen met hun eigen optimale reviewperiode.

Niet elke afdeling heeft de beschikking over meerdere voorraadkamers. Als de reviewperiode voor de kamer wel vast staat, kunnen de optimale waarden van s en S makkelijk veranderd worden, zodat er niet onnodig producten op voorraad liggen. Dit is een simpele ingreep die gemakkelijk leidt tot een vermindering van de kosten voor het AMC.

Dit alles was uit te voeren voor het voorbeeld met vier kamers en aangezien een extra kamer toevoegen geen effect heeft op het principe, is het model ook toe te passen op het voorraadbeheer van verbruiksgoederen in de voorraadkamers in het gehele AMC. Doordat de huidige min- en max-niveaus van producten in het AMC ook in het model voorkomen, zullen de kosten per product nooit hoger worden.

HOOFDSTUK 8

DISCUSSIE

Om tot de resultaten te komen, zijn meerdere aannames gedaan waardoor bijvoorbeeld bepaalde factoren die invloed hebben op het model buiten beschouwing worden gelaten of er gekozen wordt voor een aanpak die ook anders kan.

Gegevens over de vraag

Vanuit het AMC zijn geen directe gegevens bekend over de vraag. De vraag is daarom gebaseerd op het reorderlevel en het order-up-to-level. Dit geeft een beeld van de vraag dat in een aantal gevallen mogelijk niet in de buurt komt van de vraag in werkelijkheid. Indien de daadwerkelijke vraag naar een product beschikbaar is, wordt een grote onzekerheid weggenomen in het model en bij het berekenen van de optimale waarde.

Gegevens over de kosten

Ook zijn de kosten die gemaakt worden voor het reviewen en leveren van producten aan de afdelingen lastig te schatten. Deze kosten zijn geschat naar aanleiding van het eerste bezoek aan het AMC en geven een redelijke, maar onzekere, schatting van de daadwerkelijke kosten. Het beter bepalen van deze kosten, zorgt voor meer zekerheid in de eindresultaten.

Keuzes van het order-up-to-level

Bij de resultaten wordt er vanuit gegaan dat het order-up-to-level enkel waarden aan kan nemen die gelijk zijn aan 1, 2, 3 of 4 maal de vraag van het product. Hierdoor wordt de optimale waarde van het order-up-to-level gekozen uit vier opties, terwijl er mogelijk een beter alternatief is. De keuze is gemaakt om de rekentijd enigszins te beperken bij het genereren van resultaten. Met een kleine aanpassing is het mogelijk om uit een veel grotere hoeveelheid opties de ideale waarde te kiezen.

Reviewperiodes

De reviewperiode heeft ook maar vier mogelijke waarden die het kan aannemen. Deze waarden zijn gebaseerd op de huidige toestand in het AMC. Daarentegen lijkt het wiskundig erg interessant om te kijken naar een grotere verzameling aan waarden voor de lengte van een reviewperiode.

Productafhankelijk servicelevel

Voor alle producten worden in het huidige model hetzelfde servicelevel gebruikt. Dit zorgt voor een hoge leverbetrouwbaarheid, maar geeft voornamelijk bij een reviewperiode van twee weken helemaal geen resultaten, omdat het servicelevel dan niet gehaald kan worden. Het is daarbij misschien ook niet nodig om voor alle producten hetzelfde servicelevel te willen. Het lijkt aannemelijk dat een drukverband belangrijker is dan koffiebekertjes. Voor andere producten is het misschien zelfs wenselijk om een nog hogere servicelevel te hebben, bijvoorbeeld voor hartkatheters. Door onderscheid te maken in kritische (belangrijk om patiënten te laten leven) en niet-kritische producten.

Grootte van spoedbestellingen

In het model is aangenomen dat de spoedbestellingen een grootte van s hebben. In de praktijk zal een spoedbestelling vaak één doosje of één zak zijn, natuurlijk afhankelijk van de hoeveelheid producten in zo'n verpakking en hoe groot en zwaar dit is. Door voor alle producten te kijken naar een 'standaard-hoeveelheid spoedbestelling' kan dit verbeterd worden. Wanneer deze gegevens bekend zijn, kan dit relatief makkelijk in het model verwerkt worden.

Toewijzingsprobleem

Bij het toewijzingsprobleem van de kamers aan een bepaalde dag, is geen rekening gehouden met de precieze dag waarop de reviewmomenten plaatsvinden. Elk reviewmoment is vrij in te delen en de capaciteit is gebaseerd op een gehele week. In de praktijk is het gemakkelijker en voordeliger om iedere dag ongeveer eenzelfde hoeveelheid aan personeel in dienst te hebben. Om het toewijzingsprobleem uit te breiden, kan de extra restrictie opgelegd worden dat het aantal reviewmoment op een dag van de week per dag aan elkaar gelijk moet zijn of maar een klein aantal mag verschillen.

HOOFDSTUK 9

AANBEVELINGEN

9.1 Aanbevelingen voor het AMC

Gegevensbeheer

In het model wordt gebruik gemaakt van parameters. Deze parameters zijn in de meeste gevallen schattingen gebaseerd op gegevens uit het databestand dat ontvangen is uit het AMC. Zo is bijvoorbeeld de vraag geschat aan de hand van de min- en max-waarde voor ieder product. Het getal dat uit deze schatting komt, is een weerspiegeling van de echte vraag. Het rekenen met de echte vraag zou al een grote verbetering zijn voor het model.

Ook de kosten die gebruikt worden voor bijvoorbeeld het bestellen van producten zijn grove schattingen en daarvan is niet duidelijk in hoeverre deze overeenkomen met de daadwerkelijke kosten. Het in kaart brengen van deze kosten, draagt wederom bij aan het verbeteren van de gebruikte waarden en dus ook de resultaten die uit het model komen.

In het algemeen wordt het AMC geadviseerd om te zorgen dat voor eventueel vervolgonderzoek betere gegevens over onder andere de vraag van producten, maar ook van de kosten van het voorraadsysteem beschikbaar zijn. Het verkrijgen van deze data zou ook kunnen volgen uit vervolgonderzoek.

Continu reviewen

Op dit moment wordt er gebruik gemaakt van periodieke reviewmomenten. Voor in de toekomst kan gekeken worden of het mogelijk is om de voorraad continu te gaan reviewen. Op dit moment brengt het continu reviewen dusdanig hoge kosten met zich mee, dat dit nu niet voordelig is.

Het modelleren met behulp van continue modellen, kan de kosten mogelijk nog verder verlagen. Hierbij zal dan wel gekeken moeten worden of de invloed dusdanig groot is dat het nuttig is om over te gaan van een periodiek model naar een continu model.

9.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Magazijn

Het model dat in dit verslag uitgewerkt is, kijkt naar het voorraadbeheer van verbruiksgoederen in de voorraadkamers. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat er altijd producten in het magazijn op voorraad liggen en dat er altijd aan de vraag van de voorraadkamers voldaan wordt.

Om het voorraadbeheer van het AMC goed te modelleren, moet het magazijn ook meegenomen worden. Op dit moment ligt er op elke voorraadkamer van elk product een veiligheidsvoorraad (reorderlevel), om (bijna) altijd aan de vraag te kunnen voldoen. Wanneer een deel van deze veiligheidsvoorraden voor alle producten centraal in het magazijn te plaatsen is, hoeft er in totaal minder op voorraad te liggen. Het is in de meeste gevallen niet waarschijnlijk dat de vraag op alle voorraadkamers naar één product tegelijkertijd stijgt. Verder onderzoek, waarin het magazijn wordt meegenomen, kan een advies geven wat de voorraadhoogte in het magazijn moet zijn in combinatie met de voorraadhoogtes in iedere voorraadkamer.

Lateral transshipments

Lateral transshipments zijn verplaatsingen van producten tussen afdelingen. In plaats van het halen van een product uit het magazijn kan het product ook van een andere afdeling gehaald worden, die in de meeste gevallen dichterbij ligt dan het magazijn.

In het huidige model wordt er geen rekening gehouden met de mogelijkheid dat er lateral transshipments plaats kunnen vinden. Door onderzoek naar deze optie te doen, zal blijken wat de invloed is van het toestaan van lateral transshipments op de hoogte van de voorraad en de optimale kosten.

Meer onderzoek naar de parameters

De meeste kosten, bijvoorbeeld voor het reviewen en het bestellen, zijn nu gebaseerd op schattingen. Hierbij wordt er ook vanuit gegaan dat iedere kamer dezelfde reviewkosten heeft en dat elk product dezelfde bestelkosten heeft. Afgezien van het feit dat in het huidige model de kosten voor alle producten op alle kamers hetzelfde zijn, kan er beter onderzocht worden wat de exacte kosten zijn van bijvoorbeeld het reviewen en het bestellen. Zo heeft bijvoorbeeld het aantal producten in een kamer direct invloed op de reviewkosten. Ook betekent meerdere voorraadkamers op een afdeling een vermindering in de reviewkosten omdat de afstand die gelopen moet worden naar de afdeling verdeeld kan worden tussen iedere voorraadkamer op die afdeling.

Voor de bestelkosten per product kan onderzocht worden of deze voor producten met een andere prijs of omvang erg van elkaar verschillen. De ruimte die één doosje pleisters inneemt, is namelijk een stuk kleiner dan tien rollen papier voor op behandelstoelen. In het huidige model wordt er vanuit gegaan dat de bestelkosten in deze twee gevallen gelijk zijn.

Daarnaast waren er geen gegevens beschikbaar die de vraag per week van elk product weergeven. Dit is nu opgelost aan de hand van de minimale en maximale waarden van de voorraadhoogtes. Wanneer deze wel bekend zijn, kan er een betere vergelijking met de huidige situatie gemaakt worden.

Programma uitbreiden

Het huidige programma kan niet de evenwichtskansen uitrekenen als er grote waarden van S zijn. Daarnaast lijken er fouten in de afronding te komen, doordat er veel met hele kleine kansen gerekend wordt. Onderzocht moet worden of dit laatste inderdaad het geval is en hoe die opgelost kan worden.

Daarnaast kan voor de waarde $s = S - 1$ het programma geen reële kosten geven. Daarom is er voor gekozen alle kosten bij deze waarden weg te laten en alleen de waarden tot en met $s = S - 2$ te gebruiken. Het programma kan op dit punt zeker nog verbeterd worden.

Producten indelen naar eigenschappen

In dit onderzoek is niet gekeken naar verschillende groepen producten. Het ene product is belangrijker dan het andere. Dit kan bijvoorbeeld omdat er voor een bepaald product gemakkelijk een vervangend product kan worden gebruikt dat toevallig op dezelfde afdeling aanwezig is. Is dit bijvoorbeeld niet het geval, dan kan het product dus in mindere mate gemist worden en levert een tekort hiervan hogere boetekosten op.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Bezuinigingen in de zorg in 2013. URL <http://nieuws-uitgelicht.infonu.nl/financieel/97631-bezuinigingen-in-de-zorg-in-2013.html>.
- [2] R. Ehrhardt. The power approximation for computing (s,s) inventory policies. *Management Sci.*, 25: 777–786, 1979.
- [3] R. Ehrhardt and C. Mosier. A revision of the power approximation for computing (s,s) policies. *Management Sci.*, 30:618–622, 1984.
- [4] S.M. Ross. *Introduction to Probability Methods*. Elsevier/Academic Press, 2007. ISBN 9780125980623. URL <http://books.google.nl/books?id=-dwtxagQ9skC>.
- [5] E.A. Silver, D.F. Pyke, and R. Peterson. *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. John Wiley & Sons, 1998. ISBN 9780471119470. URL <http://books.google.nl/books?id=GI5jQgAACAAJ>.
- [6] W.L. Winston and J.B. Goldberg. *Operations research: applications and algorithms*. Thomson Brooks/Cole, 2004. ISBN 9780534423582. URL <http://books.google.nl/books?id=tg5DAQAAIAAJ>.

BIJLAGE A

TABEL MET VARIABELEN

Alle parameters die in dit verslag gebruikt worden, met uitzondering van die vermeld staan in het literatuurgedeelte, staan hieronder kort beschreven. In de meeste gevallen zijn gebruikte indices weggelaten.

Variabele	Omschrijving
R	Lengte van een reviewperiode in weken
S	Order-up-to-level/Max-waarde
s	Reorderlevel/Min-waarde
$I(t)$	Voorraadhoogte op tijdstip t
P	Matrix met overgangskansen
β_i	Stochastische variabele voor verbruik
p_i	Restterm van overgangskansen
π, π_i	Evenwichtsverdeling
T	Totale kosten per reviewperiode
a	Begintoestand van een reviewperiode
b	Eindtoestand van een reviewperiode in markovketen
b'	Eindtoestand van een reviewperiode bij het berekenen van de kosten
D	Vraag per week
λ	Vraag per periode
p	Prijs per product
G	Factor bestelkosten
K	Bestelkosten
J	Reviewkosten
F	Factor tekortkosten
Z	Aantal spoedbestellingen
B	Tekortkosten
h	Voorraadkosten
c	Kosten review of administratief personeel per uur
r	Rentefactor per jaar
α	Servicelevel
k	Kamernummer
C	Capaciteit personeel

BIJLAGE B

RECURSIE

Eerder in 4.3.3 op pagina 29 is de uitkomst gegeven van het recursief bepalen van de evenwichtstoestanden. Hieronder is het algoritme verder uitgewerkt.

Voor de recursie geldt het volgende:

$$\gamma_{S-j} = \sum_{i=1}^j \gamma_{S-j+i} \beta_i \quad (j = 1, 2, \dots, S-s-1),$$

met

$$\gamma_S = 1.$$

Hieruit is af te leiden dat

$$\pi_S = \left(\sum_{j=0}^{S-s-1} \gamma_{S-j} \right)^{-1}$$

De factor γ_i wordt met behulp van een recursieve formulie bepaald, hieronder is het begin van deze recursie uitgewerkt. Voor π_{S-1} geldt:

$$\begin{aligned} \pi_{S-1} &= \sum_{i=0}^1 \beta_i \pi_{i+S-1} \\ &= \beta_0 \pi_{S-1} + \beta_1 \pi_S; \\ \pi_{S-1} &= \frac{\beta_1}{1 - \beta_0} \pi_S \\ &= \gamma_{S-1} \pi_S, \end{aligned}$$

met

$$\gamma_{S-1} := \frac{\beta_1}{1 - \beta_0}.$$

Voor π_{S-2} geldt:

$$\begin{aligned} \pi_{S-2} &= \beta_0 \pi_{S-2} + \beta_1 \pi_{S-1} + \beta_2 \pi_S; \\ (1 - \beta_0) \pi_{S-2} &= \beta_1 \gamma_{S-1} \pi_S + \beta_2 \pi_S \\ &= (\beta_1 \gamma_{S-1} + \beta_2) \pi_S; \\ \pi_{S-2} &= \frac{\beta_1 \gamma_{S-1} + \beta_2}{1 - \beta_0} \pi_S \\ &= \gamma_{S-2} \pi_S \end{aligned}$$

met

$$\gamma_{S-2} := \frac{\beta_1 \gamma_{S-1} + \beta_2}{1 - \beta_0}.$$

Voor π_{S-3} geldt:

$$\begin{aligned} \pi_{S-3} &= \beta_0 \pi_{S-3} + \beta_1 \pi_{S-2} + \beta_2 \pi_{S-1} + \beta_3 \pi_S; \\ (1 - \beta_0) \pi_{S-3} &= \beta_1 \gamma_{S-2} \pi_S + \beta_2 \gamma_{S-1} \pi_S + \beta_3 \pi_S; \\ \pi_{S-3} &= \frac{\beta_1 \gamma_{S-2} + \beta_2 \gamma_{S-1} + \beta_3}{1 - \beta_0} \pi_S \\ &= \gamma_{S-3} \pi_S \end{aligned}$$

met

$$\gamma_{S-3} := \frac{\beta_1 \gamma_{S-2} + \beta_2 \gamma_{S-1} + \beta_3}{1 - \beta_0}.$$

Voor π_{S-j} volgt dan :

$$\begin{aligned} \pi_{S-j} &= \frac{\sum_{i=1}^j \beta_i \gamma_{S-j+i}}{1 - \beta_0} \pi_S \\ &= \gamma_{S-j} \pi_S \end{aligned}$$

met

$$\gamma_{S-j} := \frac{\sum_{i=1}^j \beta_i \gamma_{S-j+1}}{1 - \beta_0}.$$

BIJLAGE C

INPUT MODEL

De onderstaande tabel geeft alle producten die in het model zijn gebruikt weer. Hiervan is de vraag per week en de productprijs gebruikt.

Productnummer	Productprijs in €	Vraag/Week
Eerste kamer		
10569	1068	1
10570	943,02	2
10571	1188	1
10572	880,33	1
13327	993,1	1
Tweede kamer		
14604	24,89	3
14611	0,68	3
14719	1,88	2
14730	21,55	3
14734	0,32	12
14758	1,03	15
44842	19,34	17
44846	15,83	6
44847	11,23	6
Derde kamer		
14604	24,89	2
14611	0,68	1
14719	1,88	2
14730	21,55	2
14734	0,32	16
14756	1,42	2
14758	1,03	5
44842	19,34	5
44843	20,22	2
44846	15,83	3
44847	11,23	2
Vierde kamer		
7690	10,09	28
7692	10,63	4
7717	39,81	2
7718	37,82	1
13625	1,61	2
13634	1,62	4
13635	7,95	2
13732	8,44	11
13733	10,53	1
13734	8,68	1

13735	10,36	2
13736	9,32	2
13737	12,88	7
13738	8,75	6
13747	8,49	1
13757	13,95	16
13778	5,89	3
13797	6,34	2
13798	5,91	3
13799	5,91	2
13800	5,33	1
13823	1,78	1
13842	4,53	2
13878	16,41	5
13879	16,41	2
14497	1,61	10
14498	15,47	1
14580	8,71	3
14610	1,56	3
14612	8,68	1
16679	31,85	1
17421	13,93	2

Tabel C.1: Input van 57 producten op vier verschillende kamers

BIJLAGE D

TABELLEN BIJ VARIATIES VAN α , K , B , J

Allereerst is in tabel D.1 de kosten en de servicelevels met de parameters zoals in het model gepresenteerd. Voor verschillende waarden van het minimum servicelevel α , bestelkosten per product K , reviewkosten per periode J en tekortkosten per soort product B zijn de daarbijhorende kosten en servicelevels gegeven. Het is niet bij alle variaties mogelijk om een waarde te geven, dit levert vooral bij een reviewperiode van 2 problemen op. In de tabellen zijn deze 'resultaten' weggelaten. Het van de kosten bij deze R geeft dan alleen de sommatie van de kosten die wel bekend zijn aan.

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€86,42	99,93%	€83,18	99,64%	€80,41	99,12%	€79,76	98,38%
14611	€13,25	99,95%	€9,67	99,94%	€6,18	99,77%	€4,56	98,96%
14719	€15,00	99,99%	€11,44	99,92%	€8,01	99,55%		
14730	€76,34	99,95%	€73,07	99,90%	€70,21	99,12%	€69,39	98,38%
14734	€15,04	99,99%	€11,45	99,99%	€7,90	99,93%	€6,26	99,93%
14758	€26,81	99,98%	€23,23	99,96%	€19,72	99,91%	€18,07	99,60%
44842	€341,95	99,92%	€338,6	99,79%	€335,88	99,65%		
44846	€107,10	99,85%	€103,81	99,77%	€100,74	98,96%	€100,22	99,01%
44847	€79,27	99,96%	€75,93	99,87%	€72,77	99,32%	€71,79	99,01%
Totaal	€761,19		€730,38		€701,82		€350,05	

Tabel D.1: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €32,50$, $K = €1$, –

D.1 α variabel

Ter verduidelijking zijn eerst de totalen met de oorspronkelijke parameters voor alle mogelijke R in deze kamer gegeven:

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
Totaal	€761,19		€730,38		€701,82		€350,05	

Tabel D.2: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €32,50$, $K = €1$, –

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€86,42	99,93%	€83,19	99,90%	€81,03	99,92%		
14611	€13,25	99,95%	€9,67	99,94%	€6,20	99,92%		
14719	€15,00	99,99%	€11,44	99,92%	€8,15	99,96%		
14730	€76,34	99,95%	€73,07	99,90%	€70,71	99,92%		
14734	€15,04	99,99%	€11,45	99,99%	€7,90	99,93%	€6,26	99,93%
14758	€26,81	99,98%	€23,23	99,96%	€19,72	99,91%		
44842	€341,95	99,92%	€338,69	99,95%	€335,97	99,94%		
44846	€107,11	99,96%	€103,90	99,92%	€101,04	99,94%	€100,50	99,92%
44847	€79,27	99,96%	€75,99	99,96%	€72,93	99,94%	€71,97	99,92%
Totaal	€761,2		€730,62		€703,65		€178,73	

Tabel D.3: $\alpha = 99.9\%$, $B = \text{€}32,50$, $J = \text{€}32,50$, $K = \text{€}1, -$

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€86,42	99,93%	€83,18	99,64%	€80,41	99,12%	€79,76	98,38%
14611	€13,25	99,95%	€9,67	99,94%	€6,18	99,77%	€4,56	98,96%
14719	€15,00	99,99%	€11,44	99,92%	€8,01	99,55%	€6,55	97,66%
14730	€76,34	99,95%	€73,07	99,90%	€70,21	99,12%	€69,39	98,38%
14734	€15,04	99,99%	€11,45	99,99%	€7,90	99,93%	€6,26	99,93%
14758	€26,81	99,98%	€23,23	99,96%	€19,72	99,91%	€18,07	99,60%
44842	€341,95	99,92%	€338,60	99,79%	€335,88	99,65%		
44846	€107,10	99,85%	€103,81	99,77%	€100,74	98,96%	€99,62	96,26%
44847	€79,27	99,96%	€75,93	99,87%	€72,77	99,32%	€71,52	96,26%
Totaal	€761,19		€730,38		€701,82		€355,73	

Tabel D.4: $\alpha = 95\%$, $B = \text{€}32,50$, $J = \text{€}32,50$, $K = \text{€}1, -$

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€86,42	99,93%	€83,18	99,64%	€80,41	99,12%	€79,76	98,38%
14611	€13,25	99,95%	€9,67	99,94%	€6,18	99,77%	€4,56	98,96%
14719	€15,00	99,99%	€11,44	99,92%	€8,01	99,55%	€6,55	97,66%
14730	€76,34	99,95%	€73,07	99,90%	€70,21	99,12%	€69,39	98,38%
14734	€15,04	99,99%	€11,45	99,99%	€7,90	99,93%	€6,26	99,93%
14758	€26,81	99,98%	€23,23	99,96%	€19,72	99,91%	€18,07	99,60%
44842	€341,95	99,92%	€338,60	99,79%	€335,88	99,65%	€340,53	54,54%
44846	€107,10	99,85%	€103,81	99,77%	€100,74	98,96%	€99,62	96,26%
44847	€79,27	99,96%	€75,93	99,87%	€72,77	99,32%	€71,52	96,26%
Totaal	€761,19		€730,38		€701,82		€696,26	

Tabel D.5: geen α , $B = \text{€}32,50$, $J = \text{€}32,50$, $K = \text{€}1, -$

D.2 K variabel

Ter verduidelijking zijn eerst de totalen met de oorspronkelijke parameters voor alle mogelijke R in deze kamer gegeven:

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
Totaal	€761,19		€730,38		€701,82		€350,05	

Tabel D.6: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €32,50$, $K = €1$, –

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€100,04	99,10%	€97,17	99,16%	€96,19	98,58%	€101,00	98,38%
14611	€27,05	99,10%	€23,81	99,16%	€21,95	98,58%	€25,85	98,38%
14719	€28,80	99,51%	€25,48	98,62%	€24,53	98,75%		
14730	€89,97	99,10%	€87,05	99,16%	€85,95	98,58%	€90,63	98,38%
14734	€28,48	99,57%	€25,22	99,29%	€22,66	98,49%	€27,13	98,76%
14758	€40,19	99,55%	€36,93	99,45%	€34,39	98,54%	€42,26	98,23%
44842	€357,16	99,31%	€354,10	98,55%	€357,91	98,61%		
44846	€120,76	99,05%	€117,76	98,58%	€116,02	98,43%	€121,43	99,01%
44847	€92,90	99,66%	€89,80	98,58%	€87,87	98,43%	€93,00	99,01%
Totaal	€885,35		€857,31		€847,48		€501,30	

Tabel D.7: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €32,50$, $K = €50$, –

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€86,08	99,93%	€82,72	99,80%	€79,97	99,66%	€79,43	98,38%
14611	€12,99	99,99%	€9,40	99,99%	€5,86	99,92%	€4,19	99,10%
14719	€14,72	99,99%	€11,15	99,98%	€7,64	99,86%		
14730	€76,00	99,93%	€72,64	99,80%	€69,76	99,66%	€69,07	98,38%
14734	€14,81	100,00%	€11,22	99,99%	€7,63	99,98%	€5,89	99,99%
14758	€26,55	99,99%	€22,96	99,98%	€19,42	99,96%	€17,70	99,60%
44842	€340,87	99,90%	€337,43	99,69%	€335,19	99,65%		
44846	€106,55	99,93%	€103,21	99,92%	€100,03	98,96%	€99,90	99,01%
44847	€78,81	99,93%	€89,80	98,58%	€87,87	98,43%	€93,00	99,01%
Totaal	€757,39		€740,51		€713,36		€369,18	

Tabel D.8: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €32,50$, $K = €0,25$

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€85,81	99,97%	€82,45	99,80%	€79,80	99,66%	€79,32	98,38%
14611	€12,89	100,00%	€9,29	100,00%	€5,72	99,99%	€4,07	99,0%
14719	€14,62	100,00%	€11,03	99,97%	€7,49	99,96%		
14730	€75,75	99,97%	€72,37	99,80%	€69,59	99,66%	€68,96	98,38%
14734	€14,70	100,00%	€11,09	100,00%	€7,51	99,93%	€5,77	99,99%
14758	€26,33	99,99%	€22,78	99,99%	€19,20	99,98%	€17,57	99,60%
44842	€340,35	99,96%	€336,93	99,69%	€334,96	99,65%		
44846	€106,36	99,93%	€102,97	99,92%	€99,79	99,10%	€99,79	99,01%
44847	€78,61	99,98%	€75,16	99,97%	€71,92	99,10%	€71,35	99,57%
Totaal	€755,41		€724,08		€695,98		€347,83	

Tabel D.9: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €32,50$, $K = €0$, –

D.3 J variabel

Ter verduidelijking zijn eerst de totalen met de oorspronkelijke parameters voor alle mogelijke R in deze kamer gegeven:

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
Totaal	€761,19		€730,38		€701,82		€350,05	

Tabel D.10: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €32,50$, $K = €1, -$

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€158,92	99,93%	€131,51	99,64%	€104,57	99,12%	€91,84	98,38%
14611	€85,75	99,95%	€58,01	99,94%	€30,35	99,77%	€16,64	98,96%
14719	€87,50	99,99%	€59,77	99,92%	€32,17	99,55%		
14730	€148,84	99,95%	€121,40	99,90%	€94,38	99,12%	€81,47	98,38%
14734	€87,54	99,99%	€59,78	99,99%	€32,06	99,93%	€18,34	99,93%
14758	€99,31	99,98%	€71,57	99,96%	€43,89	99,91%	€30,16	99,60%
44842	€414,45	99,92%	€386,93	99,79%	€360,05	99,65%		
44846	€179,60	99,85%	€152,15	99,77%	€124,90	98,96%	€112,3	99,01%
44847	€151,77	99,96%	€124,27	99,87%	€96,94	99,32%	€83,88	99,01%
Totaal	€1413,69		€1165,38		€919,32		€434,64	

Tabel D.11: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €250, -$, $K = €1, -$

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€77,26	99,93%	€77,07	99,64%	€77,35	99,12%	€78,23	98,38%
14611	€4,08	99,95%	€3,56	99,94%	€3,13	99,77%	€3,03	98,96%
14719	€5,84	99,99%	€5,32	99,92%	€4,95	99,55%		
14730	€67,17	99,95%	€66,96	99,90%	€67,16	99,12%	€67,86	98,38%
14734	€5,87	99,99%	€5,34	99,99%	€4,84	99,93%	€4,73	99,93%
14758	€17,65	99,98%	€17,12	99,96%	€16,67	99,91%	€16,55	99,60%
44842	€332,79	99,92%	€332,48	99,79%	€332,83	99,65%		
44846	€97,93	99,85%	€97,70	99,77%	€97,68	98,96%	€98,69	99,01%
44847	€70,1	99,96%	€69,82	99,87%	€69,71	99,32%	€70,27	99,01%
Totaal	€678,69		€675,38		€674,32		€339,36	

Tabel D.12: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €5, -$, $K = €1, -$

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€75,59	99,93%	€75,96	99,64%	€76,8	99,12%	€77,95	98,38%
14611	€2,42	99,95%	€2,45	99,94%	€2,57	99,77%	€2,75	98,96%
14719	€4,17	99,99%	€4,21	99,92%	€4,40	99,55%		
14730	€65,51	99,95%	€65,85	99,9%	€66,60	99,12%	€67,59	98,38%
14734	€4,20	99,99%	€4,23	99,99%	€4,28	99,93%	€4,45	99,93%
14758	€15,98	99,98%	€16,01	99,96%	€16,11	99,91%	€16,27	99,6%
44842	€331,12	99,92%	€331,37	99,79%	€332,27	99,65%		
44846	€96,26	99,85%	€96,59	99,77%	€97,13	98,96%	€98,41	99,01%
44847	€68,44	99,96%	€68,71	99,87%	€69,16	99,32%	€69,99	99,01%
Totaal	€663,69		€665,38		€669,32		€337,41	

Tabel D.13: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €0,-$, $K = €1,-$

D.4 B variabel

Ter verduidelijking zijn eerst de totalen met de oorspronkelijke parameters voor alle mogelijke R in deze kamer gegeven:

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
Totaal	€761,19		€730,38		€701,82		€350,05	

Tabel D.14: $\alpha = 98\%$, $B = €32,50$, $J = €32,50$, $K = €1,-$

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€86,58	99,99%	€83,45	99,98%	€80,99	99,85%	€80,93	99,10%
14611	€13,30	100,00%	€9,75	99,99%	€6,33	99,97%	€5,54	99,10%
14719	€15,09	99,99%	€11,55	99,98%	€8,25	99,96%		
14730	€76,47	99,99%	€73,33	99,98%	€70,76	99,85%	€70,53	99,10%
14734	€15,05	100,00%	€11,47	100,00%	€7,94	99,99%	€6,27	100,00%
14758	€26,84	100,00%	€23,27	100,00%	€19,77	99,99%	€18,50	99,60%
44842	€342,20	99,99%	€338,88	99,98%	€336,07	99,98%		
44846	€107,26	99,99%	€104,11	99,99%	€101,17	99,94%	€100,54	99,90%
44847	€79,40	99,99%	€76,13	99,99%	€73,06	99,94%	€72,03	99,90%
Totaal	€762,20		€731,95		€704,34		€354,35	

Tabel D.15: $\alpha = 98\%$, $B = €250,-$, $J = €32,50$, $K = €1,-$

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€86,37	99,69%	€83,06	99,64%	€80,25	99,12%	€79,62	98,38%
14611	€13,23	99,95%	€9,65	99,94%	€6,14	99,77%	€4,47	98,96%
14719	€14,97	99,91%	€11,41	99,92%	€7,93	99,55%		
14730	€76,29	99,78%	€72,95	99,64%	€70,06	99,12%	€69,25	98,38%
14734	€15,03	99,97%	€11,44	99,96%	€7,88	99,88%	€6,24	99,64%
14758	€26,80	99,96%	€23,22	99,92%	€19,70	99,85%	€18,04	99,60%
44842	€341,84	99,60%	€338,47	99,28%	€335,74	98,53%		
44846	€107,01	99,75%	€103,68	99,40%	€100,52	98,38%	€100,13	99,01%
44847	€79,20	99,85%	€75,85	99,65%	€72,63	98,74%	€71,71	99,01%
Totaal	€760,73		€729,73		€700,86		€349,46	

Tabel D.16: $\alpha = 98\%$, $B = \text{€}15,-$, $J = \text{€}32,50$, $K = \text{€}1,-$

Product	$R = 1/3$	Service-level	$R = 1/2$	Service-level	$R = 1$	Service-level	$R = 2$	Service-level
14604	€86,10	98,78%	€82,77	98,84%	€80,12	99,12%	€79,49	98,38%
14611	€13,14	99,10%	€9,56	99,16%	€6,01	98,58%	€4,35	98,38%
14719	€14,88	99,51%	€11,27	98,62%	€7,78	98,75%		
14730	€76,05	98,78%	€72,69	98,84%	€69,93	99,12%	€69,13	98,38%
14734	€14,97	98,34%	€11,38	98,73%	€7,81	98,49%	€6,17	98,76%
14758	€26,71	98,50%	€23,12	98,48%	€19,61	98,54%	€17,99	98,23%
44842	€341,44	98,55%	€338,06	98,02%	€335,52	98,53%		
44846	€106,66	98,02%	€103,36	98,58%	€100,28	98,38%	€100,06	99,01%
44847	€78,96	98,72%	€75,54	98,06%	€72,44	98,38%	€71,63	99,01%
Totaal	€758,91		€727,76		€699,5		€348,83	

Tabel D.17: $\alpha = 98\%$, $B = \text{€}0,-$, $J = \text{€}32,50$, $K = \text{€}1,-$

CODE

67

```

end

end
for k=1:N-1
51   c=0;
      for j=1:k
          c=c+A(k,j);
          A(k,N)=1-c;
      end
56   end
      c=0;
      for j=1:N-1;
          c=c+A(N,j);
          A(N,N)=1-c;
61   end

end

ewk=[A' - eye(size(A)); ones(1,length(A))] \ [zeros(length(A)
66   ,1);1]; %evenwichtskansen

bestel=zeros(N,4*S+1);
tekort=zeros(N,4*S+1);
product=zeros(N,4*S+1);
71   voorraad=zeros(N,4*S+1);
      review=zeros(N,4*S+1);
      for a=s+1:S
          for b=-3*S:a

              if b<0 %%% zijn er tekorten?
76   F=1;
              else
                  F=0;
              end

81   Z=ceil(abs(b)/s); %%% parameters bepalen
          x=Z*s-abs(b);
          y=R*(S-x)/(a-b);

86   if (b<s+1)
              bestel(a-s,b+3*S+1)=K;
          else
              bestel(a-s,b+3*S+1)=0;
          end

91   tekort(a-s,b+3*S+1)=F*Z*B;

          product(a-s,b+3*S+1)=(a-b)*prijs;

          if (a==b)
96   voorraad(a-s,b+3*S+1)=a*R*h;
          else
              voorraad(a-s,b+3*S+1)=(a*a*R/(2*a-2*b)+F*(Z-1)*s*s*R/(2*
                  a-2*b)+x*y+(s-x)*y/2)*h;
          end

101  review(a-s,b+3*S+1)=J;

end

```

```

106         end
        %variabelen=[a, b, R, s, S];
        totaal=bestel+tekort+product+voorraad+review;

111        %%% verwachte totale kosten %%%
        ETK2=0;

        for a=s+1:S
            ETK1=0;
            for b=-3*S:a
116                ETK1=ETK1+beta((a-b+1))*(totaal(a-s,b+3*S+1));

                %fprintf(fid,'%d %d %f %f \r\n',a,b,ETK1,beta(a-b+1),
                    ,totaal(a-s,b+3*S+1));

            end
            ETK2=ETK2+ETK1*ewk(a-s);

121            %fprintf(fid, 'R=%d, s=%d, S=%d, Daarbijhorende kosten=%f,
                \r\n',R,s,S,ETK2);

        end
        ETK3=ETK2/R;

126        %servicelevelcheck
        serv2=0;
        for a=s+1:S
            serv1=0;
            for b=-3*S:-1
131                serv1=serv1+beta(a-b+1);
            end
            serv2=serv2+ewk(a-s)*serv1;
        end
        serv3=1-serv2;
136        %[s, S, serv2]
        %fprintf(fid,'%d %d %f \r\n',s,S,serv3);

        if ((ETK3<minETK3)&&(ETK3>0)&&(s<S-1)&&(serv3>=alpha))
141        %if ((ETK3<minETK3)&&(ETK3>0)&&(s<S-1))
            minETK3=ETK3;
            minR=R;
            mins=s;
            minS=S;
            minserv3=serv3;
146            [minR, mins, minS, minETK3, minserv3];
        else
            minETK3=minETK3;
        end

151        %fprintf(fid, ' %d %d %d %f %f \r\n',R,s,S,ETK3,serv3);

        end
    end
    [minR, mins, minS, minETK3];

156    %fprintf(fid, 'R=%d, s=%d, S=%d, Daarbijhorende kosten=%f, Servicelevel: %f
        \r\n\r\n',minR,mins,minS,minETK3,minserv3);
    fprintf(fid, '%d %f %d %f %d %d %d %f %f \r\n',productID, alpha,D, prijs ,
        aantalproducten, minR, mins, minS, minETK3, minserv3);
    %fprintf(fid,'%f \r\n',minserv3);
end

```

```
161     %fprintf(fid, '\r\n\r\n');  
end  
    fclose(fid);  
end
```

code.m

