

MASTER

Een dynamisch model van een produkt-proces-keten

Eijsink, F.H.M.

Award date:
1997

[Link to publication](#)

Disclaimer

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

General rights

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

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

Een dynamisch model van een produkt-proces-keten

F.H.M. Eijsink

Verslag van een afstudeerproject verricht bij de vakgroep
Systeem- en Regeltechniek, mei 1996 - maart 1997

Begeleider: Dipl.-Phys. U. Kleineidam
Afstudeerhoogleraar: Prof. dr. ir. J.J. Kok

Met dank aan Dipl.-Phys. U. Kleineidam en dr. ir. A.J.D. Lambert voor de vele adviezen.

SUMMARY

A dynamic model of a product process chain

The goal of this graduation project has been the making of a chain model for a product process chain, with special attention to the economic and ecological aspects. The graduation project is part of a larger project, started by the faculties of Technische Natuurkunde (Applied Physics) and Bedrijfskunde (Industrial Engineering) at the Technische Universiteit Eindhoven, which aims at making an instrument that supports decision making in product chains based upon the methods used in system and control theory.

At first inquiries have been made into the relevance of product process chains for logistic, economic and environmental research. Some other aspects of these chains were also studied, such as different levels of aggregation and the focussing on one specific product flow. To give an impression of the problems that exist in chains in reality, two case studies have been undertaken for two businesses in the packaging industry in the Netherlands. Very important for these businesses was the policy of the Dutch government concerning emissions and waste. The ministry aims at a continuous reduction of waste by prevention and materials recycling and it stimulates the industry to come to an agreement with all members in the product chain for a common policy to reach these goals.

With the knowledge of product process chains and the actual situation in the packaging industry as a reference at the background, a simple theoretical product process chain has been defined and was given the name 'elementary chain'. This small chain can be an element of a larger realistic chain. The members of the elementary chain as well as all the interested parties outside the chain have been analysed, and their most important influences upon the conduct of the good flows in the chain have been determined and defined as inputs. Two criteria were defined to assess the achievement of the chain. The first one focusses on the costs that are made to satisfy the actual demand and the second one focusses on the environmental effects that are caused by the chain in operation.

These analyses have been the base for a dynamic discrete time model of the elementary chain. All equations are based on the continuity of goods flows. There was a need of a connection between the level of production in a period, the level of demand and the level of goods being prepared for reuse. For this connection four different production decision systems were studied. Several logistic simulations were used to give a first idea of the dynamic conduct of the chain, the influences of the inputs and the differences between the four production decision systems. Some interesting aspects concerning fluctuations of the level of inventory and the level of productions have been stipulated.

The two criteria, total costs in the chain and the total of all environmental effects, were connected with the dynamic model by linking the criteria to the goods flows in the chain. Therefore cost drivers have to be determined for as well the costs (as is often done in cost-accounting) as the environmental effects.

For verification one of the two studied businesses in the packaging industry has been chosen for further investigations. This business produces cardboard packagings. There was a lack of information about proper cost drivers for the costs and the environmental effects, so several estimates were made. After some small modifications of the model of the elementary chain a simulation shows the dynamic conduct of the costs and the environmental effects.

The established model of the elementary chain can in future easily be enlarged. Investigations to the effects of linearisation and the possibility of optimisation are recommended. The relevance of instruments that support decision making in industries by taking into consideration the entire chain instead of a part of it, will increase because of a growing need for cooperation between members of a product chain in goods flow management, in quality management and in the management of environmental effects.

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING	3
1.1 DOELSTELLING VAN HET PROJECT	3
1.2 DE PLAATS VAN DIT AFSTUDEERPROJECT	3
2. SYSTEEMLEER IN DE BEDRIJFSKUNDE	5
3. PRODUKT-PROCES-KETENS	7
3.1 INLEIDING.....	7
3.2 PRODUKT-PROCES-KETENS.....	7
3.3 AGGREGATIENIVEAUS	8
3.4 FOCUS OP ÉÉN PRODUKTSTROOM	9
3.5 KETENGRENZEN	10
3.6 KERNPUNTEN	11
4. TWEE CASE-STUDIES	12
4.1 INLEIDING.....	12
4.2 DE REGELING VERPAKKING EN VERPAKKINGSAFVAL	12
4.2.1 Twee richtlijnen.....	12
4.2.2 De stand van zaken en de doelstelling	13
4.2.3 Hoofdpijnen	14
4.3 CASE 1: ALASKA PRODUCTS B.V.	14
4.3.1 Algemene beschrijving van het bedrijf.....	14
4.3.2 De keten van de haspels.....	15
4.3.3 Alternatieven voor verwerking.....	15
4.4 CASE 2: CARTA	19
4.4.1 De keten van de kartonnen verpakkingen	19
4.5 TERUGBLIK.....	21
5. DE ELEMENTAIRE KETEN.....	22
5.1 INLEIDING.....	22
5.2 HET SYSTEEM.....	22
5.3 DE ACTOREN IN DE KETEN	23
5.4 DE TOTALE KETENKOSTEN.....	24
5.5 DE OMGEVING VAN DE KETEN	26
5.5.1 Het politieke proces.....	26
5.5.2 De milieu-effecten	27
5.6 DE SYSTEEMBENADERING	29
6. MODELVORMING.....	31
6.1 INLEIDING.....	31
6.2 VIER MOGELIJKE STRATEGIEËN	31
6.3 HET DYNAMISCH GEDRAG	32
6.3.1 Belangrijkste aannamen.....	32
6.3.2 De duur van een periode.....	33
6.3.3 De vergelijkingen	33
6.3.4 Productiesystemen.....	35
6.4 TOESTANDSREPRESENTATIE	38
6.4.1 Methode.....	38
6.4.2 Toepassing op een keten met een JIT-productiesysteem.....	39
6.4.3 Een voorbeeld	40
6.5 TERUGBLIK.....	42

7. ENKELE LOGISTIEKE SIMULATIES.....	43
7.1 INLEIDING.....	43
7.2 HET PRODUKTIESYSTEEM BUITEN BESCHOUWING GELATEN	43
7.3 EEN SITUATIE ZONDER HERGEBRUIK.....	44
7.4 EEN SITUATIE WAARBIJ HET HERGEBRUIK LANGZAAM TOENEEMT	45
7.5 GRENZEN VAN VOORRAADCONTROLE VOOR HET JIT-SYSTEEM.....	46
7.6 MINDER SCHOMMELINGEN IN DE PRODUKTIE	48
7.7 TERUGBLIK.....	49
8. DE CRITERIA.....	51
8.1 INLEIDING.....	51
8.2 HET CRITERIUM VAN DE PRODUCENT	52
8.3 HET CRITERIUM VAN DE OVERHEID	53
8.4 TERUGBLIK.....	54
9. SIMULATIE VOOR CARTA	55
9.1 INLEIDING.....	55
9.2 EEN KETENMODEL VOOR CARTA	55
9.3 DE KOSTEN EN DE MILIEU-EFFECTEN IN DE KETEN	57
9.3.1 De kosten.....	57
9.3.2 De milieu-effecten	58
9.4 SIMULATIE MET CONSTATE VRAAG EN STIJGENDE HERVERWERKING.....	60
9.5 SIMULATIE MET LANGZAAM STIJGENDE HERVERWERKING EN 'CONJUNCTUUR'	62
9.6 TERUGBLIK.....	63
10. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	65
10.1 INLEIDING.....	65
10.2 KANTTEKENINGEN.....	65
10.2.1 De vraag als niet-manipuleerbare input.....	65
10.2.2 Het achterwege laten van transactieprizen in het economisch criterium	65
10.2.3 De keten als open systeem.....	66
10.2.4 De inputs van de producent	66
10.2.5 Kostendrijvers zijn beperkt geldig.....	66
10.2.6 Subjectieve totstandkoming van de milieu-index	67
10.2.7 Informatiegebrek.....	67
10.3 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	67
10.3.1 Uitbouwen van de elementaire keten	67
10.3.2 Linearisatie	67
10.3.3 Optimalisatie.....	68
10.3.4 Onderzoek naar relevante grootheden in de praktijk.....	68
10.3.5 Stijgende relevantie van onderzoek naar ketens	69
11. LITERATUUR.....	70

APPENDIX A: *Procesmodellering met Petri-netwerken: een kennismaking*

APPENDIX B: *Analyse van hiërarchische systemen: Multilayer Systems*

APPENDIX C: *De interne toestand van de stations consumptie en recycling*

APPENDIX D: *Toestandsvergelijkingen*

APPENDIX E: *Simulaties met verschillende produktiesystemen*

APPENDIX F: *Een methode voor optimalisatie met hiërarchie*

1. Inleiding

1.1 Doelstelling van het project

In het kader van het streven naar een duurzame ontwikkeling zal in de toekomst een bedrijf sterker afhankelijk worden van andere deelnemers in de produktketen. De interactie tussen de ketendeelnemers zal vooral groeien door hergebruik van afgedankte producten of herverwerking van deze producten tot een (secundaire) grondstof. Deze terugkoppeling van de materiaalstroom maakt de produktketen gecompliceerder, en maakt economische optimalisatie moeilijker. Niettemin is er door de toegenomen onderlinge interactie tussen de ketendeelnemers een grotere behoefte ontstaan aan optimalisatie over de gehele keten in plaats van een suboptimalisatie van een individuele ketendeelnemer. Deze optimalisatie over de gehele keten wordt ook door de overheid bepleit met betrekking tot het milieubeleid. Bij het nemen van een beslissing wordt het voor een bedrijf dus belangrijker te kunnen voorspellen wat de gevolgen van deze beslissing zijn elders in de keten.

In het kader van het streven naar Technologie voor Duurzame Ontwikkeling (TDO) is aan de Technische Universiteit Eindhoven een project gestart met als doel het maken van een ketenmodel dat kan dienen ter ondersteuning van bedrijven en bedrijfstakken bij beleidsontwikkeling voor de lange termijn. Het model genereert niet alleen kennis voor de bedrijven die tot de bedrijfstak behoren, maar ook voor andere belanghebbenden, zoals de overheid. Het ketenmodel kan dienst doen als instrument bij beleidsvoering en wordt gebruikt voor het verkrijgen van inzicht in de effecten van economische, technologische en maatschappelijke veranderingen die zich doorgaans geleidelijk en over een langere tijd voordoen. Een uitdagend aspect van het onderzoek is vast te stellen in hoeverre door de combinatie van ketenanalyse en systeemtheorie een in de praktijk toepasbaar dynamisch simulatiemodel van een produktketen kan worden ontwikkeld. Het project wordt ondersteund door de sectie Energie en Milieu bij de vakgroep Fabricagetechnologie van de faculteit Technologie Management en de vakgroep Systeem- en Regeltechniek van de faculteit Technische Natuurkunde.

1.2 De plaats van dit afstudeerproject

Het TDO-project is begonnen in mei 1996. In die periode heb ik als belangrijkste issue een ondersteunend literatuur-onderzoek verricht naar de toepasbaarheid van Petri-netten (appendix A). Vanaf juli 1996 is het doel van mijn afstudeerproject geweest het opstellen van een ketenmodel vanuit het formalisme van de produkt-proces-keten, met daarbij aandacht voor de economische belangen van de keten en de ecologische belangen van de omgeving van de keten.

Voor het opstellen van het ketenmodel was in eerste instantie inzicht nodig in het raamwerk van produkt-proces-ketens, de praktijksituatie van produktketens en de aard en plaats van de kosten en de milieu-effecten die binnen de keten ontstaan. Daarom bevatten de eerste hoofdstukken van dit verslag veel informatie van bedrijfskundige of maatschappelijke aard. In hoofdstuk 2 wordt eerst stilgestaan bij eerdere toepassingen van systeemtheorie in de bedrijfskunde. Daarna wordt in hoofdstuk 3 uitgelegd wat produkt-proces-ketens zijn, hoe ze worden weergegeven en wat belangrijke aspecten hierbij zijn, zoals bijvoorbeeld aggregatieniveaus en ketengrenzen. In hoofdstuk 4 wordt de praktijksituatie van twee bedrijven in de verpakkingsindustrie beschreven. Hierbij wordt ook de rol van de overheid toegelicht.

Met de inzichten van de eerste hoofdstukken wordt in hoofdstuk 5 een eenvoudige produkt-procesketen opgesteld, en wordt de rol van de deelnemers en belanghebbenden (met name de overheid) geanalyseerd en vastgelegd. Dit hoofdstuk vervult een soort scharnierfunctie tussen het eerste bedrijfskundige en maatschappelijke gedeelte en het daaropvolgende systeemtheoretische gedeelte.

Dankzij de analyses en hypothesen van hoofdstuk 5 kan het systeem 'keten' beschreven worden volgens het formalisme van de systeemtheorie. Met dit formalisme wordt in hoofdstuk 6 een dynamisch model opgesteld dat de stromen in de keten beschrijft. Hierbij is het nodig gebruik te maken van enige kennis van produktiesystemen uit de logistiek. In hoofdstuk 7 worden ter verificatie enkele simulaties gepresenteerd; bovendien wordt hier de aandacht gevestigd op enkele opmerkelijke (logistieke) verschijnselen die zich voordoen als gevolg van de teruggekoppelde materiaalstroom. In hoofdstuk 8 worden het economische en het ecologische criterium besproken, die het ketenmodel koppelen aan de doelstelling. Vervolgens is in hoofdstuk 9 voor één van de twee bedrijven die beschreven werden in hoofdstuk 4, een simulatie uitgevoerd met aandacht voor deze beide criteria. Ten slotte volgen in hoofdstuk 10 enkele kanttekeningen bij de modellen, en enkele conclusies en aanbevelingen voor het vervolg van het project.

2. Systeemleer in de bedrijfskunde

Iedere wetenschap bestudeert een systeem van één of andere soort. De bedrijfskunde vormt daar geen uitzondering op. Er zijn echter verschillende manieren om systemen te bestuderen. Er zijn reductio-nistische wetenschappers, die het probleem opsplitsen in kleinere en nog kleinere eenheden, waarbij men meent de toekomst van het gehele systeem te kunnen beschrijven als alle werkingen op en reacties van de verzameling van alle elementaire delen bekend zijn. Tegenover deze reductionistische stroming bestaat de opvatting dat het collectief van delen eigenschappen heeft die niet geheel en al verklaard kunnen worden door de gedragingen en wisselwerkingen van de elementaire delen op zich; deze stroming wordt holisme genoemd. Het devies van de holistische wetenschappers kan krachtig omschreven worden als: “Het geheel is meer dan de som der delen.” [1]. Deze laatste benadering, vaak aangeduid als de systeembenadering, zou volgens de voorstanders ervan een betere houding zijn tegenover wetenschappelijke vraagstukken met een biologische, psychologische, sociologische, economische of bedrijfskundige aard

Het feit dat in de laatste decennia de systeembenadering succesvol is geweest in een aantal zo verschillende vakgebieden heeft bij een aantal wetenschappers het vermoeden doen rijzen dat [2]

- er bepaalde concepten en structurele principes zijn die voor systemen van veel soorten gelden.
- er bij het modelleren strategieën zijn, die voor veel soorten systemen werken.

Deze inzichten hebben ertoe geleid dat er een tweetal hoofdstromingen zijn ontstaan in de systeemleer [3].

1. De filosofische systeemleer. Deze kent twee (sub-)stromingen:

- de organistische stroming: “Een systeem is een organisme: het leeft, maakt groeistadia door en wil overleven.”
- de General Systems Theory (GST): “De wereld is een systeem van systemen. Het zoeken is naar een algemeen geldige theorie die kan worden toegepast op elk systeem.”

2. De instrumentele systeemleer. Ook hierin zijn twee (sub-)stromingen te onderscheiden:

- de axiomatische stroming: “De systeemleer is een modellenbouwdoos. Dat is handig voor het analyseren van systemen.”
- de methodische stroming: “De systeemleer is een probleemoplossingsmethode.”

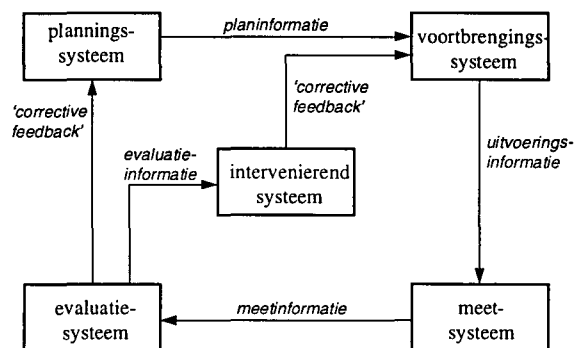
Het onderscheid tussen de twee instrumentele stromingen is belangrijk, maar ze zijn niet tegenstrijdig. Meestal worden systemen onderzocht door gebruik te maken van modellen (de axiomatische stroming) met als doel een probleem op te lossen (de methodische stroming) of een systeem optimaal te regelen.

De toepassingen van systeemleer in de bedrijfskunde kunnen worden ondergebracht in drie van de vier genoemde stromingen. De organistische stroming kan buiten beschouwing worden gelaten.

De GST is in wezen losgegroeid van de aard van de systemen; ze richt zich immers op algemeen geldende fundamentele en structurele eigenschappen van systemen. Maar wanneer deze eigenschappen in kaart zijn gebracht, kunnen ze worden toegepast op bestaande concrete systemen, zoals bijvoorbeeld het systeem ‘Industrie’. De industriemodellen van Forrester [4], later gecombineerd met voorspellingen over de groei van de wereldbevolking [5], zijn zeer beroemd en invloedrijk geweest. Andere schrijvers van de GST-stroming hebben getracht een algemeen geldend wiskundig formalisme

op te stellen, zoals bijvoorbeeld Mesarovic [6]. Zijn formalisme kan nuttig zijn bij het bestuderen van hiërarchie in bedrijven en andere systemen (zie appendix B).

De axiomatische stroming komt in de bedrijfskunde het meest voor, omdat de bedrijfskunde in sterke mate probleemgericht is. Bij bijvoorbeeld inrichtingsproblemen worden systemen gedefinieerd met duidelijk aangegeven systeemgrenzen. Vaak gaat veel aandacht uit naar de interacties tussen subsystemen. De toepassing van de systeemleer wordt vaak afgesloten met een schematisch weergegeven model van de werkelijkheid, waarin verbanden worden aangegeven; er is dan geen sprake van een wiskundig model, maar van bijvoorbeeld een organisatiekundig model. Hierin staan de wisselwerkingen en procedures binnen het totaalsysteem organisatie of een subsysteem binnen die organisatie voorop. Ter illustratie is in Figuur 1 een voorbeeld gegeven van een 'management control'-systeem [7].



Figuur 1: Een organisatieschema dat de ontwerpstructuur van een 'management control'-systeem uitbeeldt.

De methodische stroming komt in de bedrijfskunde minder vaak voor dan de axiomatische stroming. Met name in de operationele research en in de logistiek wordt er onderzoek gedaan naar een kwantitatieve ondersteuning van beslisproblemen. Deze problemen zijn soms gelieerd aan de problemen die in de wiskunde worden bestudeerd bij takken als 'Besliskunde' en 'Operationele statistiek'.

Het onderzoek naar het gedrag van een produkt-proces-keten bevindt zich op het grensvlak van de axiomatische stroming en de methodische stroming. Ideeën uit de GST kunnen van pas komen, maar het accent zal liggen op de twee stromingen uit de instrumentele systeemleer. Allereerst wordt een model voor een produkt-proces-keten met concepten uit de axiomatische systeemleer ontworpen. Vervolgens dient de stap gezet te worden naar het wiskundig formuleren van de relaties uit het ketenmodel, om - passend binnen het kader van de methodische stroming - een kwantitatieve analyse te kunnen verrichten.

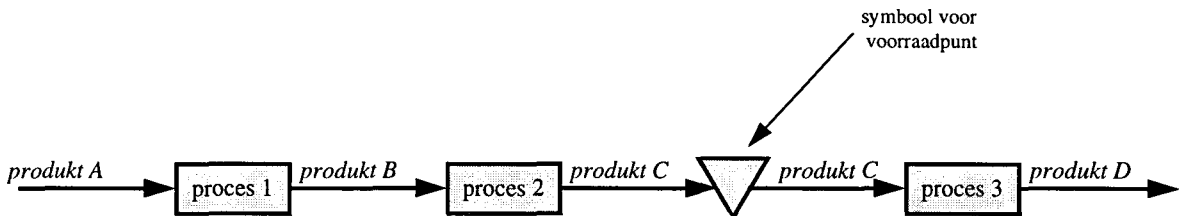
3. Produkt-proces-ketens

3.1 Inleiding

Het doel van het onderzoek is te komen tot een (wiskundige) beschrijving van een produkt-proces-keten, met daarbij aandacht voor de economische en ecologische effecten. In dit hoofdstuk wordt daarom ter inleiding op die beschrijving een algemene beschouwing gegeven over produkt-proces-ketens (paragraaf 2), met aandacht voor aspecten als aggregatieniveaus (paragraaf 3), focus op één produktstroom (paragraaf 4), en ketengrenzen (paragraaf 5). In paragraaf 6 worden tot slot kort de kernpunten van dit hoofdstuk geresumeerd.

3.2 Produkt-proces-ketens

In de bedrijfskunde wordt vaak gewerkt met produkt-proces-ketens. Dit begrip verwijst naar een opeenvolging van processen met produktstromen daartussen. In ieder proces ondergaat het produkt een transformatie. In veel produkt-proces-ketens worden ook voorraadpunten aangegeven. Welbeschouwd ondergaat het produkt in een voorraadpunt geen verandering van vorm of hoedanigheid, maar het produkt wordt 'getransformeerd in de tijd'. De voorraadpunten worden aangegeven met een op z'n punt staande gelijkbenige driehoek. De pijlen in de keten komen overeen met een verplaatsing van het produkt van het ene proces naar het andere. Een 'transformatie in plaats', of 'transportatie'. In een produkt-proces-ketens worden dus alle transformaties die een produkt ondergaat, in vorm of hoedanigheid, in tijd en in plaats schematisch in kaart gebracht.



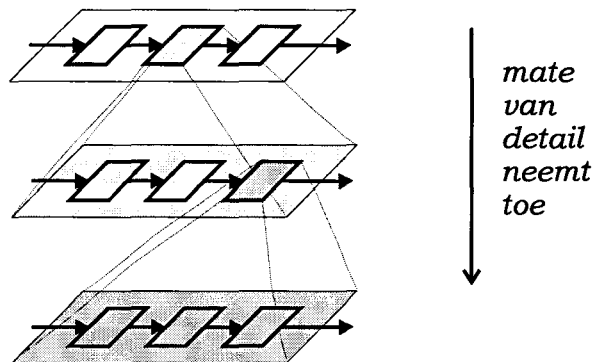
Figuur 2: Voorbeeld van een produkt-proces-keten

Produkt-proces-ketens op bedrijfsniveau hebben meerdere toepassingen. Ze zijn voor bijvoorbeeld de logistiek een nuttig middel om te zien hoe de produktstromen lopen tussen meerdere bewerkingscentra. Maar ook voor een econoom is een produkt-proces-keten een handig middel om overzicht te verkrijgen over de manier waarop de toegevoegde waarde wordt opgebouwd. De ketens worden ook steeds vaker gebruikt bij het in beeld brengen van milieu-effecten. Voor ieder proces zijn namelijk hulpstoffen en energie nodig, en altijd ontstaan daarbij afval en emissies. Uit deze drie voorbeelden blijkt dat produkt-proces-ketens een nuttig instrument zijn voor analyses van verschillende aspecten.

Produkt-proces-ketens hoeven zich niet te beperken tot de activiteiten van één bedrijf. De goederenstromen overschrijden van nature al de bedrijfsgrenzen. Welbeschouwd zijn die bedrijfsgrenzen slechts afbakeningen van verantwoordelijkheden. Daarom is het heel goed mogelijk om een produkt-proces-keten te maken van wat in de economie een bedrijfskolom heet, of van een deel daarvan. Vaak wordt dan gekozen voor een hoger aggregatieniveau dan het bedrijfsniveau om zo de complexiteit te reduceren.

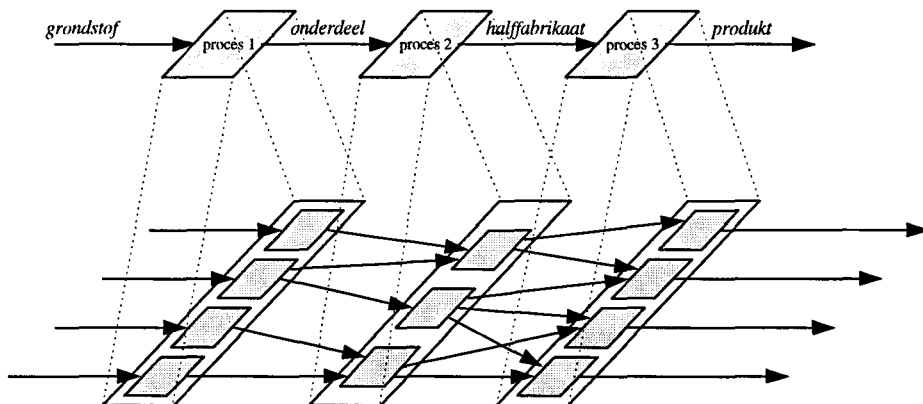
3.3 Aggregatieniveaus

Het is mogelijk om een keten te analyseren op meerdere niveaus. Van een fabricageproces zou men een produkt-proces-keten kunnen maken met een groot aantal details. Alle handelingen en alle verplaatsingen kunnen worden weergegeven. Voor een operationeel manager van een afdeling kan dat handig zijn, maar de algemeen directeur van het bedrijf is waarschijnlijk helemaal niet in alle details geïnteresseerd. Daarom worden er vaak opeenvolgende processen samengevoegd tot één proces. Zo kan het proces 'assemblage auto' bestaan uit alle handelingen die bij de assemblage van een auto achtereenvolgens worden verricht. Dit proces kan weer een deelproces zijn van het proces 'productie auto'. De keuze van het detailniveau bij het opstellen van de produkt-proces-keten heeft te maken met het doel dat de onderzoeker voor ogen staat. Het bundelen van opeenvolgende (seriële) processen, wat leidt tot een hoger aggregatieniveau, is aanschouwelijk gemaakt in Figuur 3.



Figuur 3: Schematische weergave van het samenbundelen van seriële processen, wat leidt tot hogere aggregatieniveaus.

Met de keuze van een hoog aggregatieniveau is het mogelijk de produktstromen van één produkt op een overzichtelijke wijze zichtbaar te maken. In werkelijkheid echter komt de monopoliesituatie, waarbij het produkt maar door één fabrikant wordt geleverd, of de grondstof door één grondstofleverancier, zelden voor. Er zijn dikwijls meerdere aanbieders van een produkt of grondstof, en meerdere vragers. In Figuur 4 is een produkt-proces-keten met parallelle processen afgebeeld. De parallelle processen van het lagere aggregatieniveau mogen gebundeld worden omdat het identieke bewerkingen betreft.

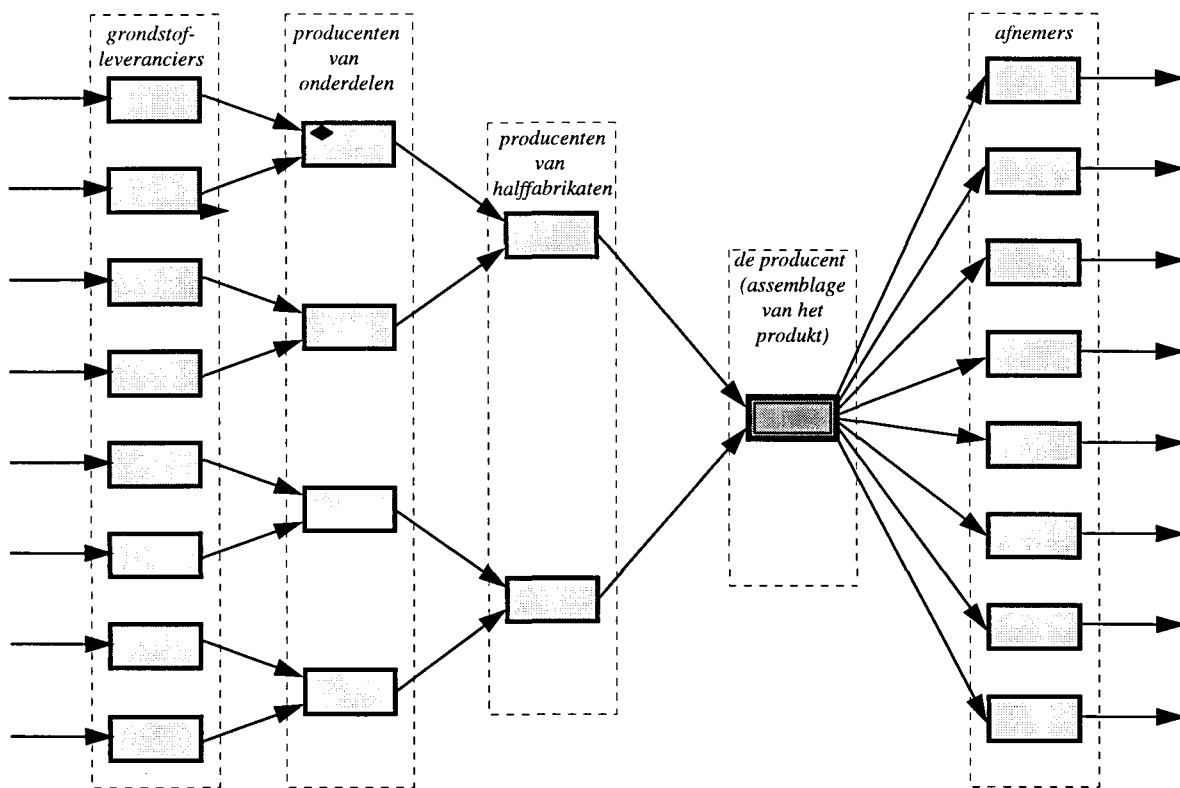


Figuur 4: Een produkt-proces-keten met twee aggregatieniveaus. Hier is sprake van bundeling van parallelle processen.

In Figuur 3 en in Figuur 4 is schematische weergegeven wat bundeling van seriële processen, en wat bundeling van parallelle processen inhoudt. Het komt vaak voor dat er in een produkt-proces-keten sprake is van beide soorten bundelingen.

3.4 Focus op één produktstroom

Wanneer het hoogste aggregatieniveau van Figuur 4 wordt bekeken, wekt dat de verwachting dat er maar één stroom bestaat: een grondstof wordt omgezet in een onderdeel, dat vervolgens zelf weer wordt omgezet in een halffabriek. Dit halffabriek levert tenslotte een produkt op. Het moge duidelijk zijn dat dit niet overeenstemt met de werkelijkheid. Daar worden immers dikwijls meerdere grondstoffen samengevoegd tot een onderdeel, en meerdere onderdelen vormen samen een halffabriek. Bovendien zijn er - het woord zegt het al - meerdere halffabrikaten nodig om een produkt te vormen. Bij de totstandkoming van een produkt bestaat er dus geen eenvoudige één-op-één relatie over de gehele keten. Er is meestal sprake van een convergerend patroon; in het eindprodukt komen meerdere grondstoffen, onderdelen en soms enkele halffabrikaten bijeen. Een denkbeeldige keten van een produkt is de keten die te zien is in Figuur 5.

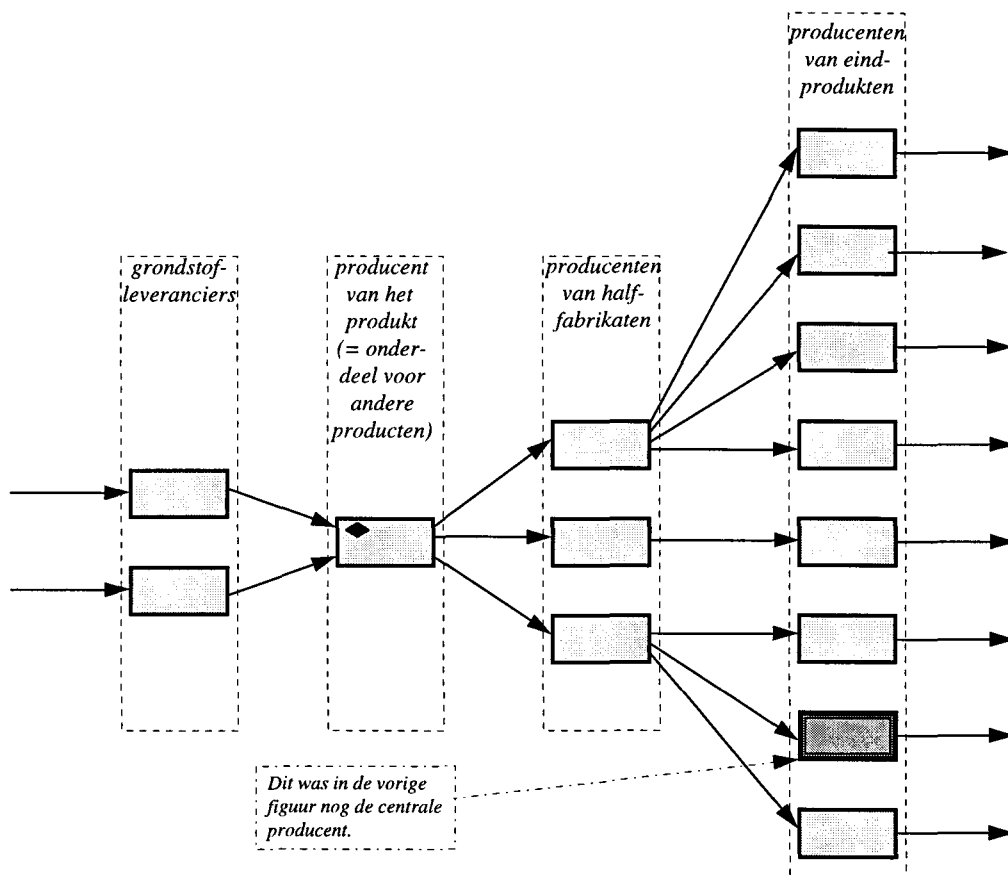


Figuur 5: De afgebeelde keten wordt gekenmerkt door een convergerend productiepatroon. Het produkt dat centraal staat in deze keten komt tot stand door assemblage van een tweetal halffabrikaten, die ieder weer uit twee onderdelen bestaan. Ieder onderdeel bestaat op zijn beurt weer uit twee grondstoffen. De producent, rondom wie de keten is opgebouwd, is iets donkerder gekleurd. De reden voor het aanbrengen van het kleine ruitje in de bovenste onderdelenproducent wordt in de tekst gegeven.

In de keten van Figuur 5 worden alleen de stromen meegenomen die leiden tot het produkt waar de keten op focusteert. Het is dus heel goed mogelijk dat bijvoorbeeld de bovenste grondstofleverancier uit de keten meer afnemers heeft dan die ene afgebeelde onderdelenproducent (met het ruitje). Deze afnemers zijn echter niet weergegeven omdat ze niet in contact staan met de producent van het pro-

dukt. Dit impliceert dat de vorm van de keten bepaald wordt door de keuze van het produkt dat centraal wordt gesteld! Iedere producent, leverancier of afnemer uit Figuur 5 kan onderdeel zijn van andere ketens, behalve die ene (iets donkerder gekleurde) producent, die het voor deze keten gekozen produkt maakt. Zijn relaties zijn afgebeeld.

Bij het opstellen van de keten dient dus duidelijk gedefinieerd te worden op welk produkt wordt gefocuseerd, omdat dit de vorm van de keten mede bepaalt. Indien er gekozen was om de keten op te stellen rondom het onderdeel dat de bovenste onderdelenproducent maakt (die met het ruitje in Figuur 5), dan had de keten er bijvoorbeeld als volgt uit kunnen zien:

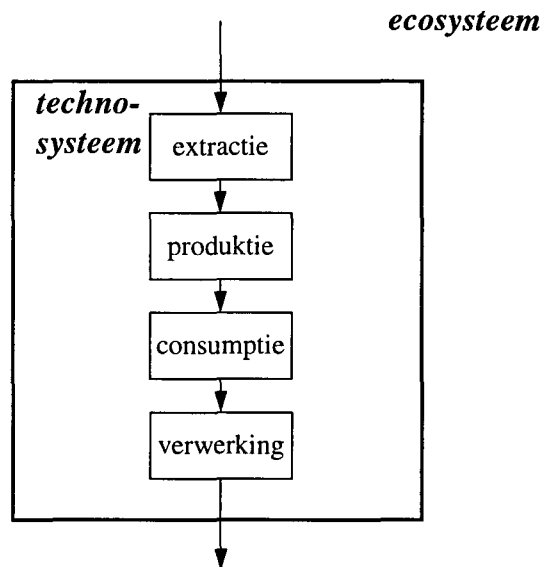


Figuur 6: De keten van een onderdelenproducent. Zijn onderdelen worden door een achttal producenten van ‘eindproducten’ gebruikt. Eén daarvan was de hoofdproducent (donkerder gekleurd) van de keten uit Figuur 5.

3.5 Ketengrenzen

In de vorige paragraaf is duidelijk gemaakt dat de vorm van de keten bepaald wordt door het produkt dat in de keten centraal staat. In Figuur 5 en in Figuur 6 beginnen de stromen ‘opeens’ met de grondstofleveranciers. Het einde van de keten ligt in Figuur 5 bij de afnemers van het produkt, in Figuur 6 echter bij producenten. Geen van beide ketens stemt overeen met de werkelijkheid, waarin de materiaalstromen doorstromen “tot op de afvalberg”. Een materiaal ondergaat ‘tijdens zijn economische leven’ grofweg gezegd drie fasen: grondstof, produkt en afval. Hergebruik of herverwerking kunnen er voor zorgen dat het materiaal lang in de produkt-fase blijft. Afgedankte produkten kunnen immers weer opnieuw als grondstof worden gebruikt voor produkten. Dat maakt het geheel nog ingewikkelder: een kilogram grondstof, die aan de natuur wordt onttrokken, kan terecht komen in een groot aan-

tal produkten, die ieder na consumptie hergebruikt kunnen worden op tal van nieuwe manieren in weer andere produkten en dus in andere produktketens. Om te komen tot een bestudeerbaar geheel zou men één stof van grondstof tot afval door tal van seriële en parallelle ketens moeten volgen. Dit volgen van één stof van grondstof tot afval wordt gedaan binnen de Stofstroomanalyse [8]. Hierbij onderscheidt men net als in de Levenscyclusanalyse, waar het niet om één stof maar om één produkt gaat, een allesomvattend ecosysteem, met daarbinnen een technosysteem. Het technosysteem kent vier stadia: extractie, productie, consumptie en verwerking.



Figuur 7: Het technosysteem als deelsysteem van het ecosysteem.

Dit onderzoek richt zich echter niet op de gehele levenscyclus van een bepaalde stof of een bepaald produkt, maar op het gedrag van één enkele bouwsteen daarvan: een keten. De natuurlijke uiteinden van de levenscyclus, grondstof en afval, hoeven niet aan iedere keten vast te zitten. Dat impliceert dat er voor het afbakenen van een keten ergens grenzen moeten worden getrokken. Het is daarom belangrijk dat duidelijk wordt aangegeven waar de systeemgrenzen van de keten zich bevinden.

3.6 Kernpunten

In de diverse paragrafen van dit hoofdstuk zijn een aantal kenmerken van een produkt-proces-keten geïntroduceerd. De symbolen in een produkt-proces-keten corresponderen met transformaties in vorm, tijd of plaats. Dit zijn de drie processen die toegevoegde waarde aan een produkt (kunnen) geven. Een produkt-proces-keten geeft de materiaalstromen overzichtelijk weer, maar soms is het aantal bewerkingen zo groot, dat het beter is om processen te bundelen. Dit laatste geschiedt zowel met seriële als parallelle processen.

De vorm van de keten wordt mede bepaald door de keuze voor een specifiek produkt (of een specifieke grondstof). Bij de keten dient expliciet aangegeven te zijn welk produkt dit is. Bovendien dienen bij het afbakenen van het systeem de grenzen van de keten duidelijk te zijn.

4. Twee case-studies

4.1 Inleiding

Het vorige hoofdstuk bevat een algemene uiteenzetting over wat een keten is, en hoe de keten weergegeven dient te worden. De keten werd een instrument genoemd dat te pas komt bij uiteenlopende doelen: zowel voor analyse van de logistieke aspecten, de economische aspecten en de ecologische aspecten is de keten een geschikt hulpmiddel. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar een tweetal praktijksituaties van bedrijven in een keten. Het doel hiervan is het schetsen van een beeld van de problemen en de vraagstukken waarmee de bedrijven te maken hebben. Daarbij is gekozen voor de verpakkingsindustrie, waar de overheid de producenten van de verpakkingen heeft opgelegd na consumptie een groot deel van de hun produkten terug te nemen. De beide gevalstudies hebben een oriënterend karakter. Om redenen van vertrouwelijkheid wordt gebruik gemaakt van twee pseudoniemen voor de beide bedrijven.

De eerste gevalstudie is door een viertal studenten uitgevoerd bij Alaska Products B.V. in opdracht van de vakgroep Fabricagetechnologie van de faculteit Technologie Management. De keten van Alaska Products B.V. was in het verleden erg eenvoudig, maar door een convenant tussen de verpakkingsindustrie en de overheid is dat veranderd. De resultaten van de studie van de vier studenten zijn gebruikt om te komen tot een afweging van de keuzen waar Alaska Products B.V. voor staat bij de keteninrichting. Het betreft hier dus een ontwerpprobleem met als centrale vraag: waarin moet Alaska Products B.V. investeren? De verschillende alternatieven voor keteninrichting worden naast elkaar gezet (paragraaf 3).

De tweede gevalstudie wordt beschreven in paragraaf 4 en belicht de keten van kartonnen verpakkingen bij Carta. Hiervoor is gekozen omdat het net als bij Alaska Products B.V. om een verpakkingsproduct gaat. Ook hier staat een investeringsprobleem centraal, maar ditmaal van een andere aard.

Voorafgaand aan deze twee gevalstudies wordt in paragraaf 2 het algemene beleid van de overheid inzake verpakkingsmaterialen besproken.

4.2 De regeling verpakking en verpakkingsafval

4.2.1 Twee richtlijnen

In 1991 is het Convenant Verpakkingen [9] gesloten tussen de Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM) en de Stichting Verpakking en Milieu namens de 'verpakkingsketen': een groot aantal bedrijven dat verpakkingen maakt en/of gebruikt, en bedrijven die produkten in verpakkingen op de markt brengen. Kort samengevat zijn de belangrijkste doelstellingen van de resulterende Regeling Verpakking en Verpakkingsafval: ten eerste het zo veel mogelijk beperken van de hoeveelheid verpakkingsafval en de milieuschadelijkheid daarvan (preventie) en ten tweede het zo veel mogelijk hergebruiken en terugwinnen van materiaal. In 1995 is bovendien een richtlijn van het Europees Parlement van kracht geworden [10]. Deze vergt weliswaar op enkele punten een iets strengere aanpak dan werd bepleit in de Regeling Verpakking en Verpakkingsafval, maar voor het grootste deel is zij minder ambitieus dan de oude regeling. Het ministerie van VROM wil dat

bedrijven zich aan de richtlijn van de EU houden, maar daar, waar dankzij de Regeling Verpakking en Verpakkingsafval al betere resultaten werden geboekt, hoopt het ministerie op consolidatie. Hiertoe heeft het ministerie een nieuw ontwerp van de regeling opgesteld, dat op dit moment door de branche wordt bestudeerd. Deze nieuwe regeling verenigt de EU-richtlijn met de oude regeling.

4.2.2 De stand van zaken en de doelstelling

Volgens het jaarverslag van 1995 van de Commissie Verpakkingen kwam in Nederland in 1994 2,7 mln. ton verpakkingsafval vrij. Hiervan is circa de helft afkomstig uit huishoudens, het overige komt vrij bij kantoren, winkels, diensten en industrie. De belangrijkste componenten zijn glas (17%), papier en karton (52%), kunststof (23%) en ferro/non ferro (8%). Bij deze laatste categorie moet met name worden gedacht aan verpakkingen van blik en aluminium.

Tabel 4-1: Percentages materiaalhergebruik voor verpakkingen in 1994 [10].

	1994	
	aanbod (kton)	percentage hergebruik
glas	463	72
papier en karton	1415	50
plastic ¹	613	10
ferro ²	189	52
non ferro ²	19	11
TOTAAL ³	2699	46

¹ inclusief chemische recycling

² rekening houdend met terugwinning ferro/non ferro uit AVI-slakken

³ composieten zijn in dit overzicht in meerdere materiaalsoorten ondergebracht

In de nieuwe richtlijn is bepaald dat uiterlijk in 2001 ten minste 50% (massapercentage) van het verpakkingsafval teruggewonnen moet worden. De regeling verplicht om van het totale verpakkingsgewicht 65% terug te winnen; dit mag onderverdeeld worden in materiaalhergebruik (45% van het totale verpakkingsgewicht) en in energieterugwinning (20% van het totale verpakkingsgewicht). Deze percentages zijn een gemiddelde over al de materiaalsoorten die voorkomen in het verpakkingsafval; per materiaalsoort dient echter minstens 15% te worden hergebruikt. Met betrekking tot preventie is in de richtlijn geen kwantitatieve doelstelling opgenomen. Het ministerie van VROM heeft voorgerekend wat in 2001 per materiaalsoort haalbaar moet zijn. Hierin is zowel een afname van het totale verpakkingsgewicht per jaar als een toename van het percentage terugwinning meegenomen.

Tabel 4-2: Percentages materiaalhergebruik voor verpakkingsmaterialen in 2001 [10].

	2001	
	aanbod (kton)	percentage hergebruik
glas	403	80
papier en karton	1230	80
plastic ¹	533	35
ferro ²	164	86
non ferro ²	17	40
TOTAAL ³	2347	68

¹ inclusief chemische recycling

² rekening houdend met terugwinning ferro/non ferro uit AVI-slakken

³ composieten zijn in dit overzicht in meerdere materiaalsoorten ondergebracht

4.2.3 Hoofdpijnen

De basisgedachte die aan de regeling ten grondslag ligt, is dat het behalen van de in de richtlijn opgenomen taakstellingen van alle personen die betrokken zijn bij het op de markt brengen en verwijderen van verpakkingen, inspanningen vraagt; dit begrip wordt door het ministerie van VROM ketenverantwoordelijkheid genoemd. Dat betekent dat bij het convenant niet alleen de ondoeners van afval worden betrokken, maar ook de gemeenten (die verantwoordelijk zijn voor het opzetten van inzamelsystemen), producenten, importeurs, grondstofproducenten en alle andere stations in de verpakkingketen. Al deze actoren in de keten zullen op een evenwichtige manier hun aandeel moeten dragen in de lasten en kosten van de uitvoering van de regeling. Dit kan het beste worden vastgelegd in een convenant tussen alle ketendeelnemers, waarin er één station expliciet verantwoordelijk wordt gesteld voor de naleving van het convenant: de normadressaat. In veel gevallen zal dit de producent zijn, eventueel met de grondstofproducent, maar niet met de consument. Hergebruik en herverwerking rusten op de schouders van alle stations in de keten. De keten mag als geheel rapporteren aan het ministerie. Dit maakt het sluiten van een convenant binnen de keten tot de meest aantrekkelijke oplossing uit administratief oogpunt; daarnaast is het sluiten van een convenant ook een efficiënte aanpak van het terugwinningsprobleem, omdat de zwakke punten van de keten mogen opwegen tegen de betere punten. Uit het bovenstaande blijkt dat de verpakkingbranche door het ministerie gestimuleerd wordt om onderling in de ketens waarin ze actief zijn een convenant te sluiten. Er dient echter wel voor gewaakt te worden dat dit soort convenanten niet in strijd zijn met het mededingingsbeleid. Een producent die alsnog besluit niet een convenant te sluiten met de andere stations in de keten, dient individueel verslag te doen en zelf een systeem te ontwerpen waarin hij zicht krijgt op de stromen in de keten.

Nederland dient net als de andere lidstaten van de EU eens in de drie jaar aan de Europese Commissie te rapporteren over de tenuitvoerlegging van de richtlijn. Daarom dient de keten als geheel of de individuele producent die geen convenant heeft gesloten, eens in de drie jaar te rapporteren. Over de wijze waarop de meting door VROM zal plaatsvinden zal nog nader moeten worden overlegd tussen de partijen.

Nu de richtlijnen van de overheid bekend zijn, is het interessant om eens te bekijken wat de uitwerkingen zijn in twee bestaande ketens van verpakkingproducenten. Hieronder bespreek ik eerst de gevalstudie bij Alaska Products B.V., daarna de gevalstudie bij Carta.

4.3 Case 1: Alaska Products B.V.

4.3.1 Algemene beschrijving van het bedrijf.

In deze case worden twee dochterondernemingen van Islan International B.V. beschreven, namelijk Alaska Products B.V. en Brinkman B.V. Beide bedrijven maken kunststof producten. Sinds april 1995 is Brinkman B.V. ondergebracht bij Alaska Products B.V. en is er sprake van een interne fusie; voor de buitenwereld zijn het echter nog steeds twee verschillende bedrijven. In het vervolg wordt er nog slechts gesproken over Alaska, ook wanneer het feitelijk over Brinkman B.V. gaat.

Voor het beschrijven van Alaska Products B.V. is gebruik gemaakt van informatie uit een onderzoeksrapport, dat geschreven werd door een D-projectgroep van vier bedrijfskundestudenten [11].

4.3.2 De keten van de haspels

In deze case wordt aandacht geschonken aan een speciaal produkttype van Alaska, namelijk de haspels. Alaska maakte deze haspels in opdracht van enkele electronicafabrikanten. De haspels moeten voldoen aan strenge kwaliteitseisen die betrekking hebben op de afmetingen, de mechanische eigenschappen (o.a. stootvastheid) en op de anti-statische eigenschappen van het materiaal. Alaska heeft een grote variatie aan haspels in het assortiment, en de productie ervan geschiedt 24 uur per dag voor 6,5 dag per week. De electronicafabrikanten die deze haspels kopen, gebruiken ze voor de opslag van elektronische componenten. De componenten worden daartoe op dragertape gelegd en bedekt met een covertape. Het geheel wordt op de haspels gerold. De componenten worden zo, op de haspels, verkocht aan afnemers. Deze afnemers proeven pas het nut van de haspels, want zij zetten de rollen bij de assemblage op Pick-and-Place-machines, waarbij robots de componenten in hoog tempo van de tape halen en op printplaten solderen. Daarna is de haspel weer leeg. Dat werpt een boeiend licht op het produkt haspel: het is een verpakkingsprodukt.



Figuur 8: De huidige produkt-proces-keten van de haspels.

Na de bovenstaande constatering moge duidelijk zijn dat ook Alaska te maken heeft met de Regeling Verpakking en Verpakkingsafval. Dit stelt nieuwe eisen aan de keten van Alaska. De oplossing van de problemen die dit met zich meebrengt, zijn door de haspelafnemers doorgeschoven naar Alaska. Het D-project dat al genoemd werd, richtte zich op deze nieuwe situatie waarin Alaska gedwongen is te zoeken naar maatregelen om de gebruikte haspels milieuvriendelijker te verwerken.

De haspels van Alaska Products B.V. komen dus voortaan terug bij Alaska. Hier doet zich een recyclingprobleem voor. Dat is een geheel nieuw probleem voor Alaska, want de haspels werden in het verleden altijd door de eindgebruiker bij het afval gedaan. Alaska is gedwongen om na te denken over hergebruik of herverwerking. Deze twee opties zijn wellicht nogal verwarrend. Hergebruik is het opnieuw gebruiken van het produkt in de bestaande vorm, eventueel na een schoonmaak of herstelproces. Bij herverwerking daarentegen wordt de vorm van het oude produkt vernietigd en wordt het materiaal verpulverd of op een andere manier bewerkt tot er een massa ontstaat die als grondstof kan dienen voor een nieuw produkt met een nieuwe vorm.

De keten van Alaska Products B.V. krijgt een ander karakter, nu de gebruikte haspels voortaan weer terugkomen bij Alaska. Alaska heeft een ontwerpprobleem; de kernvraag hierbij is wat ze moeten gaan doen met de gebruikte haspels. Moeten ze gaan investeren in een systeem voor hergebruik, of juist herverwerking? Om die reden heeft de D-projectgroep alternatieven ontwikkeld. Het is echter nog niet bekend welke van de alternatieven voor Alaska economisch de gunstigste is.

4.3.3 Alternatieven voor verwerking

Bij de alternatieven die de D-projectgroep heeft genereerd, is het belangrijk te onthouden dat hergebruik een proces is met een zekere mate van uitval; het is immers nagenoeg onmogelijk om alle haspels te hergebruiken. Als een haspel voor hergebruik wordt afgekeurd, dan herhaalt de vraag zich weer: wat doen we ermee? De D-projectgroep gaat hier kort op in, maar in dit verslag zal alleen gekeken worden naar de eerste keuze die gemaakt moet worden tussen hergebruik, herverwerking en afvalozing.

Na bestudering van het verslag van het D-project kan grofweg gesteld worden dat er vier vragen zijn, die Alaska moet beantwoorden. Iedere verschillende antwoordcombinatie leidt tot een mogelijke op-

lossing van het verwerkingsprobleem. De eerste vraag is wat er met het gebruikt produkt dient te worden gedaan. Er staan Alaska drie alternatieven voor ogen, namelijk hergebruiken, herverwerken en lozen. De tweede vraag is of het produkt in een bepaalde vorm nog terugkomt in de eigen keten, of dat het naar een andere keten gaat waar de haspels of de geshredderde haspels met een andere toepassing worden gebruikt. De derde vraag is of Alaska eerst al het gebruikt produkt ophaalt van de klanten en intern verzamelt, of dat na gebruik van haspels Alaska niet als tussenpersoon optreedt. De vierde en laatste vraag tenslotte is of Alaska, als het heeft besloten om het produkt in te zamelen en te herverwerken, het shredderen zelf gaat verrichten, of dat het het shredderen overlaat aan een ander.

Dit geheel van vier vragen leidt tot tien alternatieven¹. In Figuur 9 zijn de verbanden tussen de vier vragen en de tien alternatieven schematisch aangegeven.

Voor alle duidelijkheid dient bij Figuur 9 vermeld te worden dat niet iedere vragencombinatie mogelijk is. Als bijvoorbeeld de keuze wordt gemaakt voor het lozen van de gebruikte haspels, dan is de vraag of dat in de eigen keten of in de andere keten moet gebeuren onzin. De vragencombinaties die wèl mogelijk zijn leiden tot de volgende alternatieven (nummering correspondeert met Figuur 9):

1. Hergebruik door Alaska.

Alaska verzamelt de gebruikte haspels met het doel ze te hergebruiken in de eigen fabriek. Dat betekent dat de haspels (na een keuring) terugkomen in het productieproces, bijgewerkt worden (coating aanbrengen) en weer verkocht worden. Een effect hiervan is dat de inkomende stroom grondstof kleiner wordt.

2. Hergebruik door klant.

Net als bij 1. worden de haspels in de eigen keten hergebruikt. Nu echter worden ze niet eerst door Alaska verzameld en opgenomen in het productieproces, maar krijgt de (uitpakkende) klant de verantwoordelijkheid om de haspels terug te sturen naar de inpakkende klant, die ze controleert. Een dergelijk systeem vindt op kleine schaal al plaats binnen de keten. Dit heeft voor Alaska het effect dat de afzet van haspels zal dalen door een afnemende behoefte bij de verpakkende klant.

3. Hergebruik in een andere keten na preparatie door Alaska

Het is mogelijk om in een andere keten de haspels met andere doeleinden te hergebruiken. Alaska verzamelt de haspels, prepareert ze eventueel en verkoopt ze aan een producent die er iets geheel anders mee gaat doen.

4. Hergebruik in een andere keten na verkoop door klant

Ditmaal worden net als bij 3. de haspels in een andere keten door een andere producent hergebruikt. De uitpakkende klant geeft het produkt door aan die producent tegen een vergoeding.

5. Herverwerking door Alaska

Alaska verzamelt de gebruikte haspels en besluit ze te herverwerken. De haspels worden na preparatie geshredderd. De grondstof die zo ontstaat is invoer in het eigen productieproces en wordt gebruikt bij de productie van nieuwe haspels. De grondstofbehoefte bij de afdeling inkoop neemt dus af.

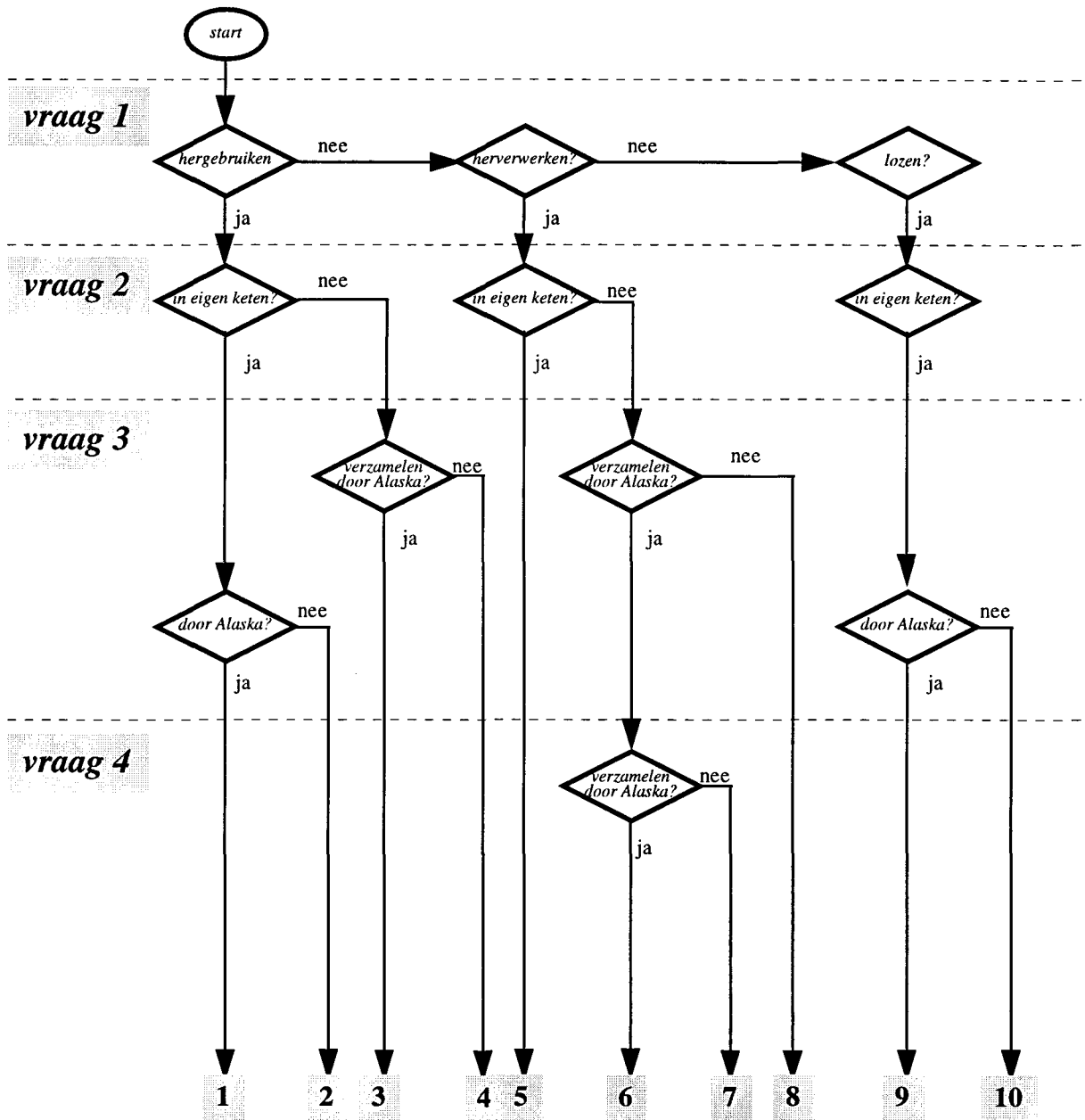
6. Shredderen door Alaska; herverwerking buiten de eigen keten

Alaska verzamelt en shreddert het produkt, maar besluit om bedrijfskundige redenen de geshredderde haspels niet als grondstof te gebruiken in de eigen productie. Er wordt gekozen tot verkoop van het geshredderde produkt aan een producent in een andere keten. Dit gebeurt nu ook al voor kleine aantallen. De materialen uit de haspels worden bijvoorbeeld gebruikt voor het maken van schepjes.

¹ De D-projectgroep noemde elf alternatieven. Vier daarvan heb ik samengevoegd tot twee alternatieven, en vervolgens heb ik om redenen van consistentie nog één alternatief aan de overgebleven negen toegevoegd.

7. Herverwerking in andere keten (zowel het shredderen als het herverwerken zelf)

Een producent in een andere keten besluit zelf het produkt te shredderen zodat het voor herverwerking in aanmerking komt. De uitpakkende klant verkoopt net als bij alternatief 4 de haspels zelf aan een herverwerker. Die kan er bijvoorbeeld visdraad van maken. Alaska komt er niet aan te pas.



Figuur 9: De tien alternatieven weergegeven als gevolg van de keuzemogelijkheden die Alaska Products heeft.

8. Herverwerking in een andere keten na preparatie door Alaska

Alaska verzamelt de gebruikte haspels en prepareert ze voor het shredderen. Dit shredderen wordt gedaan door een herverwerker buiten de eigen keten. Alaska verkoopt de gebruikte haspels aan hem. Er is Alaska al een bod gedaan.

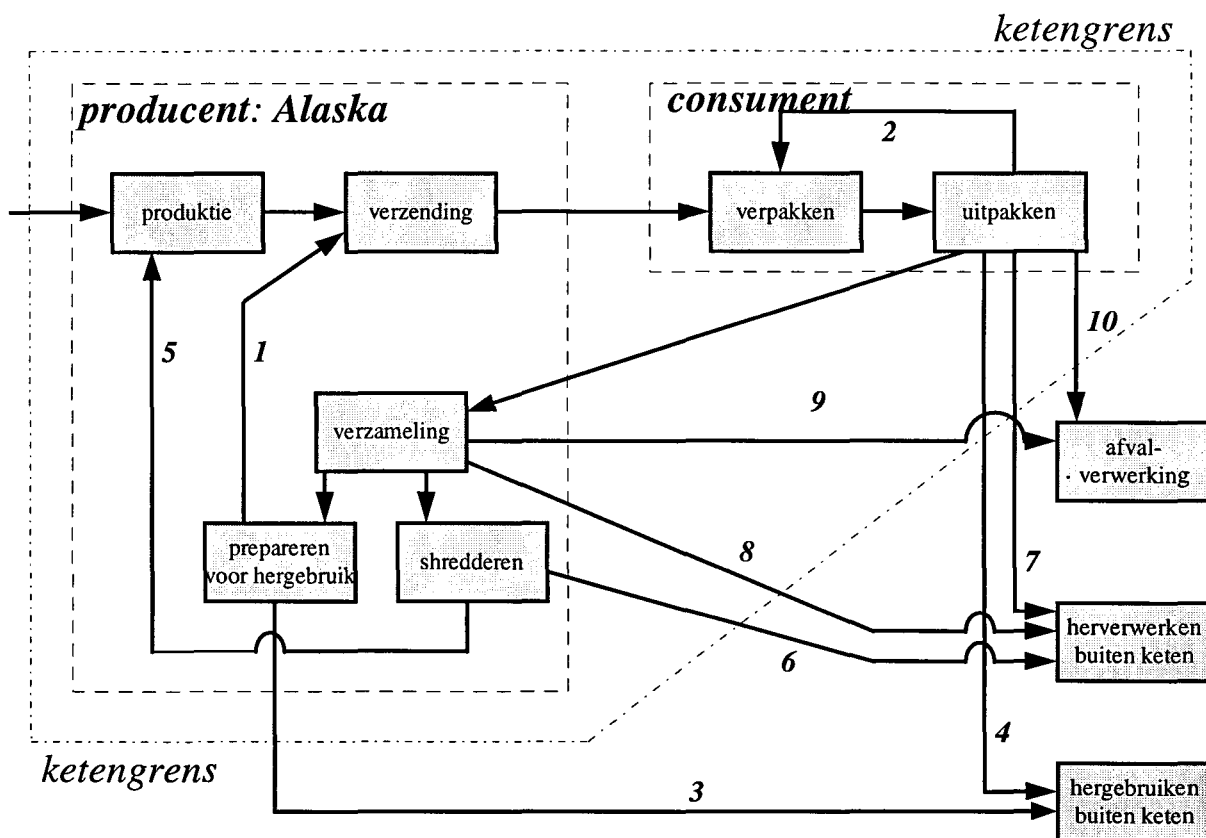
9. Lozing door Alaska

Alaska verzamelt de gebruikte haspels en loost ze.

10. Lozing door klant

De klant loost het gebruikte produkt als afval.

In Figuur 9 werden de alternatieven overzichtelijk weergegeven als uitvloeisel van een aantal keuzen die Alaska kon maken. Tot slot van deze gevalstudie geef ik de tien alternatieven weer in één produkt-proces-keten. De verschillende stromen krijgen het nummer van het alternatief waarbij ze horen. Dit leidt tot de produkt-proces-keten van Figuur 10.



Figuur 10: Schematische weergave van de tien alternatieven in een produkt-proces-keten.

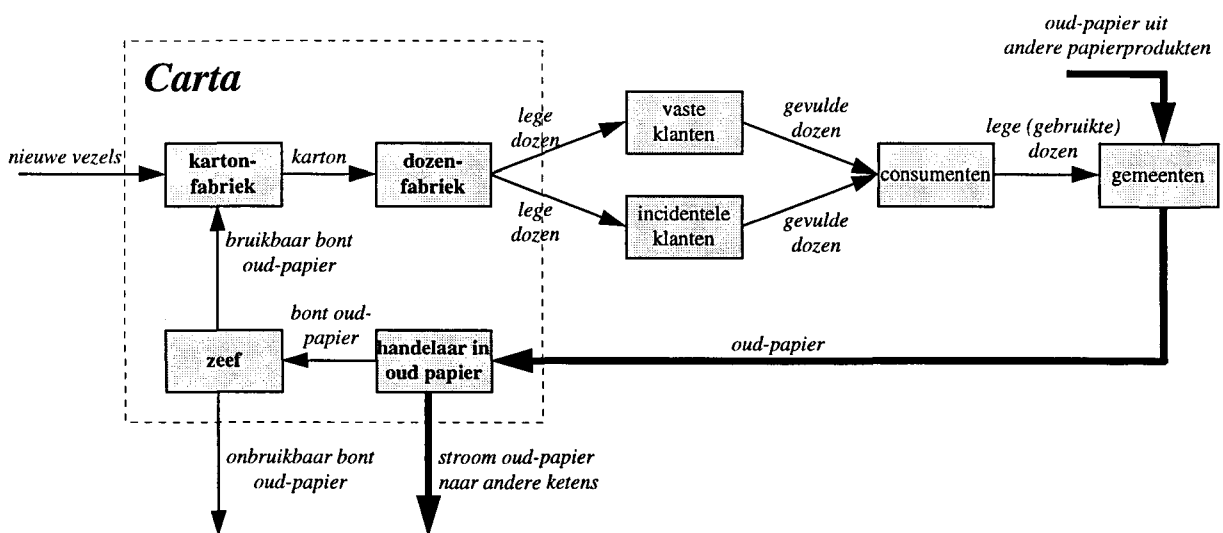
4.4 Case 2: Carta

4.4.1 De keten van de kartonnen verpakkingen

Carta is op een groot aantal markten actief [12]. De ketenproblematiek is vooral actueel in de keten van de kartonnen verpakkingen. De grondstof voor de kartonproducent is 'bont' oud papier. Carta heeft in het verleden al gekozen voor deze grondstof omdat het economisch aantrekkelijker was om te werken met gebruikt papier dan met nieuwe vezels. Een deel van het karton echter, met name de buitenkant, bestaat soms uit nieuw papier om het karton daarmee een mooi uiterlijk te geven.

Het karton wordt in een ander proces omgevormd tot een doos. Hiervoor is naast de kartonfabriek een tweede fabriek in werking. De gemaakte dozen worden vervolgens geleverd aan de klanten van Carta. Deze klanten worden door Carta zelf opgesplitst in vaste klanten en incidentele klanten. De aanwezigheid van vaste klanten is van een groot belang voor deze keten, omdat dat betekent dat er langlopende afspraken gelden over de prijzen. Het grootste deel van de dozen wordt geleverd aan de vaste klanten, zoals bijvoorbeeld Unilever of Albert Heijn. Deze klanten van Carta brengen vervolgens hún produkt in de gemaakte dozen, en dit wordt verkocht aan de consumenten. Het zijn deze consumenten die de kartonnen verpakking na gebruik bij het oud papier doen. Dit oud papier wordt in Nederland meestal opgehaald door de gemeenten, die daarvoor gebruik maken van vrijwilligers. Er is echter een tendens bespeurbaar dat professionele ophaalbedrijven door gemeenten ingeschakeld worden. De gemeenten bieden het oud papier aan op de markt voor oud papier. Dit is een internationale markt. Handelaars op deze markt proberen handig gebruik te maken van het feit dat de gemeenten het papier niet kunnen bewaren vanwege een kleine opslagcapaciteit. Hierdoor kan de prijs van oud papier af en toe zelfs negatief worden; dat wil zeggen dat de gemeenten geld aan de handelaren moeten betalen om aan hen het oud papier te 'verkopen'. De prijs van het oud papier gaat sterk op en neer.

Het oud papier is niet direct bruikbaar als grondstof voor het maken van karton. De vezels lijden van het gebruik, en na gemiddeld zeven keer wordt een papiervezel te kort om nog als grondstof te kunnen worden gebruikt. Er vindt een soort zevensproes plaats waarbij de te korte vezels worden gescheiden van de overige vezels en worden geloosd. De rest gaat door naar de kartonfabriek.



Figuur 11: De keten van de kartonnen verpakkingen van Carta.

De keten van de kartonnen verpakkingen staat niet los van de overige papierprodukten. De consument van papierprodukten voegt alle produkten na gebruik bij elkaar onder de verzamelnaam 'oud papier', en de gemeenten halen dit op. Het is dan niet meer handig om een onderscheid te maken tussen het gedeelte van het oud papier dat van origine uit de keten van kartonnen verpakkingen komt, en de rest van het oud papier. Omdat een groot deel van het oud papier uit andere papierprodukten dan karton bestaat heeft het voor de kartonfabrikant geen zin om een preventieve kwaliteitsverbetering in te voeren; dat wil zeggen dat de fabrikant er geen voordeel van heeft wanneer hij door gebruik van betere virgin-grondstoffen (in dit geval: nieuwe vezels) langer kan recyclen. In Figuur 11 zijn de stromen die deze keten deelt met andere ketens aangegeven door middel van dikke pijlen.

Het ministerie van milieu (VROM) zag zich geconfronteerd met een groot probleem toen de eerste gemeenten bekend maakten niet langer het papier in te willen zamelen. De gemeenten hadden te kampen met inzamelingskosten die groter waren dan de opbrengst bij de verkoop van oud papier aan de handelaren. Het verlagen van de inzamelingsprijzen zou op de lange termijn de inzameling door de verenigingen onaantrekkelijk maken. Het inzamelen van oud papier kon in de toekomst om die reden komen te vervallen, met schadelijke gevolgen voor het milieu én voor de papierindustrie zelf. Vandaar dat er een afspraak is gemaakt tussen de gemeenten, VROM en de gezamenlijke Nederlandse papierproducenten. Deze afspraak behelst dat de gemeenten zelf de inzamelingskosten betalen. De papierindustrie is nu echter verplicht dit papier op te kopen tegen de geldende wereldmarktprijs. Indien deze prijs nu en dan negatief wordt, dan zijn de papierproducenten verplicht om het papier toch nog gratis op te halen. De extra kosten die nu door de papierindustrieën moeten worden gemaakt wegens de verplichting tot inname bij elke prijs van de wereldmarkt, worden opgevangen door een heffing op alle papierprodukten die worden verkocht. Het geld dat dit oplevert, wordt gestort in een gezamenlijk fonds van de papierindustrieën. Er is aanvankelijk gedacht om die heffing alleen voor de produkten te laten gelden waarbij er sprake is van hergebruik van papier, zoals het karton. Dit zou echter de kostprijs van de dozen zodanig verhogen, dat het voor de vaste klanten aantrekkelijk zou zijn geworden om te zoeken naar alternatieve verpakkingsmiddelen voor hun produkten, zoals bijvoorbeeld plastic zakjes. Vandaar dat is gekozen voor een heffing door alle Nederlandse papierproducenten op al hun papierprodukten. Het is overigens nog niet bekend of dit een legale maatregel is, omdat het lijkt op een prijsafpraak tussen producenten. Carta weet nog niet of het Europese mededingingsbeleid hier roet in het eten kan gooien.

Er ontstaan problemen voor Carta als gevolg van hevig schommelende prijzen van het oud papier. Deze schommelingen zijn een bedreiging van de winst en de continuïteit. De handelaren in oud papier hebben baat bij de sterke schommelingen in de prijs: zij kopen bij de gemeenten in bij de courante wereldmarktprijs (geheel zoals afgesproken) en slaan het oud papier zo lang op, tot de prijs weer omhoog gaat. Pas dan verkopen zij hun papier aan de papierindustrie. Opmerkelijk hierbij is dat ook de divisie die het oud papier opkoopt binnen Carta zelf op deze manier te werk gaat. Dit is een gevolg van het soort beleid dat veel grote bedrijven toepassen om al hun activiteiten weer concurrerend en winstgevend te maken. Alle divisies worden beoordeeld op de winsten die door henzelf gegenereerd zijn. De divisie die het oud papier inkoopt, probeert dus net als een oud papier-handelaar van buiten zo hoog mogelijke prijzen te vragen voor de pulp die hij levert. De kartonproducent ziet daardoor de kosten van de pulp stijgen, en daarmee de kostprijs van het karton. Deze kostenstijgingen van het produkt kunnen niet worden doorgerekend naar de klanten, want de veelal vaste klanten hebben langlopende contracten met prijsafspraken. Het lijkt verstandig voor Carta om hogere prijzen te vragen voor de dozen bij het opstellen van nieuwe contracten, maar ook dan kunnen de kostenstijgingen niet zo gemakkelijk worden doorgerekend, omdat dat de concurrentiepositie van Carta hevig onder druk zou zetten. De vaste klanten hebben zelf immers ook weinig speelruimte om hun produkt dat op de schappen in de winkels ligt opeens een stuk duurder te maken en gaan bij stijgende prijzen van de dozen zoeken naar andere dozenproducenten in bijvoorbeeld het buitenland of naar andere verpakkingen. Het ketenprobleem kan dus eenvoudig vertaald worden naar het verschijnsel dat iedere station uit de keten probeert de eigen winst te maximaliseren ten koste van de andere stations. De ketenkosten worden ongelijk verdeeld over de stations in de keten, waardoor stations in het midden van die keten (de

kartonproducent en de dozenproducent) te weinig rendement kunnen leveren. Carta betwijfelt daarom of investeren in de kartonfabriek en de dozenfabriek nog zin heeft. De vraag waar Carta op dit moment mee worstelt is of investeringen die nu gedaan zouden moeten worden zich nog terugverdienen.

4.5 Terugblik

Beide gevalstudies geven een beeld van de complexiteit binnen de keten. Bij Alaska is er nog geen sprake van recycling, en ligt het probleem vooral bij de praktische vraag, hoe Alaska financieel zo aantrekkelijk mogelijk de (toekomstige) stroom gebruikte haspels kan hergebruiken of herverwerken. Dit investeringsprobleem dient te worden uitgezocht door het doorberekenen van de weergegeven alternatieven.

Bij Carta is er al sprake van een keten met recycling. Het probleem van deze keten is een onderhandelingsprobleem: Carta kan de kosten niet doorrekenen naar de klanten. Voor Carta speelt er ook een investeringsprobleem, maar daarbij is niet de vraag hoe het moet investeren, maar of het moet investeren. Carta heeft twijfels of het de verpakkingen in de toekomst wel op een rendabele manier kan produceren.

5. De elementaire keten

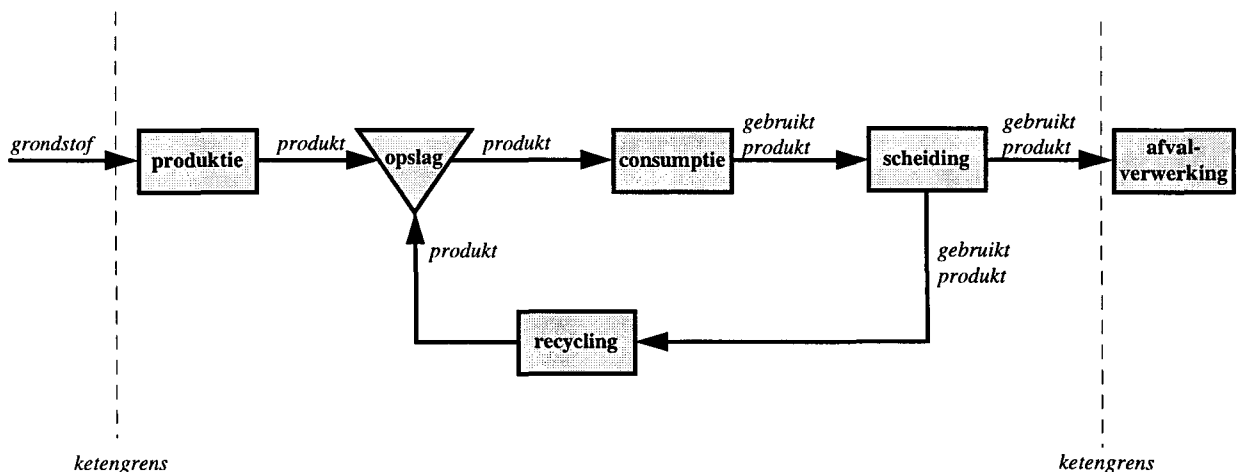
5.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk werd voor een tweetal specifieke bedrijven elk een produkt-proces-keten opgesteld. Om te komen tot een algemene analyse van dergelijke economische ketens, dient men een keten op te stellen, die overeenkomsten vertoont met die twee concrete ketens, en breed toepasbaar is. Bij deze algemene keten wordt gekeken naar inputs, outputs, actoren in de keten en belanghebbenden buiten de keten.

In paragraaf 2 wordt uitleg gegeven hoe de eenvoudige 'elementaire' produkt-proces-keten er uit ziet. De daaropvolgende paragrafen worden aspecten van de keten besproken, zoals de stations in de keten (paragraaf 3), de totale ketenkosten (paragraaf 4) en de omgeving van de keten (paragraaf 5). In deze laatste paragraaf wordt ook aandacht besteed aan de milieu-effecten. In paragraaf 6 worden alle hypothesen uit dit hoofdstuk opgesomd, en samen gebracht in een blokschema van het systeem.

5.2 Het systeem

Bij het opstellen van een produkt-proces-keten speelt het begrip aggregatieniveau een belangrijke rol. Een te hoge mate van detail leidt tot complexiteit en kan er voor zorgen dat analyses en berekeningen onmogelijk worden. Een te lage mate van detail maakt analyse gemakkelijker, maar kan er voor zorgen dat de gevonden verbanden en uitkomsten nutteloos zijn omdat ze te ver van de werkelijkheid staan. De validiteit komt dan in gevaar. Bij het kiezen van het juiste aggregatieniveau dient er een soort evenwicht te worden gevonden tussen de complexiteit en de validiteit. Om dit evenwicht op den duur te bereiken is er gekozen om te beginnen met een zo eenvoudig mogelijke definitie van een keten. De elementaire keten (zie Figuur 12), die hiermee ontstaat, is zo klein mogelijk gemaakt en kan als bouwsteen dienen voor een grotere keten. Overeenkomsten met de twee gevalstudies uit het vorige hoofdstuk zijn duidelijk aanwezig, maar de twee seriële consumenten van verpakkingsproducten zijn hier gebundeld tot één station. Er is een opslag toegevoegd.



Figuur 12: Het stroomschema van de elementaire produkt-proces-keten met ketengrenzen.

Het is duidelijk dat iedere keten uit meerdere 'stations' bestaat. Er is in de elementaire keten sprake van een eerste 'station' dat toegevoegde waarde creëert aan een van buiten de keten ingekocht produkt, en er is sprake van een tweede station dat, eventueel tegen betaling, dit produkt overneemt. Het tweede station consumeert dus. Daarna gaan de goederen tegen bepaalde kosten de keten uit, of worden binnen de keten hergebruikt.

Bij de opslag komen twee stromen produkt samen; de eerste stroom bestaat uit nieuwe produkten uit de produktie, de tweede stroom bestaat uit produkten die het consumptieproces al een keer hebben meegemaakt, en die na een opknapbeurt voor hergebruik in aanmerking komen. In de gevalstudie bij Alaska Products B.V. (paragraaf 4.3) werd het onderscheid uitgelegd tussen hergebruik en herverwerking. De optie van herverwerking is niet in de elementaire keten opgenomen, om de keten in eerste instantie zo eenvoudig mogelijk te houden. Het is echter de bedoeling om herverwerking in een later stadium van het onderzoek wel in de analyse mee te nemen. Een gebruikt produkt kan in dit voorbeeld alleen worden hergebruikt, of als afval worden geloosd.

Het moge duidelijk zijn dat de elementaire keten geen realistische keten is. De validiteit ervan is gering vanwege een zeer sterke reductie van de complexiteit: de patronen van de goederenstromen zijn sterk vereenvoudigd. Dit biedt in eerste instantie echter wel de gelegenheid om een gefundeerde analyse te maken van de structuur en de gang van de goederenstromen van deze elementaire keten. In een later stadium van het onderzoek is het dan mogelijk om de complexiteit weer groter te maken en de werkelijkheid dichter te benaderen.

Van belang is dat deze keten de stromen van één produkt beschrijft. Een verandering van de samenstelling van het produkt levert in deze optiek een ander produkt met een eigen (andere) keten op. Optimalisatie van de terugwinning door het veranderen van deze samenstelling wordt dus niet meegenomen.

5.3 De actoren in de keten

Op het laagste aggregatieniveau in de keten staat de individuele deelnemer. Dit is niet de arbeider die achter de machine de produkten maakt, en ook niet de manager die het proces probeert te leiden; de individuele deelnemers zijn de 'producent' en 'consument'. Deze actoren kunnen van buitenaf arbeid, grondstoffen, kapitaalgoederen, en kapitaal aantrekken. Dit wordt verstrekt door personeel, leveranciers, aandeelhouders en banken. Ook de overheid speelt een rol, maar is zelf geen ketendeelnemer. Deze personen of instellingen zijn weliswaar de belanghebbenden binnen de keten, en vervullen een onmisbare rol, maar op dit aggregatieniveau zal de keten niet bestudeerd worden. Er wordt gekozen te werken met het abstracte idee van de producent, die mensen en produkten erbij haalt en daar kosten voor moet maken. Deze hypothese impliceert dat geld uiteindelijk altijd langs één van deze lijnen uit de keten verdwijnt. De abstracte producent heeft zelf geen geld. Het geld dat verdiend wordt, wordt vroeg of laat uitbetaald aan personeel, leveranciers, aandeelhouders, banken, de overheid en anderen.

Over de punten in de keten waar opslag van goederen plaatsvindt en waar na gebruik selectie van goederen plaats vindt, valt weinig te zeggen. Dit zijn geen onafhankelijke actoren. De keuzen die bij deze punten horen worden gemaakt door de producent, daartoe eventueel gedwongen of aangespoord door de overheid.

De producent en de consument hebben een concurrerende positie. Hoe meer de consument betaalt voor een produkt, hoe aangener dat is voor de producent. Andersom zal de consument proberen om zo min mogelijk geld uit te geven aan het produkt, zodat hij zijn geld aan andere consumptiegoederen kan besteden. De prijstheorie voorspelt bij een zekere prijselasticiteit dat er een verband bestaat tussen verkoopvolume en prijs. De vraag wordt in het model echter beschouwd als een gegeven, onafhankelijk van de prijs. Dit is een belangrijke hypothese. In de prijstheorie komt een dergelijke situatie overeen met een produkt met een zeer lage prijselasticiteit. Omdat de vraag de keten opgelegd wordt,

kan ze niet beïnvloed worden door een station binnen de keten. Voor het systeem is de vraag een onafhankelijke input.

Enige twijfels bij deze hypothese zijn gerechtvaardigd. De totale vraag naar een produkt is (naast de hierboven uitgesloten prijs) beïnvloedbaar door kwaliteit, reclame en produktdifferentiatie. In het model wordt dit buiten beschouwing gelaten. De modelbouwer simuleert deze omstandigheden door de vraag een zo natuurlijk mogelijk patroon op te leggen.

Het gegeven van een deterministische vraag geeft de keten een 'motor', die middels 'stuwende krachten' en 'zuigende krachten' de stromen in de gehele keten in beweging zet. De producent probeert met juist genoeg produkten aan de vraag te voldoen. Overproduktie is economisch onaantrekkelijk. Om te komen tot een produktie die zo nauw mogelijk in de buurt komt bij de vraag dient de producent de vraag te voorspellen, of het produktiesysteem zo in te richten, dat er snel op de vraag kan worden gereageerd. Onderscheiden kunnen worden: produktie op order en produktie voor opslag. (Op dit onderscheid wordt nader ingegaan in paragraaf 6.3.4.) In dit laatste geval worden mogelijke naleveringen enigszins vermeden door het aanleggen van een voldoende grote voorraad. Het is duidelijk dat de vraag als een soort 'zuigende kracht' de producent tot een bepaalde produktie aanzet, die eventueel dankzij een voorraad enigszins is losgekoppeld van de aktuele vraag.

Na consumptie worden de goederen afgedankt. Hier is sprake van stuwende krachten vanuit de vraag. De hoeveelheid gebruikte goederen hangt samen met de vraag op voorgaande tijdstippen. Als de levensduur van het gebruiksgoed exact vastligt, dan is de hoeveelheid afgedankte produkten in een periode gelijk aan de hoeveelheid goederen, die precies een tijdsduur ter lengte van de levensduur geleden werd gekocht. Ook bij een stochastische levensduur wordt de uitstoot van gebruikte goederen mede bepaald door de vraag in voorgaande perioden. Het is de hoeveelheid afgedankte goederen die ten dele zorgt voor de grootte van de stroom afvalgoederen en de stroom te hergebruiken goederen. De verhouding tussen deze twee wordt bepaald door factoren van economische, technische, juridische of ideële aard. Wanneer deze verhouding opgelegd wordt door wetten, dan is voor de actoren in de keten ook hier sprake van een onafhankelijke niet-manipuleerbare input. Dit wordt verder toegelicht in paragraaf 5.5. Wanneer de ketendeelnemers zelf echter de vrijheid hebben om deze verhouding te bepalen, dan is er sprake van een manipuleerbare input.

De economisch prestatie van een keten laat zich moeilijk bepalen door naar de individuele actoren alleen te kijken. De moeilijkheid schuilt in het feit dat er zoals eerder al werd gezegd concurrerende krachten werkzaam zijn. Wanneer de producent zijn economische prestatie maximaliseert door hogere prijzen te vragen, betekent dat een verarming van de consument. En wanneer de prijs daalt wordt de economische situatie gunstiger voor de consument en ongunstiger voor de producent. Bij een geheel prijsinelastische vraag naar een produkt en een geheel prijsinelastisch aanbod van een produkt (en dat is de situatie van hierboven) geldt dat de som van het consumentensurplus en het producentensurplus nul is. Wat de één er op voor uit gaat, moet de ander inleveren. Gezien over de gehele keten is het resultaat van een prijsverandering daarom nihil. Het is dus niet mogelijk de ketenprestatie uit te drukken in winst of verlies van één individueel station. Daarom dient de ketenprestatie op een andere manier te worden gemeten. In de volgende paragraaf zal de ketenprestatie worden bepaald door de mate van efficiëntie waarop deze kwantiteit wordt geleverd. Kortom: door de kosten die over de gehele keten worden gemaakt om die kwantiteit te leveren.

5.4 De totale ketenkosten

De keten zal proberen ten opzichte van de buitenwereld zo goedkoop mogelijk uit te zijn. De producent koopt zo goedkoop mogelijk in en de consument wil zo min mogelijk geld kwijt zijn voor het lozen van afval of het hergebruiken. De economische prestatie van de keten dient gedefinieerd te worden ten opzichte van die buitenwereld. Hierboven werd uitgelegd dat interne transactieprizen niet

belangrijk zijn. Wel van belang zijn kosten die worden gemaakt ten opzichte van de buitenwereld. Zoals in de vorige paragraaf uitgelegd zijn de producent en de consument denkbeeldige actoren die de kosten en eventueel de winst, die ze maken, buiten de keten moeten afrekenen aan personeel, leveranciers, aandeelhouders, banken, de overheid en anderen.

De kosten waar het om gaat, worden gemaakt omdat ze noodzakelijk zijn bij het draaiende houden van de keten. Het zijn:

- **grondstofkosten**

Omdat deze elementaire keten geen duidelijke definitie heeft van wat de grondstoffen zijn, dienen bij deze kostenpost heel breed alle kosten van de inkoop van materialen te worden ingedeeld. Met materialen wordt hier bedoeld op die goederen, die in het transformatieproces de transformatie ondergaan. Produktiemiddelen horen er niet bij.
- **produktiekosten**

Deze kunnen worden opgedeeld in een viertal subposten:

 - a) De arbeidskosten. Dit zijn kosten die concreet toegewezen kunnen worden aan de productie van een bepaald produkt. Het zijn variabele kosten.
 - b) De kapitaalkosten. De kapitaalgoederen worden vaak afgeschreven in bepaalde termijnen, maar wanneer de kapitaalmiddelen worden afgeschreven over de hoeveelheden die ze hebben geproduceerd, ontstaat er een duidelijk beeld van een tweede variabele kostenpost.
 - c) Kosten voor hulpstoffen, zoals bijvoorbeeld energie.
 - d) De overheadkosten. Dit is de kostenpost die accountants vaak de meeste hoofdbreken voorzorgt. In de accountancy poogt men op een redelijke manier de overheadkosten toe te kennen aan de produkten, die met de overheadkosten worden bediend.

Wanneer de accountants hun werk goed doen, komen zij uit op een toewijzing van alle kosten die de producent heeft gemaakt aan de produkten die hij maakte. De verhouding van deze aantallen geeft dan de kostprijs van het produkt weer. Deze kostprijs, al is de totstandkoming vaak discutabel, geeft binnen een redelijke nauwkeurigheid de produktiekosten per produkt aan.
- **voorraadkosten**

Deze hangen samen met de hoogte van de voorraad. De kosten ontstaan als gevolg van handling en accommodatie. Ook pijplijnkosten horen hierbij. Dit zijn de kosten die samenhangen met de renteverliezen die ontstaan door uitstel van de verkoop van een produkt.
- **transactiekosten**

Dit zijn de kosten die gemaakt moeten worden om de produkten te verkopen. De transactiekosten zijn de smeerolie die de transacties soepel laat verlopen. Hierbij kan worden gedacht aan de verkoopkosten zelf en eventueel aan reclame.
- **gebruikskosten**

Dit zijn de kosten die de consument maakt om gebruik te kunnen maken van het produkt. Deze kosten worden onder andere veroorzaakt door de noodzaak tot energiegebruik bij aanwending van het produkt. Ook de kosten voor onderhoud en reparaties horen bij deze kostenpost.
- **transportkosten**

Dit zijn alle kosten in de keten die te maken hebben met transport. Dat geldt voor de aanvoer van de grondstoffen, voor het vervoer van producent naar consument, voor het vervoer bij recycling en voor de afvoer van het afval.
- **selectiekosten**

Dit zijn de kosten die gemaakt worden bij de selectie en de scheiding van te hergebruiken produkten en produkten die worden geloosd.

- hergebruikskosten
Dit zijn alle kosten die moeten worden gemaakt om het produkt na selectie klaar te maken voor hergebruik.
- lozingskosten
Dit zijn alle kosten die samenhangen met het lozen van het afval.
- belastingen/subsidies
Dit zijn alle betalingen die aan de overheid moeten worden gedaan en die nog niet bij de bovenstaande kosten zijn inbegrepen. Deze kosten zijn negatief als er sprake is van subsidies. De overheid brengt dan geld binnen de keten. Het heffen van belastingen en subsidies stimuleert de keten tot een bepaald gedrag, maar dwingt niet! In praktijk kan de overheid niet zomaar overal ingrijpen; het storttarief voor het afval is de meest waarschijnlijke keuze.

De optelsom van al deze kosten geeft de totale ketenkosten die in de keten worden gemaakt om te voldoen aan de vraag van de consument. Zoals in de vorige paragraaf al werd beschreven is de vraag van de consument naar het produkt hetingangssignaal dat de goederenstromen in gang zet. Het is mogelijk om de totale ketenkosten te relateren aan de grootte van deze vraag. Dan zouden de economische prestaties bij verschillende kwantiteiten van de vraag op verschillende tijdstippen met elkaar kunnen worden vergeleken. Deze ketenkosten per gevraagd produkt zijn een maat voor de eerder genoemde efficiëntie van de keten in zijn geheel.

De ketendeelnemers hebben een gemeenschappelijk belang bij het verlagen van de ketenkosten. Dit kan immers leiden tot een verlaging van de produktiekosten en dit voordeel kan door de producent gedeeld worden met de consument door het verlagen van de transactieprijs. Het gemeenschappelijk belang van de ketendeelnemers is een goede motivatie tot het maken van afspraken over de planning van de goederenstromen. Natuurlijk kan de producent ook proberen lagere produktiekosten te realiseren door het productieproces aan te passen. Vaak gaat dit vergezeld van investeringen. Daarbij wordt er van uitgegaan dat er sprake is van rationeel-economische ketendeelnemers, die kennis hebben van de economische gevolgen van de keuzen die ze kunnen maken (wat in werkelijkheid zelden het geval is) en daarbij ook alleen economische consequenties mee laten tellen. Deze hypothese zorgt er voor dat het gedrag van de keten bekend is, als van alle toegestane alternatieven de ketenkosten bekend zijn. De keten zal dan automatisch kiezen voor het goedkoopste, toegestane alternatief. Heel simpel gezegd: de keten streeft naar kostenminimalisatie.

5.5 De omgeving van de keten

5.5.1 Het politieke proces

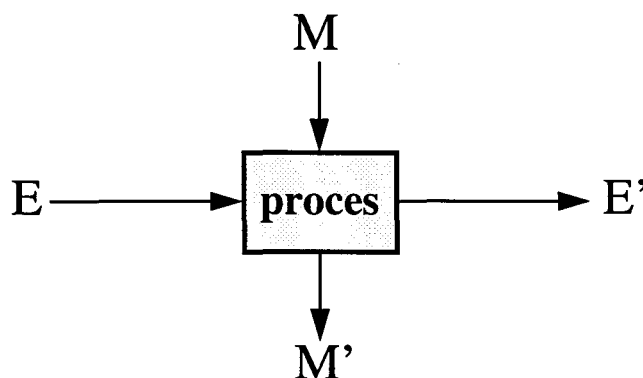
De keten is een onderdeel van de maatschappij en daarom onderhevig aan alle dynamiek en turbulentie van die maatschappij. Dat maakt de keten tot een open systeem. Het trekken van grenzen tussen keten en omgeving is een min of meer arbitraire keuze, die toch gemaakt moet worden om het voor iedereen duidelijk te maken wat de analyse van de keten wel en niet behelst. In Figuur 12 zijn alleen de inkomende en uitgaande goederenstromen aangegeven. In de vorige paragraaf is echter al opgemerkt dat de producent en de consument voor ieder produkt of iedere handeling middelen daartoe uit de omgeving moeten halen en geld moeten betalen aan die buitenwereld.

De omgeving heeft een economisch belang bij het bestaan van de keten. De keten zorgt voor arbeid, zorgt voor welvaart, zorgt voor belastingen en is daarom van belang voor de maatschappij. Het gehele economische leven speelt zich immers in dit soort ketens af, of het nou gaat om landbouw, industrie, dienstverlening of de overheid. Daarom is de maatschappij sterk afhankelijk van het economisch welzijn van de keten. De maatschappij heeft echter ook nog andere dan economische belangen. Het economisch belang wordt steeds vaker afgewogen met milieubelangen. De maatschappij heeft naast welvaart ook behoefte aan welzijn. Niet alleen de bevrediging van behoeften is belangrijk; er wordt ook aandacht besteed aan de gevolgen hiervan voor de natuur. Het kan zijn dat het economisch belang in strijd is met milieubelangen. Het blijkt echter een moeilijke afweging te zijn welk van beide belangen in zulke gevallen de hoogste prioriteit heeft. Dit wordt niet uitgemaakt door de keten zelf; hier is sprake van politieke afwegingen en het is de taak van regeerders en wetgevers, eventueel gesteund door de publieke opinie, om te komen tot een standpunt dat de belangen van de maatschappij op zowel de korte als de lange termijn het beste behartigt. Dit politieke proces richt zich op de goederenstromen in de keten, maar maakt geen onderdeel uit van de keten zelf.

De beslissingen die in dit politieke proces worden genomen zijn van belang voor de keten. Het is de bedoeling van de overheid die deze beslissingen neemt, het verloop van de stromen in de keten ermee te beïnvloeden, en wel zodanig dat het gedrag van de keten zich voegt naar het gedrag dat de overheid voor ogen staat. De overheidsmaatregelen zijn voor het systeem keten een onafhankelijke en niet-manipuleerbare input. De overheid heeft hiervoor twee middelen tot zijn beschikking. Ten eerste is dat het middel van direct opleggen hoe groot bepaalde stromen mogen zijn, relatief of absoluut. De overheid legt dan middels wetgeving de keten percentages van hergebruik of absolute quota op. Dit middel laat de keten geen keuze. Een tweede middel om het gedrag van de keten te beïnvloeden is het heffen van belasting of het geven van subsidies. De keten is nog wel vrij om zelf keuzes te maken, maar sommige van de alternatieven waaruit de keten kan kiezen worden door de overheid aantrekkelijker gemaakt dan andere.

5.5.2 De milieu-effecten

De milieubelangen, die hierboven al werden genoemd, dienen net als de economische belangen in de keten zichtbaar te worden gemaakt. Nu is het net als bij de kosten mogelijk om de milieuschade, die door de keten wordt veroorzaakt, te vertalen in een vast aantal posten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het concept van het industriële metabolisme. De 'stofwisseling' van een industrieel proces ziet er uit als in Figuur 13. De ingaande stromen zijn de massastroom M en de energiestroom E . Nadat het proces heeft plaatsgevonden resteren de uitgaande massastroom M' en energiestroom E' . Deze energiestroom E' kan energie bevatten van een lagere kwaliteit dan E .



Figuur 13: De stofwisseling van een proces.

Tijdens een industrieel proces ontstaan altijd afval en emissies. Afval dient opgevat te worden als alles wat gecontroleerd in de ecologie wordt geloosd. Emissies ontsnappen ongecontroleerd in het mi-

lieu. Ze kunnen materieel (grond, lucht, water) en energetisch (trillingen, geluid) van aard zijn. De belangrijkste milieu-effecten die hieruit voortkomen, zijn [13]:

- Broeikaseffect
Stoffen die een rol spelen in het broeikaseffect zijn CO₂ (kooldioxide), CH₄ (methaan), N₂O (lachgas) en CFK's.
- Atmosferische Smog
De grootste veroorzakers van smog zijn O₃ (ozon) en de VOS (Volatile Organic Substances zoals benzinedamp en oplosmiddelen)
- Eutrofiëring
De eutrofiëring (Dit is het voedselrijk maken van de landbouwgrond door mest of kunstmest.) wordt veroorzaakt door NH₃ (ammoniak), P (fosfor) in allerlei verbindingen, en verbindingen met gebonden stikstof, zoals bij NO₃⁻ (nitraten) en NO₂⁻ (nitrieten).
- Verzuring
De grootste veroorzakers van zure regen zijn NH₃ (ammoniak, ontstaat hoofdzakelijk binnen de landbouw uit bijvoorbeeld urinedamp), SO₂ (zwaveldioxide, ontstaat heel centraal in energiecentrales en aardolieraffinaderijen) en NO_x (deze verbindingen ontstaan bij verbrandingsprocessen, waarbij de stikstof in de lucht reageert met zuurstof).
- Ozonlaagaantasting
De afname van de dikte van de ozonlaag wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door CFK's.
- Zware metalen
Tot de zware metalen behoren Hg (kwik), Cu (koper), Pb (lood) en Cd (cadmium).
- Ecotoxiciteit
Onderscheid wordt gemaakt tussen aquatische ecotoxiciteit en terrestrische ecotoxiciteit.
- Uitputting van biotische en abiotische grondstoffen
- lawaai
- stank

De eenheid van de meeste milieu-effecten is steeds de kilogram van één van de genoemde stoffen. Het effect van de andere stoffen die ook bijdragen aan dat milieu-effect, wordt met een omrekeningsfactor berekend. Zo wordt bijvoorbeeld bijdrage aan het broeikaseffect uitgedrukt in GWP. Eén GWP komt overeen met 1 kg CO₂-equivalent.

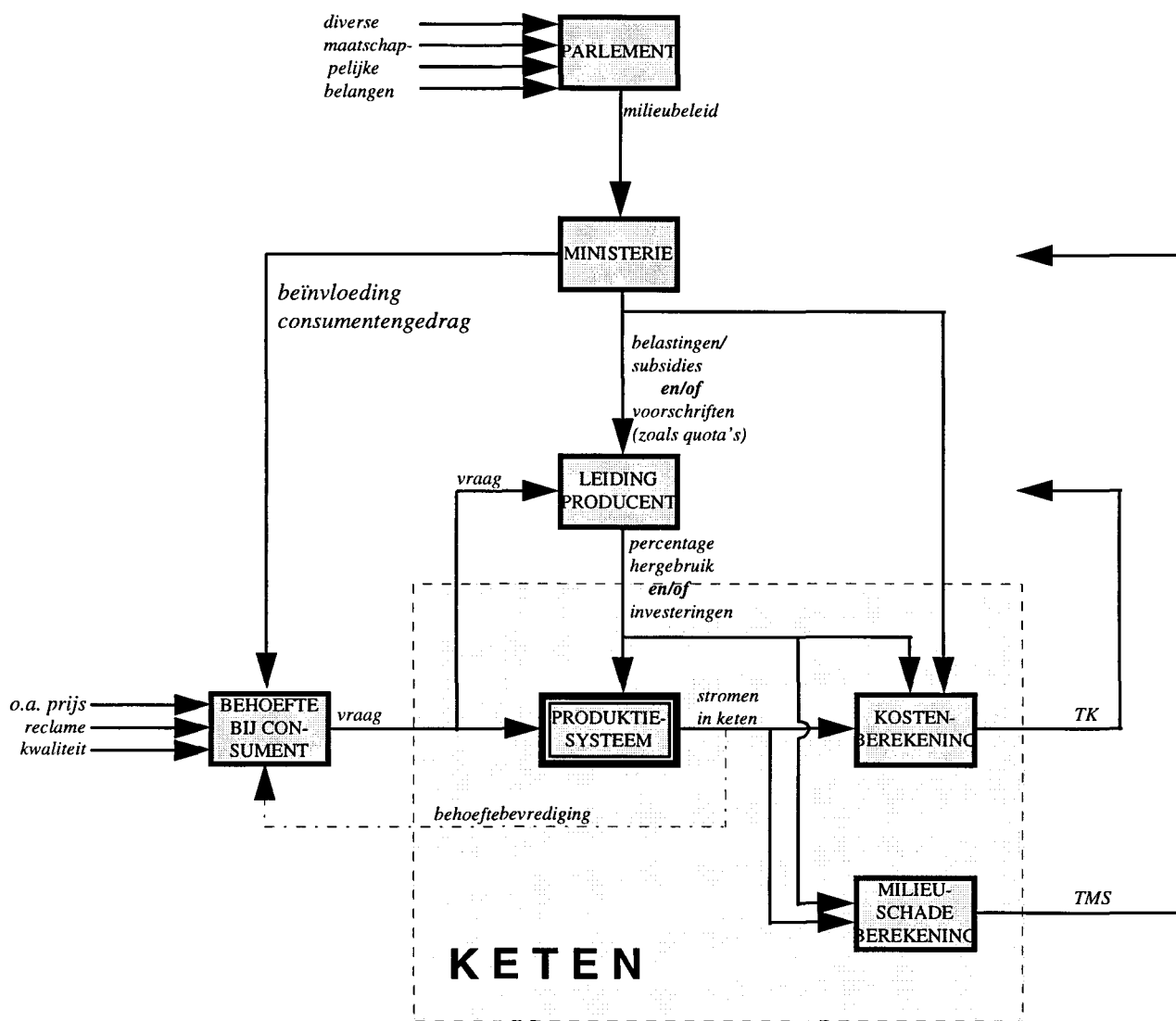
De kosten konden eenvoudig bij elkaar worden opgeteld, maar dat geldt niet voor de milieu-effecten; die hebben immers verschillende eenheden. Er moet dus ook hier een gewichtsfactor of omrekeningsfactor worden opgesteld om te komen tot één getal dat de milieuschade aangeeft. Dat is geenszins gemakkelijk, omdat de perceptie van de ernst van de milieu-effecten subjectief is. De berekening van de totale milieuschade of een milieu-index is daarom enigszins aan modeverschijnselen onderhevig. Hierop wordt teruggekomen in hoofdstuk 8.

5.6 De systeembenadering

In de voorgaande paragrafen is een groot aantal hypothesen opgesteld, die hieronder nogmaals op een rijtje worden gezet:

- De keten beschrijft één produkt. In de keten komen geen meerdere produkten tegelijk voor. Substitutie van het ene produkt door een tweede produkt met een andere samenstelling wordt dus niet in het model meegenomen.
- Al het geld dat rondgaat in de keten komt uiteindelijk terecht in de omgeving bij personeel, banken, aandeelhouders, leveranciers en overheid.
- De transactieprijs van het produkt is wel van belang voor de consument en de producent, maar heeft geen invloed op de economische prestatie van de keten.
- De totstandkoming van de vraag wordt buiten de analyse gehouden. De vraag wordt de keten opgelegd, en is een onafhankelijke, niet-manipuleerbare input. Ze is hetingangssignaal dat de stromen binnen de keten in beweging brengt.
- De producent voldoet aan de vraag. Er is enige dynamica in het spel, wat een faseverschil kan veroorzaken.
- De economische ketenprestatie wordt weergegeven door de totale ketenkosten. De keten streeft ernaar deze te minimaliseren op grond van concurrentie met andere ketens. De ketenkosten kunnen eventueel worden gerelateerd aan de grootte van de vraag. De ketendeelnemers kunnen afspraken maken over het verloop van de goederenstromen, omdat zij een gemeenschappelijk belang hebben bij het verlagen van de totale ketenkosten. Hierbij dient de consument een volwaardige partij te zijn.
- Niet alleen door het plannen van de ketenstromen, maar ook door het aanpassen van het proces kan de producent de ketenkosten proberen te verlagen.
- De milieuprestatie van de keten wordt uitgedrukt door de totale milieuschade. Dit is een enigszins subjectieve maat, die een gewogen gemiddelde is van alle objectief waarneembare milieu-effecten.
- Het parlement heeft de taak om economische belangen af te wegen tegen milieubelangen. Dit politieke proces van het stellen van prioriteiten wordt buiten beschouwing gelaten, maar de uitkomsten ervan zijn belangrijk voor het verloop van de goederenstromen binnen de keten.
- De overheid probeert, overeenkomstig de doelstellingen van het parlement, het ketengedrag te sturen opdat het overeenkomt met een bepaald gewenst gedrag. Daartoe heeft de overheid twee middelen: directe maatregelen zoals quoteringen, of belastingen/subsidies.

Dit systeem kan als geheel worden weergegeven in één figuur, zoals is gedaan in Figuur 14. Deze figuur is slechts één voorbeeld van een mogelijke configuratie. Op verschillende niveaus worden maatregelen genomen om het systeem te manipuleren. Het parlement geeft het ministerie een richtlijn. Het ministerie neemt maatregelen. De producent in de keten neemt, gegeven het overheidsbeleid, zijn maatregelen om de ketenkosten te minimaliseren. Deze figuur, en met name het deel dat in het vak dat aangegeven wordt door het woord keten, zal in de hieropvolgende hoofdstukken centraal staan.



Figuur 14: Een blokschema van het systeem van de elementaire keten. De inwendige structuur van de keten wordt niet weergegeven. De afkorting TMS staat voor Totale MilieuSchade, de afkorting TK staat voor Totale Kosten. De tijdsafhankelijkheid is voor het overzicht achterwege gelaten.

6. Modelvorming

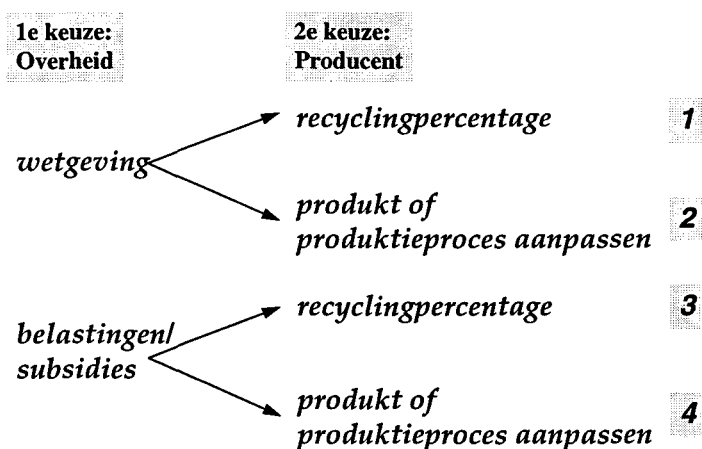
6.1 Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk is de elementaire keten opgesteld, en zijn de inputs en relevante outputs van de keten aangegeven. De aannamen die daarbij zijn gemaakt, werden becommentarieerd.

Dit hoofdstuk bouwt verder op de ideeën van het vorige hoofdstuk. In paragraaf 2 wordt uitgelegd welke van vier mogelijke combinaties van inputs verder wordt bestudeerd. Daarna wordt in paragraaf 3 het dynamisch gedrag van de keten geanalyseerd. Er wordt in discrete tijd een stelsel vergelijkingen opgesteld dat het verband geeft tussen de inputs en de stromen in de keten. Het is noodzakelijk dat hierbij een keuze wordt gemaakt voor een productiesysteem dat de vraag en de productie aan elkaar koppelt. Er worden vier productiesystemen besproken. Het stelsel vergelijkingen dat in paragraaf 3 werd opgesteld, wordt in paragraaf 4 in de kenmerkende vorm van de systeemvergelijkingen met toestandsrepresentatie opgeschreven. Het gedrag van de stromen in de keten wordt dan zodanig uitgedrukt, dat de toestand in iedere periode geschreven kan worden als een functie van de toestand in de vorige periode en de inputs.

6.2 Vier mogelijke strategieën

In de praktijk is het mogelijk dat de overheid en de producent strategieën zullen ontwikkelen voor het behalen van hun doelstelling waarbij er sprake is van een combinatie van inputs. De producent zal bijvoorbeeld de ketenkosten proberen te minimaliseren door zowel te zoeken naar het juiste recyclingpercentage én door bovendien te zorgen voor een zo gunstig mogelijk productieproces. In de onderstaande figuur is echter voorbijgegaan aan de mogelijkheid van combinaties, en wordt van de overheid en de producent geëist dat zij kiezen voor één input. Dat levert vier combinaties op, omdat zoals in het vorige hoofdstuk in Figuur 14 werd aangegeven zowel de overheid als de producent twee keuzemogelijkheden ter beschikking staan.



Figuur 15: De vier mogelijke combinaties als gevolg van de twee keuzemogelijkheden van de overheid en van de producent.

Deze vier alternatieven zijn ieder de moeite waard om afzonderlijk bestudeerd te worden om zo te komen tot een model waarin ook combinaties van de keuzemogelijkheden mogelijk zijn. Er doet zich hierbij echter een praktisch probleem voor. Het is namelijk moeilijk om voor een algemene keten een verband te vinden tussen de kosten, de milieuschade en de input 'aanpassingen van het productieproces'. Bij deze input zijn de gevolgen voor de criteria niet bekend. Het is uiteraard wel mogelijk om deze gevolgen zo vaag mogelijk te definiëren als een functie van onbekende vorm, maar dan wordt het probleem verschoven naar degene die de functie ooit moet invullen. Als men derhalve wil kiezen voor alternatief 2 of alternatief 4, dan dient men zich verder te verdiepen in dit probleem. Dit kan naar mijn mening het beste tot stand worden gebracht door te kijken naar één concrete produkt-proces-keten bij een bepaalde producent. Het vervelende is dat de overheid in praktijk wel degelijk de keten oplegt het proces te veranderen, of het produkt te veranderen, of de vraag te veranderen (een combinatie mag natuurlijk ook), om zo op een milieu-vriendelijkere manier te functioneren. In het vorige hoofdstuk is echter al uitgelegd dat de keten geen produktveranderingen beschrijft; het gaat om één produkt met een vaste samenstelling. De speelruimte om het produkt uit de keten te veranderen wordt dus niet in het model meegenomen. Daarnaast is aangenomen dat de vraag een niet-manipuleerbare input is; de keten kan in het model de vraag niet beïnvloeden. Wat overblijft is de mogelijkheid om het proces aan te passen, maar zoals in de vorige alinea werd beschreven is dit een zeer vage input voor een model.

Een laatste input is het recyclingpercentage. Die input komt voor in alternatief 1 en 3, maar bij alternatief 1 gebeurt er iets "vreemds". De input 'recyclingpercentage' doet vermoeden dat de producent de vrijheid heeft om die zelf te kiezen. Maar de overheid legt juist door wetgeving een vast recyclingpercentage op; de overheid ontnemt de producent als het ware zijn input. De producent heeft vervolgens nauwelijks speelruimte meer om door veranderingen van het recyclingpercentage het economisch rendement te optimaliseren. Dit betekent dat het kiezen voor wetgeving de input van het recyclingpercentage eigenlijk onmogelijk maakt, tenzij er een soort financiële straf wordt ontworpen die afwijkingen van het percentage bestraft en daarmee het stringente van de wetgeving ontkracht. Men zegt dan eigenlijk: je hoeft je niet strikt aan de richtlijnen uit de wet te houden, als je maar betaalt voor de verschillen die ontstaan. Dan gaat het echter om een combinatie van belastingen (straffen) en wetgeving. Dit komt dicht in de buurt bij de praktijksituatie in Nederland. Er is dan geen sprake meer van de pure keuze voor alternatief 1, maar van een combinatie van alternatief 1 met alternatief 3.

Kijkend naar de moeilijkheden die hierboven worden opgesomd, is besloten om de eerste modelvorming te doen met de inputs volgens alternatief 3. Daarbij heeft dus de producent de input van het recyclingpercentage. De overheid laat de producent vrij om te kiezen welk percentage hij realiseert, maar stelt een systeem van subsidies en belastingen in om de producent te manipuleren tot gewenst gedrag. In de praktijk zou de overheid het storttarief kunnen bepalen.

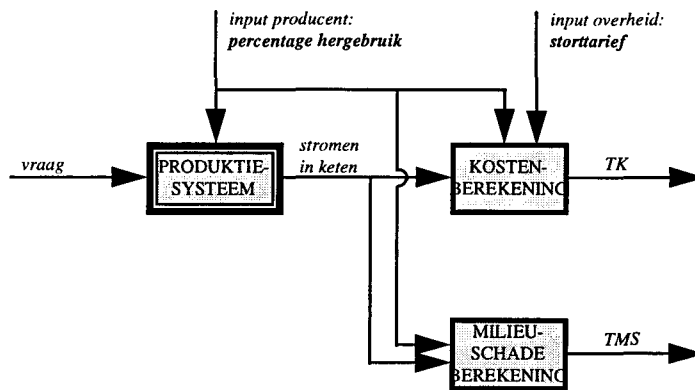
6.3 Het dynamisch gedrag

6.3.1 Belangrijkste aannamen

Voordat het dynamisch gedrag van de keten beschreven zal worden, worden eerst enkele aannamen behorende bij alternatief 3 en het systeem van de elementaire keten herhaald:

- De vraag is een niet-manipuleerbare input.
- De producent heeft als doelstelling een minimalisatie van de totale ketenkosten. Hij kan dit bereiken met de input van het recyclingpercentage α .
- De overheid minimaliseert een andere doelstelling, waarin ook het milieubelang tot uiting komt. Hiervoor heeft de overheid het storttarief s als manipuleerbare input.
- De producent voldoet aan de vraag door een voorraadsysteem. Het productiesysteem is voor de tijd van beschouwing niet veranderbaar.

Het blokschema van de elementaire keten uit het vorige hoofdstuk (zie Figuur 14) krijgt een verder gespecificeerde vorm, zoals dat is weergegeven in Figuur 16.



Figuur 16: Blokschema van alternatief 3 met de input van de producent en de input van de overheid. De afkorting TK staat voor Totale Kosten, en TMS staat voor Totale MilieuSchade.

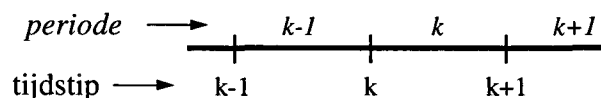
Het vervolg van dit hoofdstuk richt zich op de totstandkoming van de stromen in de keten als gevolg van de inputs vraag en percentage hergebruik, en als gevolg van de beginsituatie.

6.3.2 De duur van een periode

De dynamische vergelijkingen geef ik weer in discrete tijd. Al eerder is aangegeven dat in bedrijven en instellingen (zoals de producent en de overheid) rapportages vaak periodiek plaatsvinden. Informatie wordt eens in de zoveel tijd na een vaste periode weergegeven. Het is van belang te beseffen dat de periode van beschouwing verschilt per niveau in de organisatie. Dit komt overeen met een multi-horizon regelsysteem zoals wordt beschreven in de analyse van hiërarchische systemen door de theorie van de Multilayer Systems [14]. In appendix B wordt nader ingegaan op de verschillende niveaus binnen een organisatie en hun termijnstelling. Op het tactisch en strategisch niveau is de periode vaak een maand, een kwartaal of een jaar, en wordt de tijdshorizon gesteld op enkele jaren. De keuze voor de duur van de periode wordt bepaald door het doel van de analyses van de keten. (Het is overigens mogelijk om de duur van een periode aan te passen aan een concrete situatie. De periodeduur Δt dient eigenlijk voor iedere keten apart bepaald te worden.) Bij de beslissingsondersteuning, waar dit model voor wordt gemaakt, is het niet nodig om te kiezen voor een lager hiërarchisch niveau dan het tactische niveau, en daarom wordt de duur van één periode gelijk gesteld aan een maand. Deze tijdsspanne is in het vervolg de voor het systeem karakteristieke tijd Δt . Er dient geen verwarring te ontstaan met de doorlooptijd van het bedrijf; die kan aanmerkelijk korter, maar ook langer zijn.

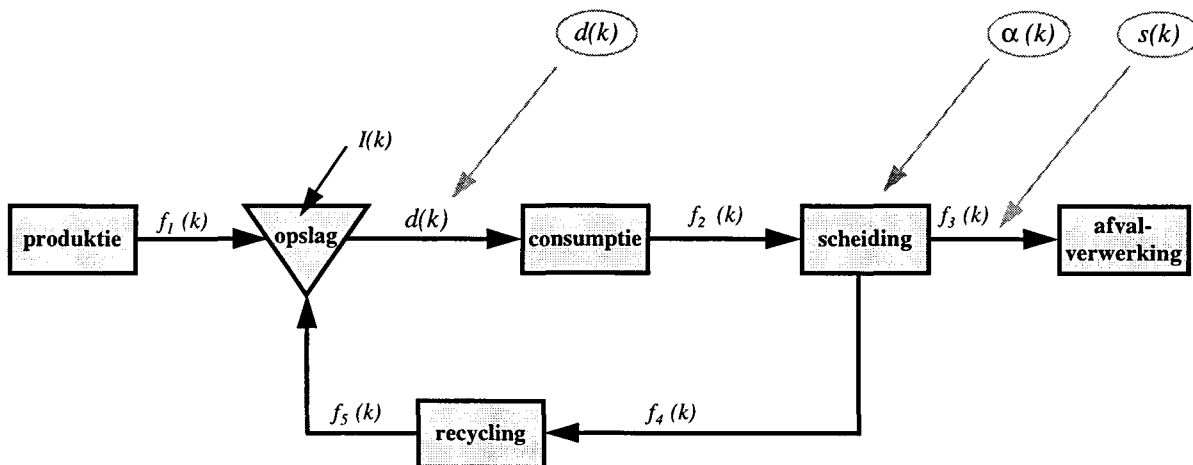
6.3.3 De vergelijkingen

In dit hoofdstuk wordt het verband tussen de beginsituatie, het traject van de inputs en het traject van de stromen in de keten weergegeven. Voor de vergelijkingen hanteren we de volgende tijdbalk:



Periode k volgt dus op tijdstip k . De stromen in de keten worden uitgedrukt in eenheden product per periode. De voorraadhoogte wordt vastgesteld op een tijdstip k .

De elementaire keten werd al gedefinieerd in het vorige hoofdstuk. De aannamen en het blokschema in paragraaf 6.3.1 geven een nog iets gedetailleerder beeld van de elementaire keten. In Figuur 17 is weergegeven waar de inputs van de overheid en de producent, alsmede de vraag, in de keten 'aangrijpen'. Voor het model wordt de stroom van de grondstofleverancier naar producent niet meegenomen; deze stroom kan worden genormeerd in een zekere verhouding met de stroom geproduceerde aantallen. De benodigde ingrediënten, grondstoffen of materialen per product staan vast, en het aantal producten in een periode k (de stroom $f_1(k)$) bepaalt hun volumina.



Figuur 17: De elementaire keten met de stromen $f_i(k)$, de vraag $d(k)$, de voorraadhoogte $I(k)$, de input van de producent $\alpha(k)$ en de input van de overheid $s(k)$. Van de goederen in de stroom $f_2(k)$ wordt α (*100) procent hergebruikt en $(1-\alpha)$ (*100) procent gaat naar de afvalverwerking.

Met de tijdbalk en met Figuur 17 is het mogelijk om onder aanname van massacontinuïteit (en met nog enkele andere aannamen die hieronder worden gepresenteerd) de vergelijkingen op te stellen.

Voor de voorraad geldt:

$$I(k+1) = I(k) + f_1(k) + f_5(k) - d(k) \quad \text{verg. 6.1}$$

De vraag $d(k)$ en de andere stromen $f_i(k)$ kunnen in de figuur eenvoudig herkend worden. De voorraadhoogte $I(k)$ mag negatief zijn; het is de economische voorraad. Een negatieve $I(k)$ correspondeert met een hoeveelheid producten, die al wel besteld is, maar nog moet worden geleverd.

De 'uitstoot' van producten uit het station consumptie volgt onder andere uit de gebruiksduur van het product. Deze duur kan constant zijn, maar in de praktijk is dat zelden het geval. Om die reden wordt een kansverdelingsfunctie $g_c(h)$ ingevoerd, die de kans weergeeft dat een product h perioden na aankoop door de consument van de hand wordt gedaan. De maximale levensduur van het product is H perioden. De aanname van massacontinuïteit vereist dat er geen producten verloren gaan, dus de som van de kansen dient gelijk te zijn aan één. Er geldt:

$$\sum_{h=1}^H g_c(h) = 1 \quad \text{verg. 6.2}$$

Nu is het mogelijk de ‘uitstoot’ uit het station consumptie ($f_2(k)$) uit te drukken als functie van de vraag in de voorgaande perioden. Deze vergelijking ziet er als volgt uit:

$$f_2(k) = \sum_{h=1}^H g_c(h) \cdot d(k-h) \quad \text{verg. 6.3}$$

Deze stroom $f_2(k)$ wordt door het recyclingspercentage $\alpha(k)$ opgesplitst in twee stromen: één naar de afvalverwerking ($f_3(k)$), en één naar het prepareren voor hergebruik ($f_4(k)$). Hierbij is $\alpha(k)$ de input van de producent. Er wordt aangenomen dat het ophalen van het afval en het uitselecteren één periode kost. Dan geldt:

$$f_3(k+1) = [1 - \alpha(k)] \cdot f_2(k) \quad \text{verg. 6.4}$$

$$f_4(k+1) = \alpha(k) \cdot f_2(k) \quad \text{verg. 6.5}$$

De vermenigvuldiging van de input $\alpha(k)$ met de stroom $f_2(k)$ in de bovenstaande twee vergelijkingen wijst uit dat het om een niet-lineair systeem gaat. Voor het recyclingpercentage $\alpha(k)$ (welgesteld gaat het eigenlijk om de *recyclingsfractie*. Het percentage is $\alpha \cdot 100$.) geldt de belangrijke voorwaarde:

$$0 \leq \alpha(k) \leq 1 \quad \text{verg. 6.6}$$

Voor de recycling wordt net als bij het station consumptie een variabele duur gekozen. Het is mogelijk dat het ene produkt een wat langduriger preparatie voor hergebruik vergt dan het andere produkt. Daarom wordt er analoog aan de consumptie een rij kansen $g_r(j)$ opgesteld. Ook hier geldt:

$$\sum_{j=1}^J g_r(j) = 1 \quad \text{verg. 6.7}$$

De maximale duur die nodig is om een produkt volledig klaar te maken voor hergebruik is J perioden.

De stroom produkten van het station recycling naar het voorraadpunt wordt gegeven door:

$$f_5(k) = \sum_{j=1}^J g_r(j) \cdot f_4(k-j) \quad \text{verg. 6.8}$$

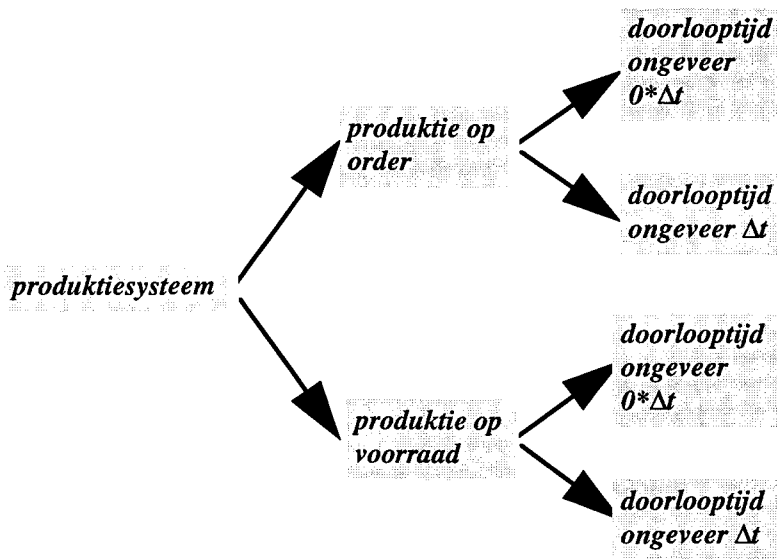
In het bovenstaande stelsel vergelijkingen ontbreekt er nog één, en dat is de vergelijking die de produkthoeveelheid berekent. De produktie moet op één of andere manier worden gekoppeld aan de vraag en aan de stroom goederen die na preparatie worden hergebruikt. Deze koppeling vereist dat de producent dient te kiezen voor een productiesysteem.

6.3.4 Productiesystemen

Het doel van het productiesysteem in dit onderzoek is het koppelen van de vraag aan de produktie. In praktijk zijn er zeer uiteenlopende, soms zelfs verfijnde productiesystemen in gebruik [15]. Zonder in detail te treden is het mogelijk een grove opdeling te maken tussen produktie op order, en produktie

voor voorraad. In het eerste geval wordt er pas geproduceerd als de vraag naar het produkt al bekend is, in het tweede wordt de beslissing tot produktie genomen op grond van de voorraadhoogte en/of op grond van vraagvoorspellingen. De produktie voor voorraad biedt producenten vele mogelijkheden om hun produktiebeslissingen te nemen. De logistiek houdt zich onder andere met dit soort systemen bezig.

Om enigszins een beeld te geven van enkele rudimentaire logistieke systemen zijn er vier produktie-systemen opgesteld. Er is een systeem met produktie op order gekozen, en een systeem met produktie voor voorraad. Voorts is nog een andere belangrijke parameter meegenomen, namelijk de doorlooptijd. Er is een simulatie uitgevoerd voor beide systemen met een doorlooptijd die veel korter is dan de periodetijd Δt , en één die ongeveer gelijk is aan Δt . De vier systemen zijn schematisch weergegeven in Figuur 18.



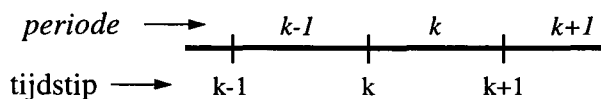
Figuur 18: Vier verschillende produktiesystemen.

Hieronder worden de bovenstaande vier produktiesystemen besproken:

produktie op order en een verwaarloosbare doorlooptijd

Dit systeem lijkt veel op het Just In Time-systeem (JIT) dat in Japan is ontwikkeld [16]. Het is ontworpen om zo min mogelijk voorraden er op na te houden. Daarom wordt een produkt pas gemaakt als de order er is. Dit betekende voor de Japanse bedrijven dat er het risico was dat klanten weg zouden lopen omdat ze op hun produkt moesten wachten. Dit is op twee manieren opgelost: allereerst door flexibele, snelle produktie, en ten tweede door de voorraden te verschuiven naar importeurs en winkels.

Voor het opstellen van de produktiefunctie dient de tijdsbalk opnieuw in herinnering te worden gebracht:



Op tijdstip k is bekend welke orders in de komende periode verwerkt moeten worden. Tevens is op tijdstip k bekend wat er van de preparatie voor hergebruik terugkomt naar het voorraadopunt ($f_5(k)$). Het verschil moet worden geproduceerd. Uiteraard kan de produktie niet negatief zijn: als er een periode meer terugkomt dan er wordt gevraagd, is de produktie nul. Er geldt dan:

$$f_1(k) = \max[d(k) - f_5(k), 0]$$

verg. 6.9

productie op order en een doorlooptijd van een periode

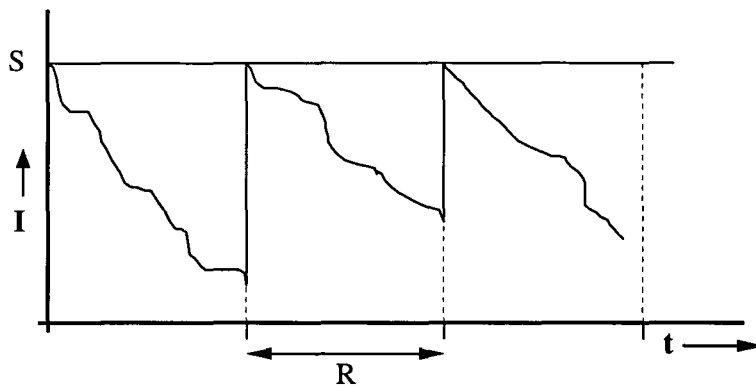
Het systeem is eigenlijk hetzelfde als bij JIT, alleen geldt voor dit produkt een langere produktieduur. Dit zou bijvoorbeeld kunnen gelden voor produkten die op het laatste moment nog aan de specifieke wensen van de klant moeten worden aangepast. De doorlooptijd is ongeveer één periode. Dat betekent dat op tijdstip k al in productie moet worden genomen wat in periode $k+1$ wordt geleverd $f_1(k+1)$. Een voorspelling van de vraag is echter niet nodig, want er wordt geproduceerd op order. De klant wacht dus een periode op de bestelling. De kennis van de vraag $d(k+1)$ mag er dan al wel zijn op tijdstip k , maar het is niet bekend hoe groot over een periode (in periode $k+1$) de stroom produkten voor hergebruik ($f_5(k+1)$) naar het voorraadpunt zal zijn. Deze stroom wordt benaderd door te kijken naar de huidige stroom $f_5(k)$. Andere voorspelmethode zijn uiteraard ook mogelijk, maar worden buiten beschouwing gelaten. De productiebeslissing volgt nu uit de volgende vergelijking:

$$f_1(k+1) = \max[d(k+1) - f_5(k), 0]$$

verg. 6.10

productie op voorraad met verwaarloosbare doorlooptijd

Bij dit en bij het volgende systeem wordt er niet gekeken naar de vraag. Iedere periode wordt er een beslissing genomen op grond van de voorraadhoogte. Al eerder werd gezegd dat er tal van beslissingsmanieren denkbaar zijn. Er is gekozen voor één van de eenvoudigste. In de logistiek wordt dit vaak een (R,S)-systeem genoemd [17]. Het verloop van de voorraad in een dergelijk systeem is weergegeven in Figuur 19.



Figuur 19: Weergave van het verloop in de voorraad van een (R,S) model met verwaarloosbaar korte doorlooptijd.

In de figuur is te zien dat na een vaste periode R een bestelling wordt geplaatst die de voorraad precies aanvult tot een niveau S . Omdat de doorlooptijd ten opzichte van R kort is, is de order er in de figuur meteen. In het model zijn R en Δt aan elkaar gelijk. De hoogte van S wordt nog niet vastgelegd. Deze voorraadsnorm wordt in het vervolg gerepresenteerd door de letter N .

$$f_1(k) = \max[N - I(k) - f_5(k), 0]$$

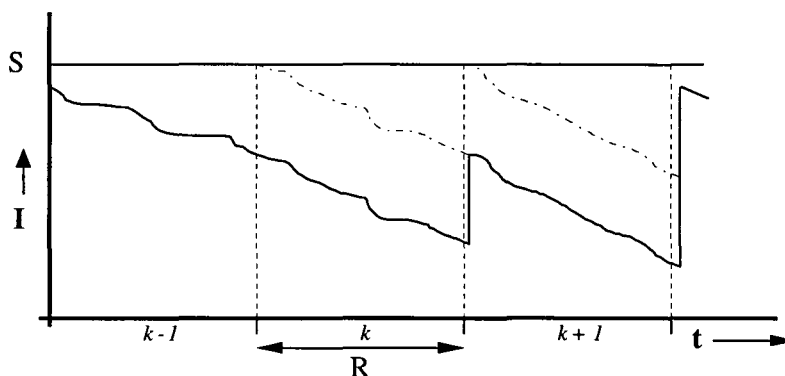
verg. 6.11

Op het tijdstip k heeft de beslisser informatie over wat er terugkomt deze periode (analoog aan de aanname van de twee productie-op-order-modellen.), en wat het voorraadniveau is. De productiebe-

slissing wordt genomen, en de goederen worden nog in dezelfde periode k geleverd omdat de doorlooptijd veel korter is dan Δt .

produktie op voorraad met een doorlooptijd van een periode

Net als hiervoor wordt gebruik gemaakt van een (R,S)-systeem. Ditmaal is de doorlooptijd echter ongeveer een periode. Dat betekent dat de productie-order die op tijdstip k wordt afgegeven, pas wordt geleverd in periode $k+1$. Op tijdstip k heeft de beslisser informatie over wat er op dat moment in de voorraad zit ($I(k)$) en over wat er op dat moment terugkomt voor hergebruik ($f_5(k)$). De werkingen van het systeem zijn schematisch weergegeven in Figuur 20. Een belangrijk gegeven is dat de productie-order op tijdstip $k+1$ uitgegeven wordt op basis van de actuele voorraadhoogte en deze producten worden geleverd in periode $k+2$. De produktiestroom $f_1(k+1)$ komt na tijdstip $k+1$ binnen.



Figuur 20: Een (R,S)-systeem met een doorlooptijd van ongeveer een periode.

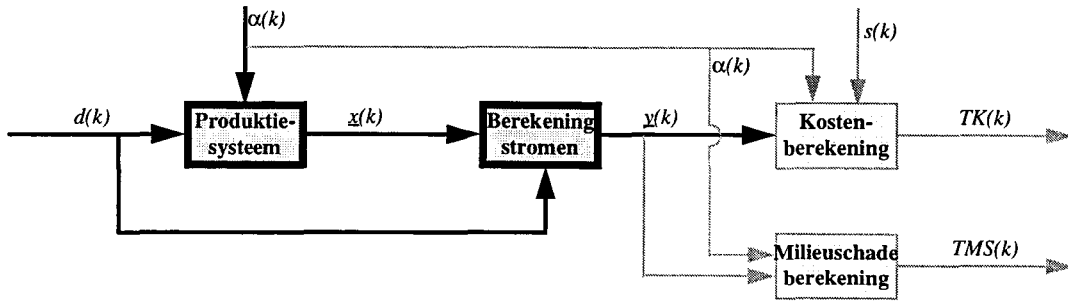
De vergelijking die bij dit systeem hoort lijkt op de vorige, alleen veroorzaakt de doorlooptijd een verschuiving in de tijd:

$$f_1(k+1) = \max[N - I(k) - f_5(k), 0] \quad \text{verg. 6.12}$$

6.4 Toestandsrepresentatie

6.4.1 Methode

De toestandsbeschrijving van een systeem biedt de mogelijkheid om het gedrag van dat systeem eenduidig vast te leggen, gegeven de begintoestand van het systeem en het traject van de inputs. De toestand op een tijdstip k_0 is dus een verzameling getallen die tezamen met de ingangssignalen d en α op het interval (k_0, k) het uitgangssignaal op het tijdstip k eenduidig vastlegt [18]. Hierbij is de toestand niet een verzameling grootheden die aan het tijdstip k_0 vast zit; de toestand is een functie van de tijd. Het is de bedoeling om ook het systeem van de elementaire keten op deze manier te beschrijven. Met de vergelijkingen uit paragraaf 6.3 is het mogelijk om voor ieder productiesysteem een toestand $\underline{x}(k)$ te definiëren en daarmee het stelsel vergelijkingen in een vorm te schrijven die beknopt weergeeft wat de (aktuele) interne toestand $\underline{x}(k)$ van het systeem is, en hoe de interne toestand in de volgende periode $\underline{x}(k+1)$ tot stand komt als gevolg van de actuele toestand en inputs $\underline{u}(k)$. Deze toestand levert, samen met de vraag, de stromenector $\underline{y}(k)$. Hiervoor is een berekening in twee stappen opgesteld. In een blokdiagram ziet dat er als volgt uit:



Figuur 21: Weergave van de berekening van de stromenvector $\underline{y}(k)$. Het daaropvolgende gedeelte (weergegeven zoals in hoofdstuk 5, Figuur 14) met de Kostenberekening en Milieuschadeberekening komt niet in dit hoofdstuk aan bod (zie hoofdstuk 8) en is daarom iets lichter aangegeven.

Mits geldt dat $f_i(k) > 0$ voor alle k binnen de beschouwing, dan kan voor elk der vier produktiesystemen het stelsel vergelijkingen in de volgende twee algemene vormen worden geschreven [19] [20]:

$$\underline{x}(k+1) = A \cdot \underline{x}(k) + B(\underline{x}(k)) \cdot \underline{u}(k) \quad \text{verg. 6.13}$$

De berekening van de stromenvector $\underline{y}(k)$ ziet er dan als volgt uit:

$$\underline{y}(k) = C \cdot \underline{x}(k) + D \cdot \underline{u}(k) \quad \text{verg. 6.14}$$

De voorwaarde dat $f_i(k) > 0$ is hierbij van groot belang. Er zijn echter veel systemen waarbij aan deze voorwaarde wordt voldaan. Een voorbeeld van een toestandsdefinitie voor het JIT-produktiesysteem vindt in de volgende subparagraaf plaats. De toestandsdefinities voor de overige drie systemen zijn opgenomen in appendix D.

6.4.2 Toepassing op een keten met een JIT-produktiesysteem

De bovenstaande vergelijkingen kunnen aanschouwelijk gemaakt worden in een voorbeeld. Er wordt gekozen voor het systeem met productie op order en een verwaarloosbare doorlooptijd. De berekening van de stromenvector $\underline{y}(k)$ geschiedt volgens het blokschema in Figuur 21. De inputs $d(k)$ en $\alpha(k)$ komen onder elkaar te staan in de inputvector $\underline{u}(k)$.

Binnen de keten hebben de transferfuncties van de stations consumptie en recycling een algemeen karakter. De beide transferfuncties worden meegenomen in de toestandsrepresentatie. Voor uitleg hierover kan Appendix C worden geraadpleegd. H (de maximale gebruiksduur) en J (de maximale duur voordat een goed geprepareerd is voor recycling) dienen te worden vastgesteld, want de lengte van de vector die de toestand in het ketenmodel representeert, is afhankelijk van de keuze voor H en J , oftewel van de lengte van de interne toestanden van de stations consumptie ($\underline{x}_c(k)$) en recycling ($\underline{x}_r(k)$). Voor het logistieke systeem met productie op order en een verwaarloosbare doorlooptijd wordt de toestand van de keten als volgt gedefinieerd:

$$\underline{x}(k) = \begin{pmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ \vdots \\ x_{H+J+2}(k) \\ x_{H+J+3}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I(k) \\ \underline{x}_c(k) \\ f_3(k) \\ f_4(k) \\ \underline{x}_r(k) \end{pmatrix} \quad \text{verg. 6.15}$$

De toestand bevat $H+J+3$ elementen. Dit betekent dat de systeemmatrix A van als gevolg hiervan de dimensie $H+J+3 \times H+J+3$ moet zijn.

De inputs worden gegeven door de vector $\underline{u}(k)$:

$$\underline{u}(k) = \begin{pmatrix} d(k) \\ \alpha(k) \end{pmatrix} \quad \text{verg. 6.16}$$

De echte stromen in de keten en ook de voorraadhoogte worden uitgedrukt in de vector $\underline{y}(k)$ en kunnen uit de toestand en de input worden verkregen door vermenigvuldiging met de matrices C en D . Er geldt:

$$\underline{y}(k) = \begin{pmatrix} f_1(k) \\ I(k) \\ d(k) \\ f_2(k) \\ f_3(k) \\ f_4(k) \\ f_5(k) \end{pmatrix} \quad \text{verg. 6.17}$$

$$C_{7 \times (H+J+3)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & -C_r \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & C_c & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & C_r \end{pmatrix} \quad \text{verg. 6.18}$$

en:

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{verg. 6.19}$$

Hierbij heb ik expliciet de dimensie van C vermeld, omdat de elementen C_c (de rij getallen $g_c(h)$) en C_r (de rij getallen $g_r(j)$) geen getallen zijn, maar rijen van de dimensie H en J .

Een uitdrukking voor de matrices A en B kan het beste worden gegeven aan de hand van een voorbeeld, omdat de variabele dimensie $H+J+3$ een overzichtelijke algemene notatie moeilijk maakt.

6.4.3 Een voorbeeld

Om een keer een volledige vergelijking op schrift te stellen wordt een systeem beschouwd met de parameters $H = 3$ en $J = 2$. De toestand heeft dimensie $H + J + 3 = 8$ en ziet er als volgt uit (zie verg. 6.15):

$$\underline{x}(k) = \begin{pmatrix} I(k) \\ x_{c1}(k) \\ x_{c2}(k) \\ x_{c3}(k) \\ f_3(k) \\ f_4(k) \\ x_{r1}(k) \\ x_{r2}(k) \end{pmatrix} \quad \text{verg. 6.20}$$

De inputvector is al bekend uit vergelijking 6.16.

De systeemmatrix heeft dimensies 8x8 en ziet er als volgt uit:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_c(3) & g_c(2) & g_c(1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{verg. 6.21}$$

Hierbij is gebruik gemaakt van het feit dat als aan de voorwaarde $f_i(k) > 0$ wordt voldaan, dan wordt de voorraadvergelijking:

$$I(k+1) = I(k) + f_1(k) + f_5(k) - d(k) = I(k) \quad \text{verg. 6.22}$$

Inderdaad is het met JIT mogelijk om een laag voorraadniveau te handhaven.

Voor B geldt:

$$B = \begin{pmatrix} 0 & & & & & & & 0 \\ 0 & & & & & & & 0 \\ 0 & & & & & & & 0 \\ 1 & & & & & & & 0 \\ 0 & -\{g_c(3) \cdot x_2(k) + g_c(2) \cdot x_3(k) + g_c(1) \cdot x_4(k)\} & & & & & & \\ 0 & \{g_c(3) \cdot x_2(k) + g_c(2) \cdot x_3(k) + g_c(1) \cdot x_4(k)\} & & & & & & \\ 0 & & & & & & & 0 \\ 0 & & & & & & & 0 \end{pmatrix} \quad \text{verg. 6.23}$$

De stromen, onder elkaar gezet in de vector $\underline{y}(k)$ (zie vergelijking 2.17), kunnen worden berekend met de matrices C en D . Deze laatste matrix wordt gegeven door vergelijking 6.19. Voor C geldt (zie verg. 6.18):

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_r(2) & -g_r(1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_c(3) & g_c(2) & g_c(1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_r(2) & g_r(1) \end{pmatrix} \quad \text{verg. 6.24}$$

Met deze matrices kan, gegeven een begintoestand $\underline{x}(0)$ en de inputs $d(k)$ en $\alpha(k)$, het systeemgedrag worden berekend.

6.5 Terugblik

In dit hoofdstuk is voortgebouwd op de hypothesen van hoofdstuk 5. Allereerst is er een keuze gemaakt welke input de producent heeft en welke input de overheid heeft om het systeem van de elementaire keten te beïnvloeden. De producent hanteert als input het recyclingpercentage $\alpha(k)$, de overheid het storttarief s .

Toen de inputs geheel vastlagen, zijn er in discrete tijd vergelijkingen opgesteld die het verband tussen de inputs en de stromen in de keten weergeven. Hierbij is nog geen aandacht besteed aan de criteria die in hoofdstuk 5 werden genoemd, namelijk de totale ketenkosten en de totale milieuschade. De vergelijkingen beschrijven wel het dynamische gedrag van de stromen in de keten. Hierbij was het nodig het verband tussen de vraag, de stroom goederen uit het station recycling naar het voorraadopunt, de voorraadhoogte en de productie vast te leggen met een produktiesysteem. Er zijn vier mogelijke produktiesystemen bestudeerd; twee met productie op order en twee met productie op voorraad. Van iedere soort had één van de twee systemen een ten opzichte van de periodeduur verwaarloosbaar korte doorlooptijd, en het andere systeem had een doorlooptijd ter lengte van een periode. Hiermee lag voor ieder produktiesysteem het stelsel vergelijkingen en daarmee het verband tussende stromen en de inputs vast.

Vervolgens is aandacht besteed aan het formalisme van de toestandsrepresentatie, en de mogelijkheden die dit biedt. Voor één van de vier produktiesystemen is het stelsel vergelijkingen (onder voorwaarde dat $f_i(k) > 0$ voor alle k) in de toestandsrepresentatie weergegeven. In appendix D is hetzelfde gedaan voor de overige drie produktiesystemen.

7. Enkele logistieke simulaties

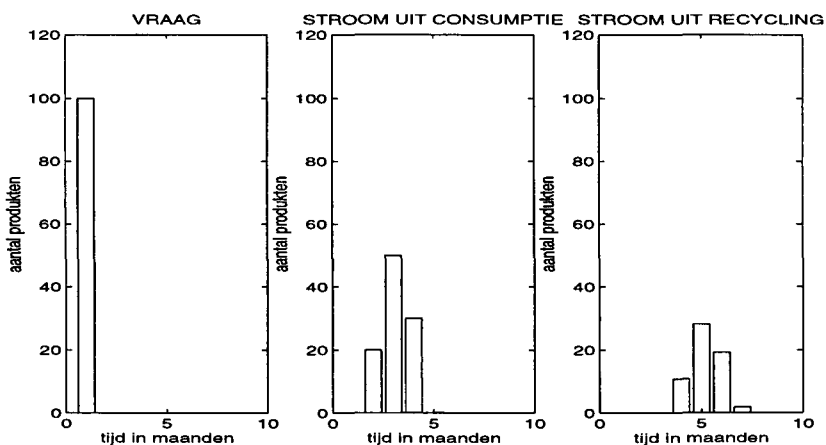
7.1 Inleiding

Het is mogelijk om met de modellen die in het vorige hoofdstuk zijn opgesteld voor vier verschillende produktiesystemen enkele logistieke simulaties uit te voeren. Het doel hiervan is enig inzicht te verkrijgen in de werkingen van de modellen. Twee interessante vragen zijn: bevestigen de modellen de dingen die binnen de logistiek al bekend zijn? En: kunnen de modellen dingen aan het licht brengen die (in eerste instantie) minder voor de hand liggend zijn? Bij de eerste vraag horen de simulaties in paragraaf 3, waar een situatie zonder hergebruik is gesimuleerd. Voor alle simulaties is gebruik gemaakt van een seizoensafhankelijke vraag; de periode van de schommelingen is daarbij uiteraard een jaar. Vervolgens wordt het hergebruikspercentage langzaam opgevoerd in paragraaf 4. De tweede vraag komt aan bod in de paragrafen 5 en 6.

Bij het opstellen van de toestandsrepresentatie is als voorwaarde gesteld dat de produktie $f_i(k)$ groter is dan nul. Bij de simulaties geldt daarentegen het oorspronkelijke stelsel niet-lineaire vergelijkingen. Bij het uitvoeren van alle simulaties is voortgebouwd op het voorbeeld uit het vorige hoofdstuk met $H=3$ en $J=2$. Voor de kansen $g_c(h)$ en $g_r(j)$ zijn de volgende getallen gebruikt: $g_c(1) = 0,2$, $g_c(2) = 0,5$, $g_c(3) = 0,3$, $g_r(1) = 0,9$ en $g_r(2) = 0,1$. Bij de systemen met produktie op voorraad werd een voorraadnorm gebruik van 140 stuks.

7.2 Het produktiesysteem buiten beschouwing gelaten

In het vorige hoofdstuk werden vier produktiesystemen beschreven. De vorm van de produktiebeslissing heeft alleen betekenis voor de produktie en de voorraadhoogte, maar niet voor de andere stromen in de keten. De vraag wordt immers altijd beantwoord. Na het station consumptie speelt het produktiesysteem geen rol meer; invloed wordt nog uitgeoefend door de input $\alpha(k)$ en door de twee transferfuncties binnen de stations consumptie en recycling. Het verloop van deze stromen 'achter' het station consumptie in de tijd is in beeld gebracht door eenmalig in periode 1 een vraag van 100 stuks te genereren. Hierbij was $\alpha(k)$ constant, en bedroeg 60%.

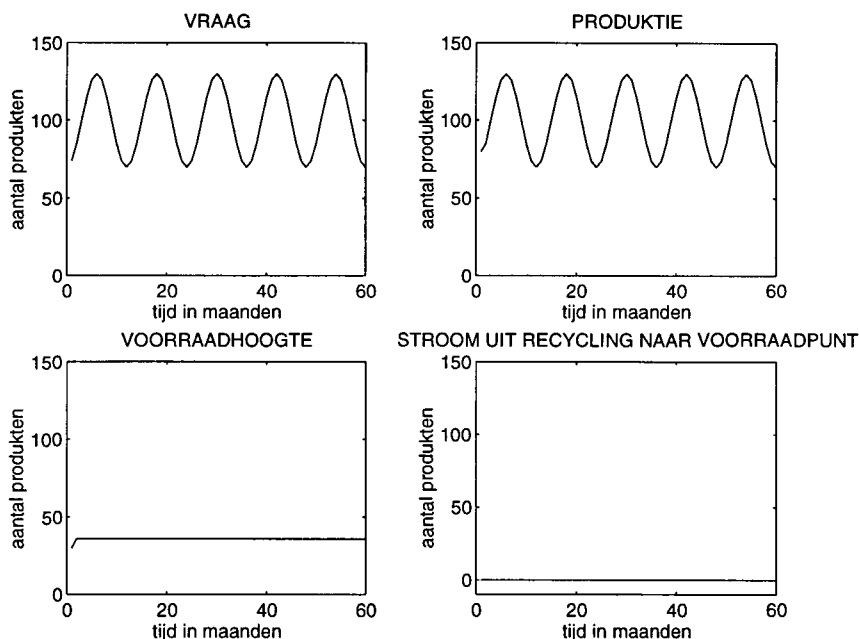


Figuur 22: Het verloop van de stromen uit de consumptie en uit de recycling terug naar het voorraadpunt als gevolg van een eenmalige vraag in periode 1. Bij de figuren geldt dat $\alpha = 60\%$.

In Figuur 22 is te zien dat de 100 produkten vertraagd en verstrooid uit het station consumptie komen. Het station recycling heeft opnieuw een verstrooiende werking.

7.3 Een situatie zonder hergebruik

Er zijn veel produkten waarbij er nog geen hergebruik plaats vindt. In het model betekent dit dat $\alpha(k)$ overall gelijk is aan nul. Hieronder zijn enkele toestandselementen voor een produktiesysteem met productie op order en verwaarloosbare doorlooptijd afgebeeld.



Figuur 23: Weergave van de vraag, de produktie, de voorraadhoogte en de stroom uit de recycling naar het voorraadpunt. Het produktiesysteem produceert op order en heeft een verwaarloosbare doorlooptijd (JIT). Op alle x-assen staat de tijd in maanden aangegeven; op de y-assen het aantal produkten per periode. Omdat α nul is, is er geen sprake van hergebruik.

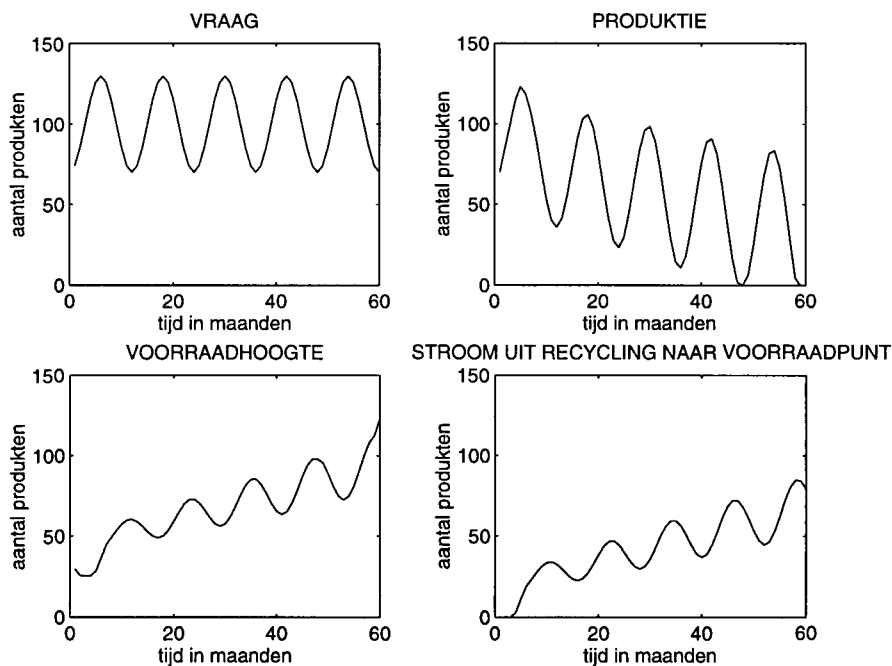
Zoals duidelijk is te zien is voor de vraag een seizoenspatroon opgesteld. De periode van de schommeling is een jaar en de vraag is voor vijf jaar achtereenvolgens in beeld gebracht. De gevolgen voor de produktie en de voorraad zijn duidelijk. De voorraad blijft volledig onder controle en de produktie is in iedere periode gelijk aan de vraag. Dit komt overeen met het ideaalbeeld van een JIT-systeem. De voorraadhoogte kan nog verder omlaag gedrukt worden en dan verder gecontroleerd worden.

In Appendix E bevinden zich simulaties met de andere drie produktiesystemen onder dezelfde omstandigheden. Bij een doorlooptijd van een periode doet zich hetzelfde beeld voor van een gecontroleerde voorraad en een op de voet volgende produktie als hierboven. Bij een systeem met produktie op voorraad wordt de beslissing tot produktie genomen op grond van de voorraadhoogte. Een grotere vraag doet het voorraaddniveau verder zakken, en veroorzaakt de periode daarop een grotere produktie. Het model met een verwaarloosbare doorlooptijd gedraagt zich volgens verwachting. Het model met een doorlooptijd van een periode gedraagt zich echter heel anders: de produktie en de voorraad schommelen zeer sterk en ongewild op en neer met een periode van een half jaar. Dit systeem voldoet niet als een zinnig produktiesysteem en zal in het vervolg buiten beschouwing worden gelaten.

7.4 Een situatie waarbij het hergebruik langzaam toeneemt

Uit de regeling Verpakking en Verpakkingsafval van het ministerie van VROM kwam naar voren dat de overheid probeert om de keten te stimuleren iedere keer iets beter te presteren. De lat van de benodigde hoeveelheid hergebruik, herverwerking en energieretrieving wordt door de jaren heen steeds iets hoger gelegd. Voor drie productiesystemen is een dergelijke situatie gesimuleerd; het vierde systeem, dat van productie op voorraad met een doorlooptijd van een periode, wordt niet langer in de analyses meegenomen.

In de volgende simulaties stijgt in vijf jaar tijd het recyclingspercentage α met 10% per jaar van 20% tot aan het eind 70%. Deze stijging is fors en niet erg realistisch, maar het is de bedoeling om trends zichtbaar te maken. Een aardig facet komt aan het licht in de simulatie met het systeem van productie op order en een doorlooptijd van een periode. Hierbij is op tijdstip k weliswaar de vraag van periode $k+1$ bekend, maar nog niet de grootte van de stroom producten uit het station recycling in diezelfde periode. Daarom wordt die stroom benaderd door de al wel bekende stroom in periode k . De productie is zo groot als het verschil tussen de vraag in periode $k+1$ en de stroom te hergebruiken artikelen in periode k . De onzekerheid in de stroom te hergebruiken goederen heeft natuurlijk een effect op de voorraad. In de situatie zonder hergebruik bleef de voorraadhoogte constant, hier zal met het stijgen van de stroom producten uit de recycling de onzekerheid toenemen. Deze onzekerheid zal leiden tot een hoger voorraadniveau, dat de onzekerheid opvangt. Deze logische gevolgtrekkingen komt ook tot uiting in de simulatie.



Figuur 24: Voor een periode van vijf jaar is het gedrag van de productie, de voorraadhoogte en de stroom producten uit de recycling weergegeven in een situatie waarin het recyclingspercentage $\alpha(k)$ lineair stijgt van 20% aan het begin tot 70% aan het eind van de vijf jaar. Op de horizontale assen is de tijd in maanden weergegeven, op de verticale het aantal producten.

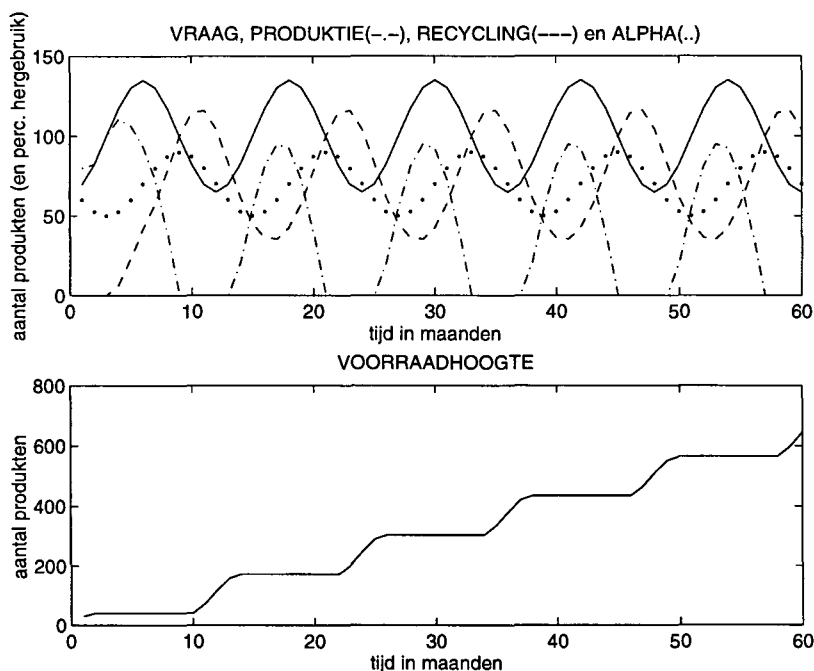
In de simulatie met de andere twee productiesystemen gaat net als in Figuur 24 het produktieniveau langzaam naar beneden. Dat betekent dat er binnen het bedrijf een verschuiving van kapitaal en arbeid plaats zal vinden van het productiesysteem naar het station recycling, waar de producten geprepareerd worden voor hergebruik.

Het JIT-systeem houdt in tegenstelling tot het hierboven beschreven systeem een constant voorraadniveau. Dit kan logisch verklaard worden met te wijzen op het feit dat bij JIT geen sprake is van onzekerheid over de stroom uit de recycling naar het voorraadpunt. Het systeem met productie op voorraad en een verwaarloosbare doorlooptijd geeft ongeveer hetzelfde beeld als bij een situatie zonder recycling, alleen hoeft er nu steeds minder geproduceerd te worden. De voorraad schommelt weliswaar, maar dat is een gevolg van de fluctuaties in de vraag. Toch neemt de gemiddelde voorraad niet toe in de tijd, omdat wederom dankzij de korte doorlooptijd de stroom producten uit de recycling naar het voorraadpunt al bekend is.

7.5 Grenzen van voorraadcontrole voor het JIT-systeem

In het vorige hoofdstuk werd het JIT-systeem gepresenteerd als een systeem waarbij de orders en de stroom goederen uit de recycling samen de productiehoeveelheid vastleggen. Toch zal bij het toenemen van de hoeveelheid goederen die worden hergebruikt ook moeten worden gekeken naar de voorraad; anders loopt de voorraad vol. De productiebeslissing zal dus moeten worden gekoppeld aan een voorraadsysteem.

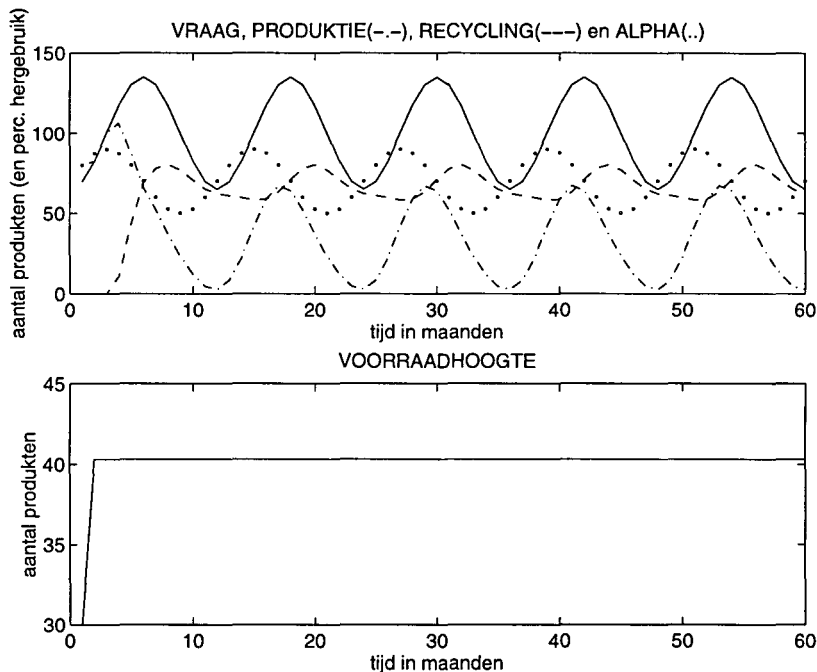
Dit kan aanschouwelijk worden gemaakt met de resultaten van een simulatie waarbij $\alpha(k)$ gemiddeld 70% is. Omdat $\alpha(k)$ een manipuleerbare input is van de producent, bestaat er de vrijheid om ook $\alpha(k)$ een sinusvormig patroon te geven. In de onderstaande figuur heeft $\alpha(k)$ een periodetijd van een jaar, en is het faseverschil met de vraag juist gelijk aan $\frac{1}{2}\pi$, ofwel: de maxima van de vraag en het hergebruikspercentage liggen drie perioden uit elkaar. De vraag loopt in de tijd op het hergebruikspercentage vooruit. De evenwichtslijn voor $\alpha(k)$ ligt op 70%, met een amplitude van 20%.



Figuur 25: In de bovenstaande twee grafieken zijn alleereerst de beide inputs afgebeeld. In de bovenste grafiek representeert de doorgetrokken lijn de vraag en de stippellijn het hergebruikspercentage. De hoeveelheid recycling (- - -) en de hoeveelheid productie (- . -) zijn ook weergegeven.

Het is in Figuur 25 duidelijk te zien dat in de perioden dat de stroom uit de recycling groter is dan de vraag de productie nul is. Bovendien loopt in die periode de voorraad vol. Omdat er niet wordt gekeken naar de voorraadhoogte, treedt, nadat de stroom uit de recycling weer is afgenomen tot onder het vraagniveau, de oude productiebeslissing weer in en wordt de voorraad niet gereduceerd.

Een interessante vraag is wat de invloed van het faseverschil tussen $d(k)$ en $\alpha(k)$ is. Kan er een hergebruikpercentage van rond de 70% worden gerealiseerd zonder dat de voorraad volloopt? In de voorgaande simulatie (zie Figuur 25) is $\alpha(k)$ ongeveer maximaal als de stroom uit het station consumptie maximaal is. Figuur 22 toonde immers al dat een vraagpiek pas 2 tot 3 perioden later uit het station consumptie komt. Wat gebeurt er als het faseverschil nu $-\frac{1}{2}\pi$ is? Dan is het hergebruikpercentage minimaal als de uitstroom uit het station consumptie maximaal is. Ditmaal loopt dus het hergebruikpercentage in de tijd een fase van $\frac{1}{2}\pi$ op de vraag vooruit. Deze situatie is in de onderstaande figuur afgebeeld.



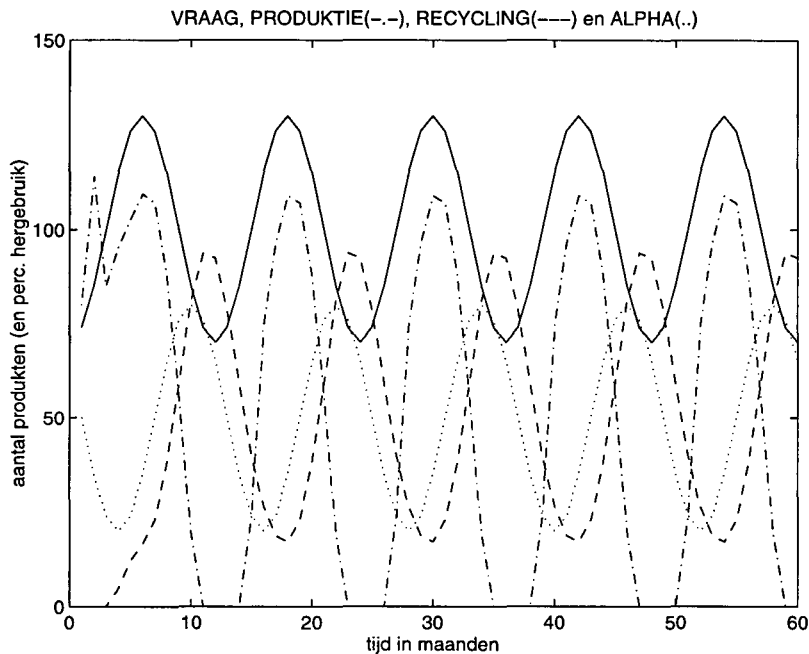
Figuur 26: Dezelfde situatie als in Figuur 25, alleen is ditmaal het faseverschil tussen de vraag en het hergebruikpercentage gelijk aan $-\frac{1}{2}\pi$. Opmerkelijk detail is dat de voorraad constant blijft als gevolg van het feit dat de stroom uit de recycling tamelijk gelijkmatig is.

Wat in Figuur 26 direct opvalt is het constante voorraadniveau. Er is geen sprake van een tijdstip waarop de stroom uit de recycling de vraag in grootte overtreft. Ook de productie schommelt minder heftig op en neer, maar volgt in verhoudig met Figuur 25 tamelijk gelijkmatig het vraagpatroon.

Hoewel in beide gesimuleerde situaties het percentage hergebruik in de tijd gemiddeld 70% was, is er wel verschil in het percentage hergebruik in massaprocenten tussen de twee simulaties. De simulatie uit Figuur 25 realiseerde een gemiddeld massapercentage van ongeveer 71%, terwijl datzelfde percentage in de situatie van Figuur 26 65% bedroeg. Toch werd er in deze laatste situatie minder geproduceerd; dit is een gevolg van het verschijnsel dat in Figuur 25 weliswaar de recycling hoger is, doch een deel daarvan wordt niet (opnieuw) geconsumeerd, maar blijft in de voorraad liggen.

7.6 Minder schommelingen in de productie

In de vorige paragraaf is aangegeven dat door variatie van het recyclingpercentage in de tijd het patroon van de stroom goederen uit de recycling naar het voorraadpunt beïnvloed kan worden. In de logistiek komt het vaak voor dat men streeft naar een over de tijd evenwichtige verdeling van de productiecapaciteit. Met name bij het produktiesysteem met productie op voorraad doen zich echter vaak schommelingen voor in de produktiehoeveelheden per periode. Een zeer illustratief voorbeeld kan worden gegeven voor het produktiesysteem met productie op voorraad en een verwaarloosbare doorlooptijd.

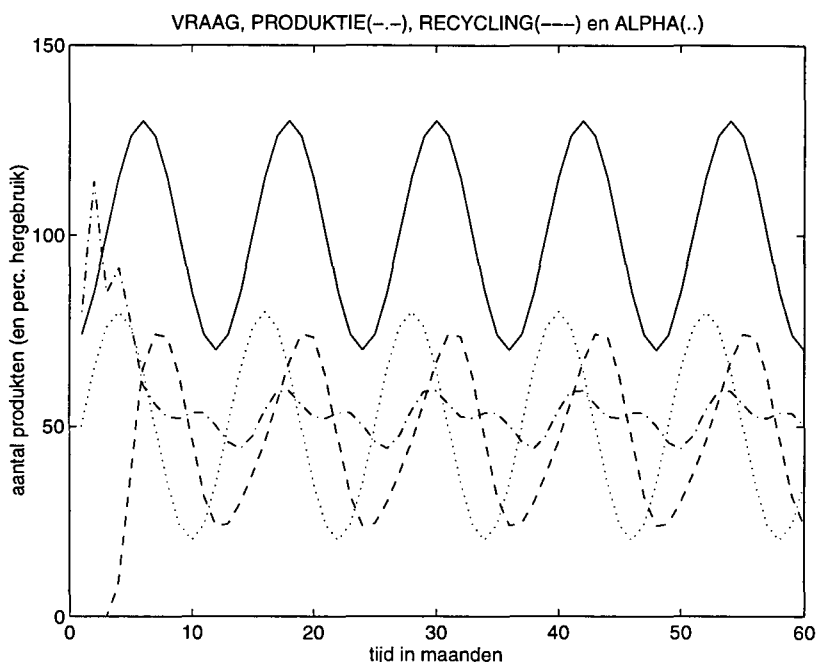


Figuur 27: De grote verschillen in de produktiehoeveelheden per periode (- . -) in de bovenstaande figuur doen zich voor bij een vraag $d(k)$ van gemiddeld 100 stuks met een amplitude van 30 stuks en bij een recyclingspercentage $\alpha(k)$ van 50% met een amplitude van 30%. Hierbij loopt $\alpha(k)$ een faseverschil van $(2/3)\pi$ op $d(k)$ achter. De hoeveelheid recycling (- -) is ook weergegeven.

In de bovenstaande grafiek loopt het recyclingpercentage $\alpha(k)$ een fase van $(2/3)\pi$ op de vraag $d(k)$ achter. De evenwichtsstand van $\alpha(k)$ is 50%, en de amplitude 30%. De vraag heeft een evenwichtsstand van 100 produkten met een amplitude van 30. Dit heeft tot resultaat dat de stroom produkten uit de recycling naar het voorraadpunt maximaal is als de vraag minimaal is. Bij het JIT-systeem liep de voorraad vol op de momenten dat de stroom uit de recycling groter was dan de vraag, maar hier wordt gewerkt met een voorraadnorm en wordt niet geproduceerd totdat de voorraadhoogte $I(k)$ weer onder de voorraadnorm N zakt. De productie bereikt een maximum als ook de vraag maximaal is; de stroom produkten uit de recycling is dan juist minimaal.

Wanneer het faseverschil π radialen verandert, ontstaat een situatie waarin de stroom uit de recycling naar het voorraadpunt maximaal is als de vraag maximaal is, en minimaal is als de vraag minimaal is. Dit leidt vanzelfsprekend naar een gelijkmatiger patroon voor de produktiehoeveelheid per periode. De onderstaande grafiek toont dat deze hypothese correct is. De produktiehoeveelheid blijft tussen de 40 en 60 stuks per periode. Hiermee levert de variatie van $\alpha(k)$ een veel aangenamer produktiepatroon op. Dit is belangrijk in een bedrijfsituatie waarin sprake is van grote kosten voor vaste produktiemid-

delen, die niet aanwendbaar zijn voor een ander productieproces. Een gelijkmatige bezetting van deze vaste capaciteit betekent dat de bezettingsgraad goed is, en dat er dus efficiënt geproduceerd wordt.



Figuur 28: In deze situatie loopt $\alpha(k)$ een fase van $(1/3)\pi$ op $d(k)$ vooruit. Als gevolg daarvan zijn de stroom uit de recycling en de vraag bijna congruent. Het resultaat is (na een aanloopperiode) een zeer gelijkmatig verloop van de produktiehoeveelheden.

Beide simulaties begonnen in gelijke begintoestand, maar natuurlijk zorgt het faseverschil tussen $\alpha(k)$ en $d(k)$ voor heel andere resultaten, zoals de twee figuren in deze paragraaf aantonen. Het faseverschil zorgt daarbij ook voor een ander gemiddeld recyclingpercentage uitgedrukt in massaprocenten, voor een andere gemiddelde produktiehoeveelheid en voor een andere gemiddelde voorraadhoogte. In de onderstaande tabel zijn deze verschillen zichtbaar gemaakt.

Tabel 7-1: Enkele metingen behorend bij de twee simulaties.

<i>faseverschil</i>	<i>gemiddeld recyclingpercentage (massa%)</i>	<i>gemiddelde produktie per periode (produkten)</i>	<i>verschil tussen maximale en minimale produktie (produkten)</i>	<i>gemiddelde voorraadhoogte (produkten)</i>
$(2/3)\pi$	0,50	52,4	109	44,8
$-(1/3)\pi$	0,46	55,6	15,1	38,5

7.7 Terugblik

In dit hoofdstuk zijn enkele simulaties uitgevoerd. In de eerste paragrafen hadden de simulaties voornamelijk als doel om het model geloofwaardig te maken. De resultaten van de simulaties waren voorspelbaar. Alleen de simulatie van het produktiesysteem met produktie op voorraad en een doorlooptijd van een periode vertoonde een ongewenst en onrealistisch gedrag.

In de latere paragrafen daarentegen hadden de simulaties als doel om enkele verschijnselen aan het licht te brengen die niet direct te verwachten waren. Dit is gedaan door het recyclingpercentage $\alpha(k)$

in de tijd te variëren als een sinusoid. Weliswaar zijn de verschijnselen die zich hierbij voordoen goed verklaarbaar, maar toch zijn ze opmerkelijk. Ze tonen aan dat in de logistiek voortaan rekening gehouden moet worden met een tweede onzekerheid naast de vraag, namelijk de stroom goederen die terugkomt.

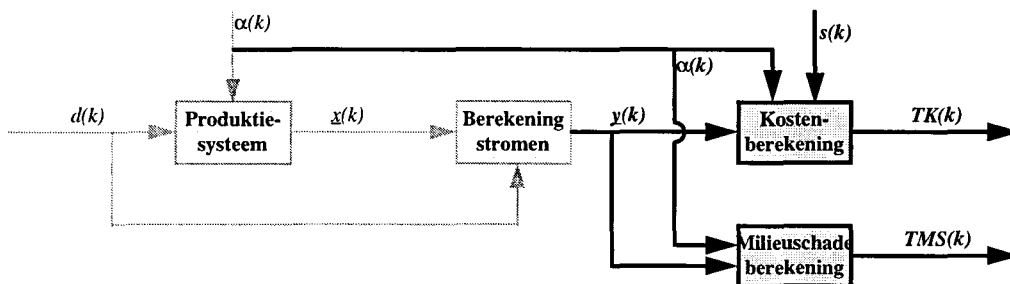
Bovendien is duidelijk geworden dat in een situatie waarin hergebruik van grote aantallen produkten plaats vindt een voorraadsysteem onontbeerlijk is. Het alleen in beschouwing nemen van de orders kan leiden tot een langzaam vol lopende voorraad. Bedrijven in een dergelijke situatie zullen een soort voorrangsregels moeten ontwikkelen met betrekking tot produceren op order en produceren of leveren uit voorraad.

Indien het recyclingpercentage inderdaad door de producent kan worden gemanipuleerd in de tijd, dan kan door het kiezen van een bepaald patroon de stroom goederen uit de recycling zodanig worden beïnvloed, dat de produktie gelijkmatig over de tijd wordt verdeeld. Dit is aantrekkelijk als de produktiecapaciteit duur is en voor lange tijd vastgelegd dient te worden.

8. De criteria

8.1 Inleiding

In hoofdstuk 5 werd de elementaire keten opgesteld en werden op grond van analyses van de actoren binnen de keten en belanghebbenden buiten de keten enkele hypothesen opgesteld, die leidden tot het vastleggen van de manipuleerbare en de niet-manipuleerbare inputs van het systeem 'elementaire keten'. Met de uitkomsten van dit proces en op grond van enkele praktische overwegingen is in hoofdstuk 6 een keuze gemaakt voor het hergebruikspercentage als manipuleerbare input van de producent en het storttarief als manipuleerbare input van de overheid. Vervolgens zijn voor vier produktiesystemen modellen opgesteld, die het verband tussen de inputs en de stromen in de keten weergeven. Bij de simulaties bleek dat één van deze vier produktiesystemen op de rand van stabiliteit verkeerde en daarom zeer onrealistisch gedrag vertoonde. Voor de overige drie produktiesystemen is duidelijk in beeld gebracht hoe, gegeven een beginsituatie en een traject voor de vraag $d(k)$ en het percentage hergebruik $\alpha(k)$, de stromenvector kan worden berekend.



Figuur 29: Blokdiagram van de elementaire keten. Het voorste deel is in hoofdstuk 6 behandeld. Dit hoofdstuk concentreert zich op het achterste deel met de criteria totale kosten $TK(k)$ en totale milieuschade $TMS(k)$. Inputs zijn de stromenvector $y(k)$, het percentage hergebruik $\alpha(k)$ en het storttarief $s(k)$.

In de opdrachtformulering in hoofdstuk 1 werd als doelstelling van het project genoemd het opstellen van een ketenmodel vanuit het formalisme van de produkt-proces-keten, met daarbij aandacht voor de economische belangen van de keten en de ecologische belangen van de omgeving van de keten. In hoofdstuk 5 zijn aan deze twee algemene criteria twee meetbare indicatoren gekoppeld, namelijk de totale ketenkosten (het criterium van de producent) en de totale milieuschade (het criterium van de overheid). Tot nu toe is in het verslag echter veel aandacht besteed aan de stromen binnen de keten, hoewel die stromen in de doelstelling niet worden vermeld. Toch is deze aandacht voor de stromen gerechtvaardigd, omdat zoals te zien is in het blokdiagram van Figuur 29 de indicatoren van de criteria berekend worden uit de stromen in de keten. De berekening van de kosten en de milieuschade kan welbeschouwd ook rechtstreeks met de gegevens van de toestand en de inputs worden uitgevoerd. Dit maakt de expliciete berekening van de stromen wiskundig gezien overbodig, maar de berekening van de stromen levert een duidelijk beeld van wat zich afspeelt binnen de keten en om die reden is er voor gekozen deze tussenstap toch mee te blijven nemen.

De genoemde berekeningen van de indicatoren voor de criteria zijn nog niet aan de orde geweest. Ieder tijdstip k genereert in Figuur 29 een indicator voor de totale kosten $TK(k)$ en een indicator van de

totale milieuschade $TMS(k)$. Eerder is al opgemerkt dat deze twee grootheden respectievelijk voor de producent en de overheid kengetallen vormen, waarop zij de prestatie van de keten beoordelen. In paragraaf 3 komt het criterium van de producent aan bod, namelijk de totale ketenkosten. Daarna komt in paragraaf 4 het andere criterium aan bod: de totale milieuschade. Dit is het criterium dat gehanteerd wordt door de overheid.

8.2 Het criterium van de producent

De producent is binnen de elementaire keten aangewezen als de ketenregisseur, in termen van de Regeling Verpakking en Verpakkingsafval (zie paragraaf 4.2) van het ministerie van VROM ook wel de normadressaat genoemd. Over de keten is opgemerkt dat de prestatie van de keten als geheel niet wordt gekend door onderlinge transferprijzen, maar door prijzen naar buiten toe; de prestatie van de keten wordt tot uitdrukking gebracht door de kosten die de keten maakt om te kunnen functioneren. In hoofdstuk 5 werd in economische termen weergegeven welke kostensoorten kunnen worden onderscheiden in de keten. Deze kostensoorten kunnen bijna allemaal gezien worden als variabele kosten; daarvoor moest echter wel de bekende en ook in de praktijk veel gebruikte kunstgreep van de kostendrijver worden ingevoerd. De kostendrijver van bijvoorbeeld de productie is de kostprijs. In die kostprijs worden immers de vaste kosten in de fabricage uitgedrukt als een soort variabele kosten. Het feit dat iedere kostenpost dankzij invoering van een kostendrijver variabel kan worden 'gemaakt', biedt de gelegenheid om elke kostenpost te berekenen uit het produkt van de bijbehorende kostendrijver en de bijbehorende stroom of stromen. Dit is een belangrijke constatering, want hiermee wordt dus iedere kostenpost gekoppeld aan een of meer stromen. Dit verklaart waarom de berekening van de dynamische stromenvector zo belangrijk is.

Nu deze denkstap gezet is, kan de laatste stap gezet worden in de koppeling van de kostenposten aan de stromen. De uitkomst van deze stap is zichtbaar gemaakt in de onderstaande tabel.

Tabel 8-1: Kostendrijversmatrix: de relaties tussen de kosten en hun kostendrijvers worden aangegeven door het symbool •.

	$f_1(k)$	$I(k)$	$d(k)$	$f_2(k)$	$f_3(k)$	$f_4(k)$	$f_5(k)$
grondstofkosten	•						
produktiekosten	•						
voorraadkosten		•					
transactiekosten			•				
gebruikskosten			•				
transportkosten	•		•	•	•	•	•
selectiekosten				•			
lozingskosten					•		
recyclingkosten						•	
belastingen/subsidies ¹					• (= s)		

¹ Het betreft hier alleen de belastingen/subsidies die het verband aangeven met de stromen. In het model is dat alleen het storttarief. Zaken zoals vennootschapsbelasting, inkomstenbelasting, werkgeverslasten enz. zijn buiten beschouwing gelaten.

In Tabel 8-1 zijn de elementen van de stromenvector $\underline{y}(k)$ in de eerste rij opgeschreven, waarbij zoals tot nog toe steeds ook de voorraadhoogte $I(k)$ is meegenomen. De tabel heeft al duidelijk de vorm van een matrix. De matrixelementen zijn de kostendrijvers die de grootten van de kostenposten berekenbaar maken uit de stromen van de stromenvector $\underline{y}(k)$. Deze kostendrijvers dienen bepaald te worden in de praktijk van de keten door bijvoorbeeld accountants, bedrijfseconomen of bedrijfskundigen. Dit is een probleem op zich, waar verder niet op ingegaan wordt. Er wordt hier volstaan met nog op te merken dat deze berekeningen in de praktijk veel voorkomen.

Eén matricelement neemt overigens een bijzondere positie in, en dat is het storttarief s . Dit tarief is gekoppeld aan de stroom $f_3(k)$ naar de afvallozing, en het is de input van de overheid.

In Figuur 29 zijn voor de berekening van $TK(k)$ drie inputs gegeven: het storttarief s , de stromenvector $\underline{y}(k)$ en het recyclingspercentage $\alpha(k)$. Deze laatste input is nog niet aan bod geweest. De werking van $\alpha(k)$ komt natuurlijk al tot uiting in de grootte van de stromen in $\underline{y}(k)$ en heeft dus al indirect invloed op de kostenberekening. Daarbij is echter niet meegenomen de inspanning die het kost om $\alpha(k)$ op een bepaald niveau te brengen. Het kost moeite om een fractie $\alpha(k)$ te hergebruiken. Deze inspanning kan uiteraard vertaald worden in kosten. Hiervoor is een algemene functie f_k opgesteld. De totale kosten zijn dus zowel een functie van de stromen als van het recyclingspercentage zelf. Het deel dat samenhangt met de stromen is lineair volgens Tabel 8-1, en hierbij komt het grote voordeel dat de kostenposten dezelfde dimensie hebben (guldens) en daarom zo bij elkaar kunnen worden opgeteld. Daarvoor is een rij met dezelfde lengte als het aantal kostenposten nodig, met alle elementen gelijk aan 1. Het deel dat samenhangt met $\alpha(k)$ en eventueel $\underline{y}(k)$ heeft een onbekende vorm. In formulevorm ziet dat er als volgt uit:

$$TK(k) = I_r \cdot KD \cdot \underline{y}(k) + f_k(\alpha(k), \underline{y}(k)) \quad \text{verg. 8.1}$$

Hierin is I_r (het subscript heeft enkel als doel aan te geven dat het een rij betreft) gegeven als (1 1 1 1 1 1 1 1), is de matrix KD de kostendrijversmatrix (dimensie [aantal kostenposten]x[aantal stromen]) en is f_k een functie van onbekende vorm.

Natuurlijk is het de ketenregisseur niet te doen om een optimalisatie die de momentane ketenkosten minimaliseert, maar om een keuze van opeenvolgende $\alpha(k)$'s die de som van de kosten over een langere tijd minimaliseert. Het criterium van de producent of de ketenregisseur is dus:

$$J_1(\underline{y}(k), \alpha(k), s) = \sum_{k=1}^K TK(k) \quad \text{verg. 8.2}$$

Het criterium wordt berekend met de resultaten van K perioden.

8.3 Het criterium van de overheid

Het criterium van de overheid is minder eenvoudig op te stellen dan dat van de keten. De keten had enkel belang bij kostenminimalisatie, maar bij de overheid dient er een afweging te worden gemaakt tussen economische en ecologische belangen. Dit politieke proces wordt buiten beschouwing gelaten.

Om een uiterste te nemen in het spectrum van mogelijke uitkomsten van dit politieke proces werd in Hoofdstuk 5 gesteld dat de overheid alleen de milieuschade probeert te minimaliseren. Dat is weliswaar niet realistisch, maar het geeft nog wel uitdrukking aan het feit dat de overheid en de ketendeelnemers niet dezelfde belangen hebben bij het functioneren van de keten; dit komt nu ook tot uitdrukking in verschillende criteria.

In hoofdstuk 5 werd vermeld dat er net als bij de kostensoorten een aantal 'standaard' milieu-effecten bestaan. Het is niet mogelijk om te komen tot een algemene toekenning van de milieu-effecten aan de stromen zoals gebeurde in Tabel 8-1, omdat de meeste milieu-effecten in tegenstelling tot de kostensoorten veel sterker samenhangen met het produkt en het produktieproces. Pas als het produkt bekend is, kan er een matrix worden opgesteld die de milieu-'kostendrijvers' (in het vervolg: milieu-

coëfficiënten) bevat. Het is daarom voor een gegeven produkt mogelijk om te komen tot een matrix MD (analoog aan KD bij de kosten) waarin de milieu-effecten door milieucoëfficiënten verbonden worden aan de stromen in de keten. Daarna ontstaat er echter een probleem, want om de verschillende waarden van milieu-effecten te kunnen vergelijken dient aan ieder milieu-effect een soort weegfactor te hangen dat het belang van dat specifieke milieu-effect uitdrukt. Deze rij weegfactoren (met de dimensie van het aantal milieu-effecten) wordt weergegeven met W_r . Op die manier kan van de milieu-effectvector een scalar worden gemaakt die uitdrukking geeft aan de totale milieuschade. Deze W_r zal een grote mate van subjectiviteit met zich meebrengen. Bij de berekening van de totale milieuschade dient tot slot wederom ook het effect van $\alpha(k)$ in de optelsom te worden meegenomen. Net als bij de kosten is dit effect niet bekend, maar meer inzameling en selectie brengen meer inspanning met zich mee, en dus ook ongetwijfeld emissies. Dit verband wordt weergegeven met de onbekende functie f_m . Hiermee komt de vergelijking voor de totale milieuschade $TMS(k)$ uit op een vorm die lijkt op de vorm van de totale kosten $TK(k)$:

$$TMS(k) = W_r \cdot MD \cdot \underline{y}(k) + f_m(\alpha(k)) \quad \text{verg. 8.25}$$

Ook de overheid is net als de ketenregisseur gericht op minimalisatie van de totale milieuschade over een langere duur. De vorm van het criterium van de overheid wordt dus:

$$J_2(\underline{y}(k), \alpha(k)) = \sum_{k=1}^K TMS(k) \quad \text{verg. 8.26}$$

Bij het criterium van de overheid doet zich iets opmerkelijks voor: de input van de overheid komt er niet in voor! In de praktijk betekent dat: het storttarief heeft geen direct milieu-effect. Dat klinkt aannemelijk, maar daarmee ontstaat op het eerste oog wel een wiskundig probleem; als de overheid immers J_2 wil minimaliseren door een geschikte keuze van s , dan kan er geen optimalisatie plaats vinden door het nemen van de afgeleide, omdat het criterium J_2 niet afhangt van s . Zo was het ook al afgebeeld in Figuur 29. Hoe er toch een optimalisatie plaats zou kunnen vinden, wordt uitgelegd in appendix F.

In het volgende hoofdstuk wordt een simulatie uitgevoerd voor Carta, de dozenfabrikant waarmee kennis werd gemaakt in hoofdstuk 4.

8.4 Terugblik

In dit hoofdstuk werden voor de twee criteria uit de doelstelling van het project indicatoren ontwikkeld. De indicator totale ketenkosten geeft uitdrukking aan het criterium van de producent of de ketendeelnemers, de indicator totale milieuschade aan het criterium van de overheid. Beide indicatoren zijn berekenbaar uit de stromenvector, die de output was van de modellen in hoofdstuk 6. Hierbij schuilt er een subjectief element in de berekening van de totale milieuschade. De producent en de overheid proberen met hun inputs, respectievelijk het percentage hergebruik en het storttarief over een langere duur hun criterium te minimaliseren.

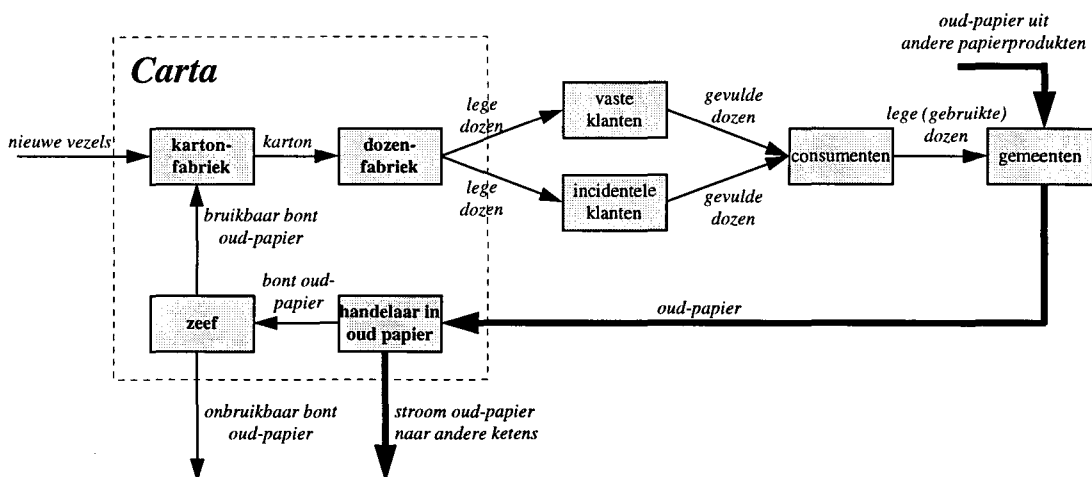
9. Simulatie voor Carta

9.1 Inleiding

Met het dynamische model uit hoofdstuk 6 en de criteria uit het vorige hoofdstuk is het mogelijk om het dynamische gedrag van een keten te berekenen op grond van de begintoestand en de inputs. Dit gedrag kan vervolgens gekoppeld worden aan de outputs: de Totale Ketenkosten en de Totale Milieuschade. Om inzicht te verschaffen in de werkingen van het model is opnieuw de keten van Carta bekeken. Deze keten wijkt hier en daar af van de elementaire keten, en daarom was het nodig een enigzins aangepast model voor de keten op te stellen volgens dezelfde methode als werd gedaan voor de elementaire keten. Dit wordt gedaan in paragraaf 2. In paragraaf 3 worden de belangrijkste kosten en milieu-effecten gepresenteerd, en worden kostendrijvers opgesteld die de stromen in de keten koppelen aan de outputs. Bij gebrek aan goede informatie zijn veel kostendrijvers geschat. In paragraaf 4 en 5 worden twee simulaties bekeken.

9.2 Een ketenmodel voor Carta

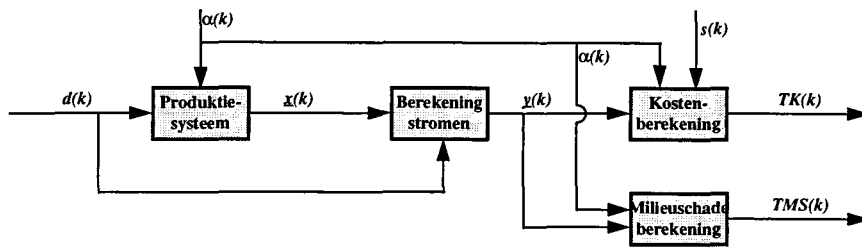
De keten van de kartonnen verpakkingen van Carta wijkt enigszins af van de elementaire keten. In hoofdstuk 4 werd de keten van Carta als volgt weergegeven (paragraaf 4.4.1):



Figuur 30: Stroomschema van de keten van de kartonnen verpakkingen van Carta.

Voor het opstellen van het model wordt voorbijgegaan aan het feit dat het hier een open keten betreft met wisselwerkingen met andere papiersoorten.

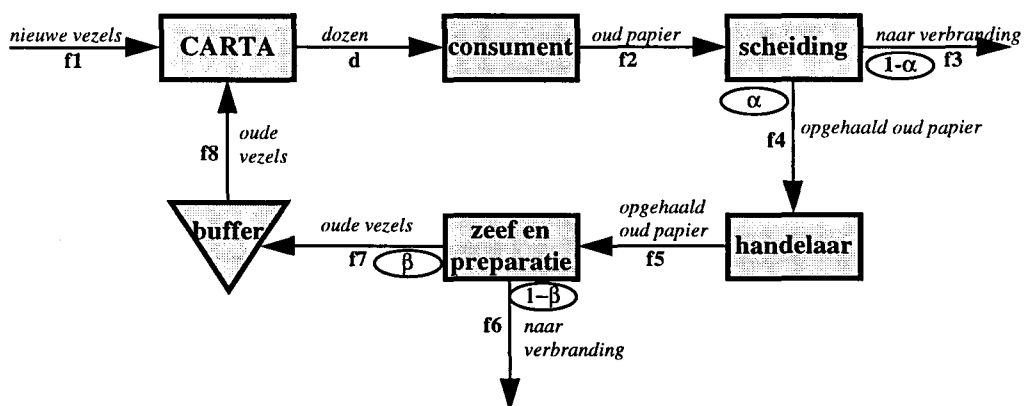
Het doel van deze en de volgende paragraaf is het opstellen van een model, dat de keten uit Figuur 30 beschrijft, volgens dezelfde benadering als bij de elementaire keten in hoofdstuk 6 en hoofdstuk 8. Om te komen tot deze benadering dient de keten van Figuur 30 iets verder te worden geschematiseerd. De benadering zelf kan krachtig worden samengevat door het blokschema van Figuur 31.



Figuur 31: Blokschema van de elementaire keten en ook van de keten van de kartonnen verpakkingen van Carta.

Voor het model wordt eerst de keten van Figuur 30 een beetje vereenvoudigd. Hierbij worden de kartonfabriek en de dozenfabriek samengenomen tot één station in de keten, genaamd Carta. De opsplitsing tussen de vaste en incidentele klanten vervalt; bovendien worden deze klanten en de uiteindelijke consumenten samengevoegd tot één station genaamd consumptie. De eerste scheiding vindt plaats binnen de gemeenten, waar niet àl het oud papier ook daadwerkelijk kan worden opgehaald. Op de plaats van de gemeente komt dus scheiding te staan, met één pijl afval die de keten uitgaat, en één pijl 'oud papier' (recyclingpercentage = $\alpha(k)$) die naar de 'handelaar' in oud papier gaat. De papierindustrie is verplicht om al het oud papier aan te nemen dat terugkomt, dus ze neemt het oud papier van de handelaar over en zeeft het. Binnen dit station vindt tevens preparatie van het oud papier plaats om er opnieuw karton uit te kunnen maken. Hierbij vindt een uitstoot plaats die samenhangt met de gemiddelde leeftijd van de vezels; het percentage dat door de zeef gaat wordt vastgelegd op 20%, en het percentage β waarvan opnieuw karton wordt geproduceerd is dus 80%. Dit is een redelijke schatting, temeer omdat daar ook in meegenomen wordt de hoeveelheid oud papier die bij de preparatie wordt verloren. Het vastleggen van het percentage dat door de zeef gaat voorkomt dat ieder produkt moet worden gelabelled naar leeftijd als het recyclingpercentage $\alpha(k)$ sterk varieert. Omdat het de vraag is of deze stroom vezels uit de recycling direct terecht kan in de productie van Carta, is er een buffervoorraad nodig. Hierbij poneren we dat de producent, gedwongen om het oud papier in te nemen, altijd eerst aan de vraag probeert te voldoen door het oud papier te gebruiken, en pas als er geen oud papier meer voor handen is, overstapt op nieuwe vezels 'wit papier'.

Het geschematiseerde stroomschema krijgt nu deze vorm:



Figuur 32: Vereenvoudigd stroomschema van de keten uit Figuur 30.

De grootste verschillen met de elementaire keten zijn evident de tweede pijl die de keten uitgaat als ketenafval, de plaats van de voorraad of buffer en de aanwezigheid van een handelaar in de teruggekoppelde materiaalstroom.

Voor het station van de consument, oorspronkelijk opgesplitst in de klanten van de Carta, die de dozen vullen met hun produkt, en hun klanten, die deze produkten in de kartonnen verpakking kopen, is net als bij de elementaire keten een transferfunctie opgesteld, ditmaal met $H=12$. De maximale gebruiksduur van een kartonnen verpakking is dus een jaar. De kansfactoren $g_c(j)$ hiervoor zijn:

$$\begin{array}{cccc} g_c(1) = 0,1 & g_c(4) = 0,1 & g_c(7) = 0,075 & g_c(10) = 0,025 \\ g_c(2) = 0,2 & g_c(5) = 0,1 & g_c(8) = 0,05 & g_c(11) = 0,0125 \\ g_c(3) = 0,2 & g_c(6) = 0,075 & g_c(9) = 0,05 & g_c(12) = 0,0125 \end{array}$$

De bijbehorende vergelijkingen luiden nu:

$$f_2(k) = \sum_{h=1}^{12} g_c(h) \cdot d(k-h) \quad \text{verg. 9.1}$$

$$f_3(k) = [1 - \alpha(k-1)] \cdot f_2(k-1) \quad \text{verg. 9.2}$$

$$f_4(k) = \alpha(k-1) \cdot f_2(k-1) \quad \text{verg. 9.3}$$

$$f_5(k) = f_4(k-1) \quad \text{verg. 9.4}$$

$$f_6(k) = [1 - \beta] \cdot f_5(k-1) \quad \text{verg. 9.5}$$

$$f_7(k) = \beta \cdot f_5(k-1) \quad \text{verg. 9.6}$$

$$I(k) = I(k-1) + f_7(k-1) - f_8(k-1) \quad \text{verg. 9.7}$$

$$f_8(k) = \min\{d(k), I(k) + f_7(k)\} \quad \text{verg. 9.8}$$

$$f_1(k) = d(k) - f_7(k) \quad \text{verg. 9.9}$$

Uit de bovenstaande vergelijkingen blijkt dat er gekozen is voor een verwaarloosbare doorlooptijd in het productieproces. In de elementaire keten was voor de recycling een transferfunctie opgesteld, die niet terugkomt in de keten van Carta; de duur van het zeven van de stroom oud papier en vervolgens de preparatie van de vezels voor herverwerking wordt geschat op ongeveer een periode. Dit komt in de elementaire keten overeen met een situatie waarin $J=1$.

9.3 De kosten en de milieu-effecten in de keten

9.3.1 De kosten

Voor het opstellen van de kosten is het nodig om voor de verschillende kostenposten de kostendrijver te bepalen en daarmee de stromen te koppelen aan de kostenposten. Het verkrijgen van deze informatie is een probleem. Binnen de bedrijven bestaan de gegevens wel, maar meestal is het vertrouwelijke informatie waarmee een bedrijf niet naar buiten treedt. Carta heeft in het verleden door een adviesbureau een ketenkostenmodel laten ontwikkelen, maar van dat model kon door ons geen gebruik worden gemaakt. Buitendien was er wel elders literatuur over Carta te vinden, maar daarin ontbraken steeds getallen, natuurlijk om reden van vertrouwelijkheid. Daarom zijn gegevens over de gehele papierindustrie bij elkaar gesprokkeld uit diverse publikaties van het CBS [21] [22] [23]. De gegevens over 1990 waren het meest compleet, en maakten het mogelijk om schattingen te maken van bepaalde kostprijzen.

Tabel 9-1: De kostendrijversmatrix voor Carta. De eenheid van de getallen is steeds miljoen gulden per kiloton karton.

	$f_1(k)$	$d(k)$	$f_2(k)$	$f_3(k)$	$f_4(k)$	$f_5(k)$	$f_6(k)$	$I(k)$	$f_7(k)$	$f_8(k)$
grondstofkosten (nieuwe vezels)	1,5									
produktiekosten		0,15								
inzamelkosten					$f(\alpha)$					
kosten handelaar						0,16 ¹				
kosten preparatie									0,15	
voorraadkosten								$F(\alpha)$		
tarief vuilverbranding				0,9 ²			0,9			

¹ Dit getal wordt deels bepaald door de wereldmarktprijs voor oud papier. Het zijn in strikte zin dus niet de kosten, maar het is de transactieprijs. Betere gegevens waren echter niet voor handen.

² Dit getal is een grove schatting. Het is zo groot gekozen om invulling te geven aan een milieudoelstelling van de overheid.

Bij de totstandkoming van de bovenstaande tabel zijn vier kostenposten verwaarloosd, namelijk de transactiekosten, de gebruikskosten, de lozingskosten en de transportkosten. Een kostenpost die niet voorkwam bij de elementaire keten, was de kostenpost van de handelaar.

In de tabel wordt de kostendrijver voor inzameling gegeven door de functie $f(\alpha)$. In deze functie wordt meegenomen dat wanneer er een hoger percentage van het oud papier wordt teruggehaald van de consumenten, de kosten stijgen. Voor dit verband is deze functie opgesteld:

$$f(\alpha) = \frac{c}{1 - \alpha} \quad \text{verg. 9.10}$$

De constante c dient ervoor te zorgen dat de orde grootte van $f(\alpha)$ overeen komt met de werkelijkheid. In Valkenswaard was in 1995 de prijs voor het ophalen van een ton oud papier f 99,-. Om die reden wordt een waarde voor c ter grootte van 0,1 mln./kton gekozen.

De voorraadkosten zijn in het geheel niet bekend. Deze kosten zijn benaderd door alleen te kijken naar de pijplijnkosten. Dit zijn de kosten die ontstaan als gevolg van de rente op de waarde van de voorraad. De waarde per eenheid in de buffer 'oude vezels' wordt geschat met de kostendrijvers van de stromen f_4 , f_5 en f_7 . Het rentepercentage is 10%. Dit levert het volgende verband:

$$F(\alpha) = 0,10 * [0,31 + f(\alpha)] \quad \text{verg. 9.11}$$

9.3.2 De milieu-effecten

Van de opgenoemde lijst van milieu-effecten in hoofdstuk 5 konden vier effecten worden gekwantificeerd voor de papier- en kartonindustrie [24]. Het betreft het broeikaseffect (eenheid: GWP), smogvorming (eenheid: POCP), verzuring (eenheid: AP) en eutrofiëring (eenheid: NP).

De bijdrage aan het broeikaseffect wordt voornamelijk veroorzaakt door de hoge benodigde energie bij het drogen van de pulp [25]. Dit geldt zowel voor de nieuwe pulp als de pulp die wordt gemaakt van het oud papier. Bij het verbranden van oud papier wordt energie teruggewonnen. Deze energie houdt verband met de verbrandingswaarde van hout. Met deze energie is de behoefte aan energiewinning door het verbranden van fossiele brandstoffen afgenomen. De energieretourwinning uit oud papier levert daarom een bijdrage aan het verlagen van het broeikaseffect. Ook dit dient tot uiting te komen in de coëfficiënten voor dit milieu-effect.

De keten levert ook een positieve en negatieve bijdrage aan de verzuring. Het verbranden van oud papier levert om soortgelijke redenen als bij het broeikas-effect een bijdrage aan het verlagen van de verzuring. Bij het productieproces van nieuwe vezels ontstaan er emissies die de verzuring verhogen. Opvallend is dat bij het herverwerken van het oud papier er een aanmerkelijk kleinere bijdrage aan de verzuring wordt geleverd.

De smogvorming en de eutrofiëring ontstaan hoofdzakelijk in het productieproces van de nieuwe vezels. De aanstichter van de eutrofiëring zijn met name luchtmissie van zwaveldioxide en zwavelwaterstof [26]. De zwaveldioxide levert ook een bijdrage in de smogvorming. De vaste stofdeeltjes die bij de productie ontstaan hebben ook een smogverhogend effect.

De kostendrijvers die bij deze vier effecten horen zijn gegeven in Tabel 9-2.

Tabel 9-2: Vier milieu-effecten die belangrijk zijn binnen de keten van oud papier. De kostendrijvers worden steeds uitgedrukt in de standardeenheid per kton papier/karton. Voor het broeikas-effect is de standardeenheid de GWP, voor smogvorming de POCP, voor verzuring de AP en voor eutrofiëring de NP.

	$f_1(k)$	$d(k)$	$f_2(k)$	$f_3(k)$	$f_4(k)$	$f_5(k)$	$f_6(k)$	$I(k)$	$f_7(k)$	$f_8(k)$
Broeikas-effect (GWP)	496			-1319			-1319		296	
Smogvorming (POCP)	4,1			-0,2			-0,2		0,04	
Verzuring (AP)	8,5			-8,4			-8,4		2,2	
Eutrofiëring (NP)	2,4			-0,1			-0,1		0,4	

Het gebrek aan goede gegevens over de emissie van zware metalen maakt de milieu-index tot een weinig valide indicator. De doelstelling van het hoofdstuk was echter inzicht verschaffen in het model, en het is eenvoudig om het aantal milieu-effecten van de bovenstaande tabel uit te breiden.

De milieu-effecten kunnen niet bij elkaar worden opgeteld vanwege verschillende eenheden en vanwege verschil in de ernst van het effect. Het wegen van de milieu-effecten is een subjectief proces. Hiervoor is gebruik gemaakt van de gegevens uit het softwarepakket SimaPro 3.0. Dit pakket nam eerst in ogenschouw wat de gemiddelde bijdrage per jaar per Europeaan aan bijvoorbeeld het broeikas-effect is, en vervolgens bood het gewichtsfactoren voor de ernst hiervan. De bijdrage aan het broeikas-effect door de papierindustrie werd dus eerst genormeerd door de totale Europese uitstoot, en vervolgens vermenigvuldigd met de subjectieve gewichtsfactor. Deze twee stappen kunnen worden samen genomen, en uitgedrukt in één factor. Voor de vier bovenstaande milieu-effecten zijn die factoren berekend:

Global Warming Potential:	$1,855 \cdot 10^{-4}$	GWP ⁻¹
Photo Oxydation:	$5,30 \cdot 10^{-2}$	POCP ⁻¹
Acidification:	$8,88 \cdot 10^{-2}$	AP ⁻¹
Nutrication:	$1,31 \cdot 10^{-1}$	NP ⁻¹

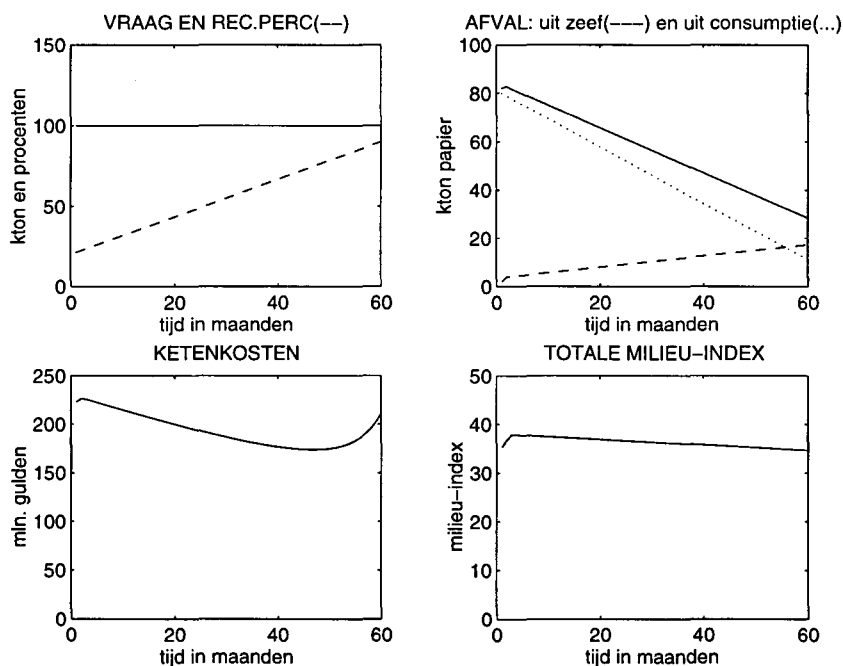
Op ieder tijdstip worden deze factoren vermenigvuldigd met de milieu-effecten die in de keten ontstaan, en de vier uitkomsten worden bij elkaar opgeteld. Dit levert de milieu-index.

9.4 Simulatie met constante vraag en stijgende herverwerking

Met het model uit paragraaf 2 en de kosten en milieu-effecten uit paragraaf 3 is het mogelijk simulaties uit te voeren. Wellicht enigszins ten overvloede zij nog vermeld dat de kosten op schattingen zijn gebaseerd, en dat de milieu-effecten niet compleet zijn, waardoor er nauwelijks van een goede milieu-indicator kan worden gesproken. Toch kan met de bovenstaande gegevens een eerste beeld worden verschaft van de werkingen van het model in een bestaande keten zoals die van Carta.

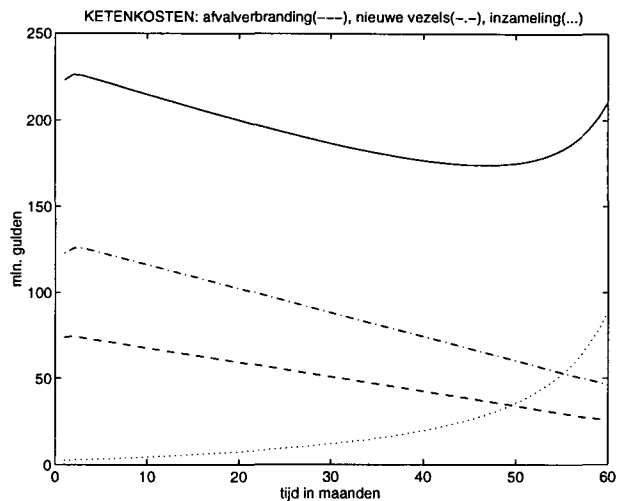
De tijdsduur van beschouwing is 5 jaar. De vraag naar kartonnen verpakkingen wordt uitgedrukt in de massa van het karton en is in deze simulatie constant verondersteld op 100 kton per maand. Deze veronderstelling is gemaakt om de effecten van het herverwerkingspercentage $\alpha(k)$ duidelijker in beeld te brengen. Dit percentage neemt in de tijd toe. Aan het begin is $\alpha(k)$ gelijk aan 20%, aan het einde 90%. De overheid heeft een vast storttarief en kan dit tarief in de tijd van beschouwing niet veranderen.

De totale hoeveelheid afval die de keten uit gaat daalt. De hoeveelheid die niet door de zeef heen komt, stijgt weliswaar een beetje, maar de hoeveelheid die uit de consumptie naar de afvalverbranding gaat, neemt sterker af in de tijd. De ketenkosten vertonen een minimum. Hierop wordt in het vervolg nog teruggekomen. Het meest opmerkelijk is dat hoewel de hoeveelheid afval daalt, en er door herverwerking van oude vezels dus minder en minder nieuwe vezels worden gebruikt, de milieu-index nauwelijks daalt. Het verloop van deze grootheden is in beeld gebracht in de onderstaande figuur.



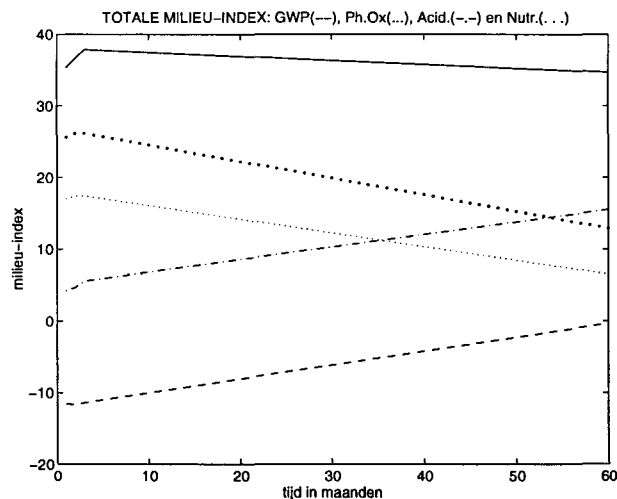
Figuur 33: Weergave van de vraag en het recyclingpercentage, de afvalstromen, de ketenkosten en de totale milieu-index in de situatie met een constante vraag en een stijgend herverwerkingspercentage.

In de bovenstaande figuur is duidelijk te zien dat de hoeveelheid afval die uit de keten verdwijnt sterk daalt door het toenemen van de herverwerking van het oud papier. Aanvankelijk dalen hierdoor ook de kosten sterk, omdat het herverwerken van oude vezels goedkoper is dan het gebruiken van nieuwe, en ook omdat de kosten voor verbranding van afval hoog zijn. Deze daling houdt op bij hoge waarden voor $\alpha(k)$, als het ophalen van het oud papier meer geld gaat kosten dan het verbranden ervan en het inkopen van nieuw papier. Het punt waar dit bij gebeurt is sterk afhankelijk van de gekozen vorm van $f(\alpha)$. In Figuur 34 zijn de belangrijkste drie kostenposten in beeld gebracht.



Figuur 34: De kosten bij een toenemend percentage herverwerking. De uitgaven aan nieuwe vezels en de kosten om het afval te verbranden dalen in de tijd. Daartegenover staan stijgende kosten voor het ophalen van het oud papier. De totale kosten vertonen daarom een minimum.

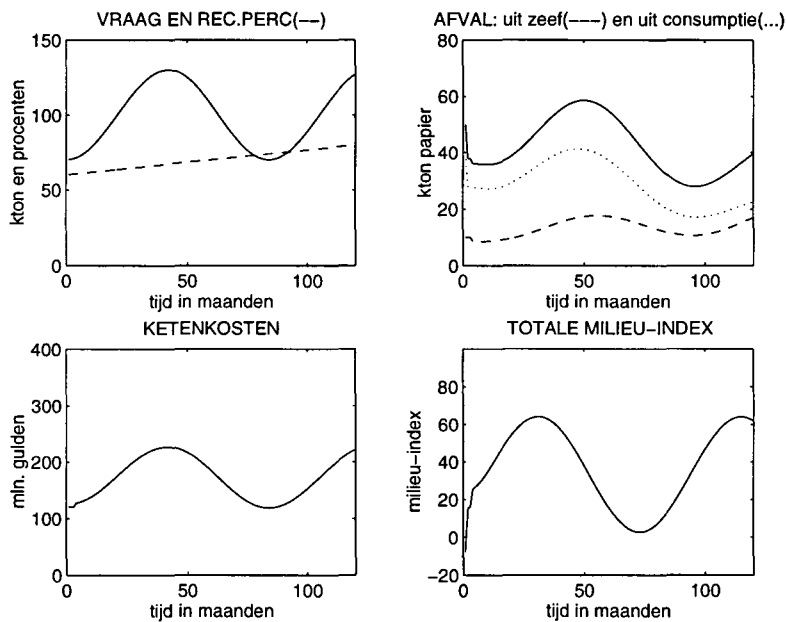
Het is interessant om te onderzoeken waarom de milieu-index slechts zo weinig daalt bij afnemende uitstoot van oud papier uit de keten. Weliswaar dalen in de tijd de eutrofiëring en de smogvorming als gevolg van het afnemen van de stroom nieuwe vezels, maar door het kleiner worden van de stroom afval die naar de verbranding gaat stijgt de bijdrage aan het broeikas effect, omdat de verbranding van oud papier energie leverde die bij toenemende herverwerking meer en meer met fossiele brandstoffen moet worden gewonnen. Ook de verzuring neemt om dezelfde reden toe, ook al spelen hier ook de effecten van het minder bleken van nieuwe vezels en het vaker bleken van oude vezels mee. Het totaalbeeld is te zien in Figuur 35.



Figuur 35: De Milieu-effecten broeikas effect (Engels: GWP), smogvorming (Engels: Photo Oxydation, de lichte stippellijn), verzuring (Engels: Acidification) en eutrofiëring (Engels: Nutrifcation, de donkere stippellijn) vertonen (na vermenigvuldiging met hun weegcoëfficiënten) een compenserend gedrag in de tijd, waardoor de totale milieu-index maar weinig daalt.

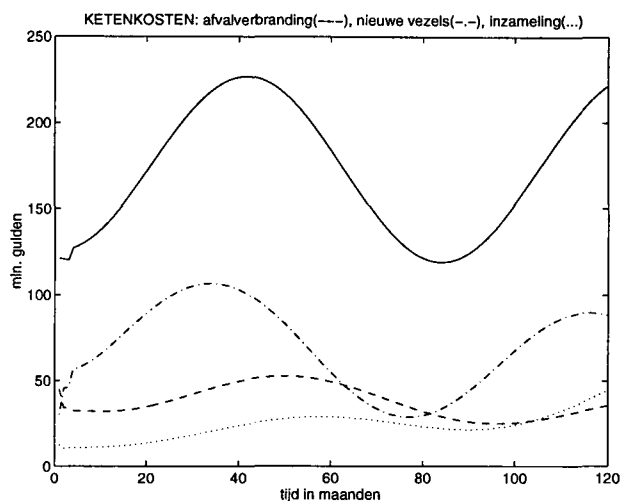
9.5 Simulatie met langzaam stijgende herverwerking en 'conjunctuur'

Nadat in de vorige paragraaf de vraag constant werd gehouden, volgt nu een simulatie met een veranderende vraag. Om een realistische situatie door te rekenen is een simulatie uitgevoerd over een tijdsduur van 10 jaar. Hierbij is aangenomen dat de totale vraag naar verpakkingsmateriaal niet constant is, maar in de loop der tijd langzaam op en neer gaat. De gemiddelde vraag is 100 kton karton, met een amplitude van 30 kton. In deze tijd volgt het percentage herverwerking de doelstelling van het ministerie van VROM die in paragraaf 4.2.2 werd besproken. De beginsituatie van Carta in 1992 was een herverwerkingspercentage van ongeveer 60%. In 2001 is het de doelstelling dat dit percentage 80% is. In de simulatie stijgt $\alpha(k)$ in tien jaar van 60% naar 80%. Overigens moet rekening worden gehouden met het feit dat bij het zeven en de preparatie van de vezels ook nog uitstoot ontstaat. Dit verlaagt het netto herverwerkingspercentage weer. De uitkomsten van de simulatie zijn globaal weergegeven in Figuur 36.



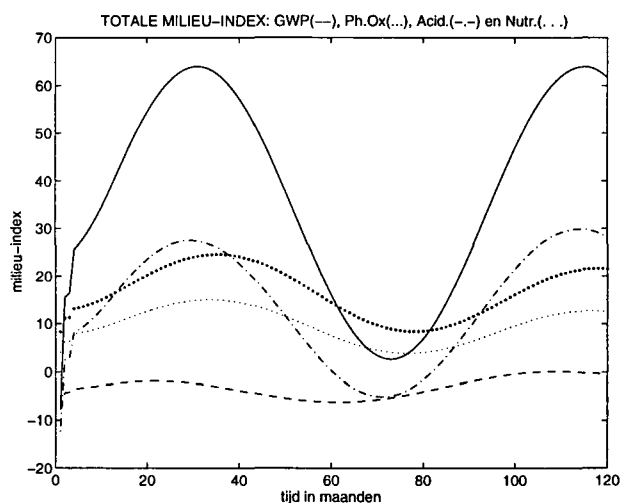
Figuur 36: Het gedrag van de afvalstromen, de ketenkosten en de totale milieu-index als gevolg van een schommelende vraag en een langzaam stijgend percentage van herverwerking.

Opvallend is het feit dat de milieu-index veel sterker schommelt dan de kosten. Bij de kosten zijn deze schommelingen verklaarbaar door een grotere grondstofbehoefte in tijden van een grote vraag dan in tijden van een kleine vraag. Als gevolg hiervan neemt de inkoop van nieuwe vezels toe, en daarmee ook de kosten. Maar er komt in een jaar met een grote vraag ook meer oud papier terug, dus de inkoop van nieuwe vezels blijft relatief ten opzichte van het vraagniveau nagenoeg gelijk. De schommeling in de ketenkosten is daarom net als bij de vraag ongeveer 30% van de gemiddelde ketenkosten. Effecten van de toename van $\alpha(k)$ doen zich niet sterk voor. Dat komt door de gekozen vorm van vergelijking 9.10. Weliswaar verdubbelt de kostprijs voor het ophalen van een kton oud papier, maar de grootte van deze kosten blijft klein ten opzichte van de kosten voor de inkoop van nieuwe vezels. Dit komt duidelijk naar voren in Figuur 37.



Figuur 37: De ketenkosten uitgesplitst in drie belangrijke posten: de kosten voor verbranding, de kosten voor de inkoop van nieuwe vezels en de kosten van inzameling.

Ten slotte wordt in Figuur 38 ook de milieu-index in beeld gebracht. Deze neemt sterk toe bij groter wordende vraag. De eutrofiëring en smogvorming zijn vooral een gevolg van de productie van nieuwe vezels. De verzuring wordt eveneens vergroot bij een toenemende productie van nieuwe vezels. De gunstige bijdrage aan de verzuring die door de verbranding van het oud papier wordt geleverd zorgt ervoor dat, als de consument tijdens een piek in de vraag na enige tijd de verpakkingen van de hand doet, de verzuring weer zal afnemen. De bijdrage aan het broeikas effect blijft negatief en klein: de gunstige bijdrage van de afvalverbranding wint het hier van de schadelijke bijdrage in de productie van de nieuwe en oude vezels.



Figuur 38: Het gedrag van de totale milieu-index als gevolg van de gewogen milieu-effecten broeikas effect (Engels: GWP), smogvorming (Engels: Photo Oxydation, lichte stippellijn), verzuring (Engels: Acidification) en eutrofiëring (Engels: Nutrification, donkere stippellijn).

9.6 Terugblik

De doelstelling van dit hoofdstuk is geweest om een indruk te geven van de werking van het model in een concrete keten. Het model van de elementaire keten moest hiervoor enigszins worden aangepast als gevolg van verschillen tussen de keten van Carta en de algemene elementaire keten. Vervolgens

dienden de kostendrijvers van de belangrijkste kostenposten en milieu-effecten te worden achterhaald. Dit was niet eenvoudig, en bij de simulaties is daarom hier en daar gebruik gemaakt van schattingen. Dit gaat ten koste van de validiteit van de simulaties, maar het ondermijnt de doelstelling van de simulaties in dit hoofdstuk overigens niet.

Er zijn twee situaties bekeken. In de eerste situatie stond de stijging in het herverwerkingspercentage centraal. Om de effecten hiervan goed zichtbaar te maken is de vraag constant verondersteld. Het bleek dat de kosten bij het stijgen van het recyclingpercentage aanvankelijk sterk dalen, en pas voor hoge percentages weer stijgen als gevolg van de moeite die moet worden opgebracht om het oud papier te verzamelen. Opvallend was echter de geringe daling van de milieu-index. Hierin doen zich tegengestelde effecten voor die elkaar compenseren.

In de tweede simulatie werd over tien jaar het herverwerkingspercentage langzaam opgevoerd van 60% naar 80%. De vraag had een 'conjunctureel' verloop met pieken en dalen. De ketenkosten gingen in deze periode ongeveer net zo sterk op en neer als de vraag. De milieu-index ging veel heftiger op en neer.

10. Conclusies en aanbevelingen

10.1 Inleiding

In de vorige hoofdstukken zijn modellen opgesteld waaraan enkele belangrijke veronderstellingen ten grondslag lagen. Met deze modellen zijn vervolgens simulaties uitgevoerd waarbij gegevens uit de werkelijkheid en ook schattingen werden gebruikt om het dynamisch gedrag van de stromen in de keten en de outputs van de keten in beeld te brengen. In paragraaf 2 worden enkele kanttekeningen, die gemaakt werden bij het opstellen van de modellen en het uitvoeren van de simulaties, in herinnering gebracht. In paragraaf 3 worden vervolgens enkele conclusies en aanbevelingen gepresenteerd die zich met name richten op het vervolg van het project.

10.2 Kanttekeningen

In deze paragraaf wordt in herinnering gebracht welke verschijnselen uit de werkelijkheid niet in de modellen zijn meegenomen, terwijl ze vermoedelijk toch invloed op de keten zullen hebben. De beslissingen hieromtrent zijn genomen en toegelicht in de hoofdstukken 5, 6 en 8.

10.2.1 De vraag als niet-manipuleerbare input

Allereerst is bij het opstellen van de elementaire keten niet ingegaan op de totstandkoming van de vraag. Deze beslissing is verdedigbaar, omdat de vraag vaak op een irrationele wijze tot stand komt. Zelfs als de vraag op een rationele manier tot stand zou komen, dan zou dit een uiterst complex en moeilijk analyseerbaar proces zijn. De invloeden van welvaartsniveau, reclame, opleidingsniveau, ideologie, klimaat, en andere factoren laten zich moeilijk kwantificeren. Daarom is het verstandig te werken met scenario's voor de voorspelling van de vraag. Bovendien is de actuele vraag een goed meetbaar begrip. Deze redeneringen hebben ertoe geleid de vraag als onafhankelijke niet-manipuleerbare input aan te wijzen. In werkelijkheid echter is de vraag in zekere mate wél beïnvloedbaar door de producent. Binnen de keten bestaat enige invloed op de grootte van de vraag. Hierbij zijn vooral transactieprizen van invloed. De prijsstelling van de producent kan, gegeven de concurrentiepositie van de andere producenten en van de producenten van substitutiegoederen, de vraag veranderen. Transactieprizen zijn echter niet in het model meegenomen. Ook naar de concurrentiepositie van andere ketens is niet gekeken.

10.2.2 Het achterwege laten van transactieprizen in het economisch criterium

Binnen de keten is de ketenprestatie bepaald door de kosten die de keten moet maken om te kunnen functioneren. Hiertoe is besloten door het inzicht dat de kosten altijd buiten de keten moeten worden afgerekend aan belanghebbenden zoals de leveranciers van arbeid, produktiemiddelen, grondstoffen en kapitaal. Transactieprizen kunnen de producent rijker of armer maken, maar dat betekent impliciet dat de consument armer of rijker wordt. Wat de één 'wint', 'verliest' de ander, ofwel: de optelsom van het producentensurplus en het consumentensurplus is altijd nul. De transactieprijs heeft dus geen invloed op de vraag (zie 10.2.1) en geen invloed op de ketenprestatie. Voor de hele keten is het weglaten van de transactieprijs in het criterium verdedigbaar. Voor de individuele ketendeelnemers is de transactieprijs daarentegen van groot belang. De producent wil winst maken. De keten van Carta

(paragraaf 4.4) schetst een beeld van een economisch gezonde keten, waar de kosten en opbrengsten niet over de ketendeelnemers worden verdeeld, waardoor Carta verliezen maakt, terwijl elders in de keten winsten worden gemaakt. Op lange termijn zal dit de continuïteit van de keten in gevaar brengen. Dit voorbeeld brengt de discepanantie aan het licht tussen ketenoptimalisatie en individuele optimalisatie. In een keten waar het accent ligt op individuele optimalisatie zal groot wantrouwen heersen tussen de actoren in de keten om samen te werken, en zal het criterium van de totale ketenkosten weinig invloed hebben op het gedrag van de actoren. De transactieprijs (en de lokale winst) zullen bepalend zijn voor de economische beoordeling van iedere actor op zich.

10.2.3 De keten als open systeem

Bij het opstellen van de elementaire keten is herhaaldelijk opgemerkt dat het een open systeem is, waarin sprake is van continue wisselwerking met de omgeving. Deze eigenschap komt ten dele in het model tot uiting als het gaat om het milieubeleid. Bij de totstandkoming van de vraag (zie 10.2.1) is al opgemerkt dat invloeden van concurrenten en producenten van substitutiegoederen niet in het model zijn meegenomen. Ook invloeden van ideologische aard zijn niet in het model meegenomen. De ketendeelnemers zijn afgeschilderd als calculerende rationalisten met kennis van alle factoren die in de optimalisatie een rol spelen. In werkelijkheid is dit een aanvechtbare stelling. De ketendeelnemers zijn in het algemeen niet blind voor maatschappelijke belangen en ze zijn zich bewust van hun verantwoordelijkheid op andere dan economische gebieden. Bovendien hebben ze geen volledig zicht op de factoren die in de optimalisatie van hun economisch criterium belangrijk zijn. Toch is bij het opstellen van de elementaire keten en bij het opstellen van het model gedaan alsof er sprake was van rationale ketendeelnemers. Een dergelijke veronderstelling wordt overigens pas echt belangrijk bij de optimalisatie van de criteria. De reden dat deze veronderstelling ondanks de aanvechtbaarheid toch is gedaan, is van pragmatische aard. Het gedrag van de ketendeelnemers kan alleen voorspeld worden als hun gedachten bekend zijn. Door de ketendeelnemers een doelstelling te geven, en die doelstelling uit te drukken in getallen, kan middels een optimalisatie de reactie van de keten worden berekend. Zonder de veronderstelling van rationaliteit wordt elke grip op de keten verloren.

10.2.4 De inputs van de producent

In paragraaf 6.2 is uitvoerig stilgestaan bij de keuze van de input van de producent. Hierbij is opgemerkt dat het veranderen van het produkt en het productieproces niet in het model is meegenomen. Ook dit had een praktische reden: het is in het algemeen niet bekend wat de gevolgen zijn voor de kosten en de milieu-effecten als deze veranderingen plaats zouden vinden. Het is voor een bestaande keten wel mogelijk om dit soort verbanden op te stellen; vaak worden dergelijke analyses gemaakt bij investeringsvraagstukken.

10.2.5 Kostendrijvers zijn beperkt geldig

In de accountancy zijn methoden in gebruik zoals Activity Based Costing waarbij kostendrijvers worden gedefinieerd. De mogelijkheden die dit biedt zijn besproken in paragraaf 8.2. Toch dient er een kanttekening bij het opstellen van de kostendrijvers te worden gemaakt. De berekening van een kostendrijver waarin vaste kostenposten worden meegenomen, vergt altijd een bepaald werkpunt. Voor grote afwijkingen van dit werkpunt zijn de verbanden niet meer geldig. Hetzelfde geldt voor de milieuoëfficiënten. De lineaire verbanden gelden slechts binnen een bepaald gebied.

10.2.6 Subjectieve totstandkoming van de milieu-index

Bij het opstellen van het milieucriterium (zie paragraaf 8.3) is steeds gesproken van de totale milieuschade. Bij de simulaties werd een index ontwikkeld die niet alle milieu-effecten meenam, maar wel de belangrijkste. De weging van deze effecten heeft een subjectief karakter. Deze weging is belangrijk om te komen tot één criterium.

10.2.7 Informatiegebrek

Bij het verifiëren van het model is informatie uit de praktijk nodig. Deze informatie was niet voorhanden. In hoofdstuk 9 is hiervan gewag gedaan. De simulaties in dit verslag zijn deels gebaseerd op theorieën in de logistiek, en deels op getallen uit algemene bronnen. Belangrijke gegevens over de kosten en de milieu-effecten bij Carta waren om redenen van vertrouwelijkheid niet beschikbaar. Bij Alaska Products waren de gegevens zelfs volledig onbekend. Het is dus mogelijk dat ook de ketendeelnemers zelf de informatie niet hebben, en dat er eerst een tamelijk uitvoerig onderzoek gedaan zal moeten worden om over de nodige gegevens te kunnen beschikken. Hierop wordt bij de aanbevelingen nog teruggekomen.

10.3 Conclusies en aanbevelingen

10.3.1 Uitbouwen van de elementaire keten

De elementaire keten bood in de simulaties een eerste beeld van het dynamisch gedrag van een eenvoudige keten. Voor de keten van de kartonnen verpakkingen van Carta moest de vorm van de keten worden veranderd. Het grootste verschil is dat er bij Carta sprake was van herverwerking, terwijl in de elementaire keten alleen hergebruik voorkomt. Kijkend naar de doelstelling van het project is het wellicht verstandig om de opbouw van de elementaire keten uit te bouwen. Een grote keten, waarin de alternatieven van herverwerking en hergebruik allebei voorkomen biedt een algemener beeld van ketens in de werkelijkheid. Doelstelling van het project was het maken van een beslissingsondersteunend programma voor bedrijven of de overheid. Daarbij is het verstandig dat dit programma een ketenmodel bevat waarin alle alternatieven van recycling voor de producent meegenomen kunnen worden. De producent kan dan irrelevante mogelijkheden afstrepen, wat altijd gemakkelijker is dan relevante mogelijkheden erbij bedenken.

Het raamwerk van de elementaire keten is eenvoudig uit te bouwen. Daarbij dient wel aandacht te worden geschonken aan technische randvoorwaarden zoals de doorlooptijd. Ook de keuze voor de periodeduur Δt dient met zorg te worden gemaakt. Bovendien zal het voor bedrijven die gebruik maken van het programma belangrijk zijn dat ze hun keten in de vorm kunnen brengen die correspondeert met de produkt-proces-ketens uit dit verslag. Dit vereist een zekere kunde. De gevalstudie bij Alaska Products (zie paragraaf 4.3) was in dit opzicht een goede oefening; er zijn tien verschillende alternatieven ondergebracht in één produkt-proces-keten.

10.3.2 Linearisatie

Het model dat is opgesteld voor de elementaire keten is niet lineair; linearisatie is echter wel mogelijk. Bij linearisatie is een werkpunt belangrijk. Voor een algemene keten zoals de elementaire keten is het volledig arbitrair om zo'n werkpunt vast te stellen, maar het vermoeden bestaat dat in sommige

ketens het recyclingpercentage en ook de stromen niet sterk in grootte veranderen in de tijd. Linearisatie wordt dan mogelijk. Het lineaire model dat door de linearisatie ontstaat kan worden onderzocht op bijvoorbeeld stabiliteit en regelbaarheid en maakt de keten dus toegankelijk voor de gebruikelijke analyses van de regeltechniek.

10.3.3 Optimalisatie

De opgestelde criteria van de totale ketenkosten en de totale milieuschade zouden kunnen worden geoptimaliseerd. Een probleem hierbij is dat er bij deze optimalisatie sprake is van hiërarchie. De overheid heeft immers de eerste keuze bij het vaststellen van het storttarief, en de producent zal proberen zijn criterium te optimaliseren door te kiezen voor een geschikt recyclingpercentage gegeven dat storttarief. In de simulaties van hoofdstuk 9 is de overheid een constant storttarief toebedeeld. In de praktijk kan de overheid inderdaad niet iedere maand een ander storttarief vaststellen; meestal vindt zo'n verandering plaats na langere tijd. Toch is het interessant om te onderzoeken wat de invloed van het storttarief is op de outputs van de keten. Deze gedachte brengt de vraag onder de aandacht wie straks het (voltooide) ketenmodel als instrument bij beleidsvoering gaat gebruiken. Als dat de producent is, dan is het storttarief een parameter. Als het echter de overheid is, dan is het storttarief een belangrijke input, en ontstaat er een situatie met een dubbele optimalisatie: de producent optimaliseert het economisch criterium gegeven een storttarief. Dit leidt tot een waarde voor het milieucriterium. De overheid op haar beurt wil dit milieucriterium optimaliseren door een geschikte keuze van het storttarief. De vraagstelling voor de overheid is dan eigenlijk: bij welk storttarief kan de producent zodanig worden gemanipuleerd dat hij, door economische optimalisatie, tevens uitkomt op de optimale waarde voor het milieucriterium. Er is onderzoek uitgevoerd naar deze optimalisatie met hiërarchie en een raamwerk hiervoor wordt geboden in appendix F.

10.3.4 Onderzoek naar relevante grootheden in de praktijk

Voor het verifiëren van een model is kennis van de werkelijkheid nodig. In paragraaf 10.2.7 werd als kanttekening bij de gemaakte simulaties opgemerkt dat er sprake was van een gebrek aan relevante informatie. De samenwerking tussen de vakgroepen Systeem- en Regeltechniek bij de faculteit Natuurkunde en de sectie Energie en Milieu van de vakgroep Fabricagetechnologie bij de faculteit Technologie Management biedt in de toekomst de mogelijkheid om theorie en praktijk verder naar elkaar toe te brengen. Het verdient aanbeveling om later in het project een concreet ketenonderzoek te starten naar zowel de economische als de ecologische effecten van een specifieke keten. Een dergelijk onderzoek is van bedrijfskundige aard en zou een bron kunnen zijn voor de relevante gegevens die nu gemist werden bij de verificatie. De uitkomsten van het onderzoek kunnen bovendien een algemeen referentiekader bieden voor de opstellers van de modellen. Dit laatste streven is ook de reden geweest om in dit verslag de hoofdstukken 2, 3 en 4 op te nemen; ze kunnen voor anderen informatie bevatten die de inleertijd verkort.

Overigens dient bij het voltooien van het ketenmodel rekening te worden gehouden met het feit dat veel bedrijven zelf niet op de hoogte zijn van gegevens. De modelbouwers zouden moeten proberen om het aantal parameters beperkt te houden. Het opnemen van meer informatie in het model kan leiden tot een model dat beter bij de werkelijkheid aansluit, maar dat tegelijk moeilijker hanteerbaar is voor de doelgroep die met het model moet gaan werken. Dan ontstaat er enigszins paradoxaal een tegenstelling tussen de correctheid van het model, en het nut ervan. Er dient aandacht te worden geschonken aan deze trade off tussen validiteit en eenvoud. Om die reden is het verstandig te werken met eenvoudig meetbare grootheden en slechts parameters toe te voegen als het nut en de meetbaarheid van die parameters bekend zijn. In dit kader moet ook voorzichtig worden omgegaan met het in het model opnemen van algemene functies die een onbekend verband vastleggen tussen bepaalde grootheden (zoals in het model voor de elementaire keten is gedaan bij de kosten $f(\alpha)$ voor de inza-

meling) en die door de keten zelf moeten worden ingevuld. Het probleem van het invullen van zo'n algemene functie wordt dan verschoven van de modelbouwer naar degene die het model toe wil passen.

10.3.5 Stijgende relevantie van onderzoek naar ketens

In de inleiding werd gesteld dat het streven naar duurzame ontwikkeling zal leiden tot een sterkere onderlinge afhankelijkheid tussen de ketendeelnemers in een produktketen. Het optimaliseren van het milieucriterium over de gehele keten vraagt een andere invalshoek bij het zaken doen. Er zijn informatiesystemen nodig die de keten in zijn geheel overspannen. De keten als geheel wordt afgerekend op de prestatie. De investeringen en de beloningen of boetes dienen binnen de keten intern verdeeld te worden. Ook de kwaliteitsbeweging in het bedrijfsleven dringt aan op een kwaliteitsbeheer dat de bedrijfs grenzen overschreidt [16]. Nu in navolging van Japanse bedrijven meer en meer onderdelen en modules door toeleveranciers worden gemaakt, stijgt ook hierdoor de onderlinge afhankelijkheid. De kwaliteit van een produkt wordt meer en meer bewerkstelligd door de hele keten die het produkt voortbrengt. Een derde trend die de afhankelijkheid van opeenvolgende stations in de keten vergroot, is het streven naar kleinere voorraden en kortere doorlooptijden. Leveranciers en afnemers dienen samen te werken om goederenstromen op elkaar af te stemmen. Deze drie bewegingen in het interantionale bedrijfsleven vereisen van de ketendeelnemers dat zij met elkaar langlopende verbintenissen aangaan. Bovendien is de continuïteit van de keten belangrijk; de producent heeft belang bij gezonde leveranciers en andersom. In Japan nemen leveranciers om de onderlinge belangen te onderstrepen een aandelenbelang in de afnemer, en de afnemer doet hetzelfde bij zijn leveranciers.

Deze drie trends tonen de relevantie aan van verder onderzoek naar optimalisatie over de gehele keten. In West-Europa dient er een omslag te komen van de suboptimalisatie van het eigen bedrijfsresultaat naar optimalisatie over de gehele keten. Deze omslag kan worden geholpen door een overheidsbeleid dat zich hier op richt. Het voor zowel het bedrijfsleven als de overheid opstellen van beleidsondersteunende instrumenten die zich richten op de gehele keten, zoals dit project beoogt, verdient dus zeker aanbeveling, en zal in de toekomst alleen maar aan relevantie winnen.

11. Literatuur

- [1] S. Strijbos: Het technische wereldbeeld - een wijsgerig onderzoek van het systeemdenken, Buijten & Schipperheijn, 1988, Amsterdam
- [2] M. Bunge: A world of systems, D. Reidel Publishing Company, 1979, Dordrecht
- [3] N.J.T.A. Kramer: Systeem in probleem, H.E. Stenfert Kroese, 1978, Leiden
- [4] J.W. Forrester: World Dynamics, Wright-Allen Press Inc., 1971, Cambridge (VS)
- [5] D. Meadows (MIT): Rapport van de club van Rome - De grenzen aan de groei, Het Spectrum N.V., 1972, Utrecht/Antwerpen
- [6] M.D. Mesarovic, D. Macko en Y. Takahara: Theory of hierarchical, multilevel systems, Academic Press, 1970, New York/Londen
- [7] E.G.J. Vosselman: Ontwerp van 'management control'-systemen, een economische benadering, Kluwer bedrijfswetenschappen, 1996, Deventer
- [8] Prof. dr. H.A. Udo de Haes: Milieukunde contra getuigenisbeleid, Afval & Reststoffen, november 1994.
- [9] De regeling verpakking en verpakkingsafval, Ministerie van VROM, 1996, Den Haag
- [10] Ontwerp regeling verpakking en verpakkingsafval, Ministerie van VROM, 20 juni 1996, Den Haag
- [11] Eindverslag in het kader van D-project 1996 voor "Alaska Products B.V.", uitgevoerd door: J. Dorgelo, J.J. Mom, L.A. van Oosterhout en D.T.M. Peters onder begeleiding van Ir. M.A.M. Splinter en Dr. E.G.J. Vosselman. Datum eindpresentatie: 13 juni 1996, Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Technologie Management, Eindhoven
- [12] E. Hansen Löve, P. de Waard: Plan voor afstoten "Carta" doet historisch moment verbleken, Volkskrant, 1 oktober 1996
- [13] Ing. G.F. van Oorschot: Handleiding milieugerichte levenscyclusanalyse van producten, uitgever en jaar van publicatie onbekend.
- [14] W. Findeisen et al.: Control and coordination in hierarchical systems, John Wiley & Sons, 1980, Chichester, New York, Brisbane, Toronto
- [15] J.W.M. Bertrand, J.C. Wortmann, J. Wijngaard: Productiebeheersing en material management, Stenfert Kroese Uitgevers, 1990, Leiden/Antwerpen
- [16] J.P. Womack, D.T. Jones, D. Roos: The machine that changed the world, Harper Perennial, 1990, New York

- [17] E.A. Silver, R. Peterson: Decision systems for inventory management and production planning, John Wiley & Sons, 1985, New York/Chichester
- [18] J.J. Kok: Handleiding Werktuigkundige Regeltechniek II, Technische Universiteit Eindhoven, 1990, Eindhoven
- [19] H. Troy Nagle en C.L. Phillips: Digital Control System Analysis and Design, Prentice Hall,inc., 1990, Englewood Cliffs
- [20] R. Isermann: Digital Control Systems, Springer-Verlag, 1981, Berlijn/Heidelberg/New York
- [21] Produktiestatistieken industrie, kartonnage-industrie, CBS, 1994, Voorburg/Heerlen
- [22] Produktiestatistieken industrie, papier- en kartonindustrie, CBS, 1993, Voorburg/Heerlen
- [23] Produktiestatistieken industrie, kartonnage-industrie, CBS, 1993, Voorburg/Heerlen
- [24] J.M. Bloemhof-Ruwaard: Integration of Operational Research and Environmental Management, Doctoral Thesis Landbouwwuniversiteit Wageningen, 1996, Wageningen
- [25] I. Boustead en G.F. Hancock: Handbook of industrial energy analysis, Ellis Horwood Limited, 1979, Chichester (Groot Britannië)
- [26] Dr. F. Lox: Verantwoorde verpakking, Uitgeverij de Nederlandsche Boekhandel, 1983, Antwerpen/Amsterdam

Appendices

APPENDIX A:

Procesmodellering met Petri-netwerken: een kennismaking

1. Inleiding.

Petri-netwerken zijn grafische presentaties van transitie-systemen. Ze worden veel gebruikt bij het modelleren van hardware, communicatieprotocollen, databases en in de initiatiefase van een systeemontwerpproject. Aan de Technische Universiteit Eindhoven wordt er met Petri-netten gewerkt bij de sectie Informatiesystemen van de faculteit Wiskunde en Informatica en de vakgroep Informatie & Technologie van de faculteit Bedrijfskunde. Het moge duidelijk zijn dat Petri-netwerken het meest gebruikt worden voor toepassingen in de informatietechnologie.

Toch is er in het verleden ook onderzoek gedaan naar transitie-systemen met een grotere breedte dan computernetwerken alleen. Er zijn in het verleden bijvoorbeeld enkele onderzoeken uitgevoerd naar procesmodellen met behulp van Petri-netten voor organisatorische, logistieke en technische systemen. Om die reden heb ik kort onderzocht wat Petri-netten zijn en hoe ze werken.

Petri-netten zijn een uitvinding van Carl Adam Petri, die de netwerken in 1962 voor het eerst presenteerde. Tegenwoordig noemt men dergelijke netwerken klassieke Petri-netten. Later zijn de klassieke Petri-netten uitgebreid met kleur, tijd en hiërarchie; netwerken die deze uitbreidingen bevatten worden hoog-niveau Petri-netten genoemd. De verschillen tussen deze beide soorten netwerken zullen nog besproken worden.

Het is de bedoeling van dit inleidend rapportje over Petri-netten om de systematiek van zowel de klassieke Petri-netten als de hoog-niveau Petri-netten in gemakkelijk begrijpbare taal en vorm weer te geven. Dit betekent dat de wiskundige presentatie waar mogelijk naar de achtergrond is geschoven, en de grafische presentatie naar voren is gehaald. Om steeds duidelijk te maken wat wordt bedoeld zijn een aantal voorbeelden opgenomen, die tevens als doel hebben de lezer enigszins een beeld te geven van het soort systemen dat met Petri-netten kan worden gemodelleerd.

2. Klassieke Petri-netten

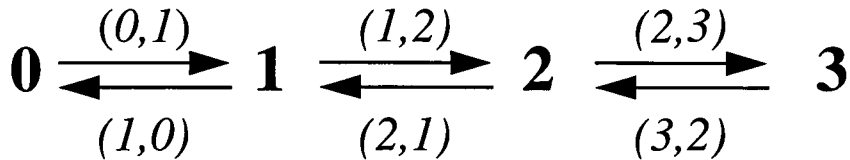
2.1 Transitie-systemen

Een transitie-systeem is een systeem dat wordt vastgelegd met een toestandsruimte en een transitierelatie. De toestandsruimte S bevat alle mogelijke toestanden waarin een systeem kan verkeren. De transitierelatie T bevat alle mogelijke rechtstreekse overgangen van de ene toestand naar de andere. Dit transitie-systeem kan worden weergegeven in een toestandsdiagram.

Voorbeeld met lift:

Een lift bevindt zich in een gebouw met vier bouwlagen. Deze lift bevindt zich dus ofwel op de begane grond (verdieping 0), of op de 1e, 2e of 3e verdieping. De toestandsruimte

$S = \{0,1,2,3\}$. De lift kan stapsgewijs van verdieping veranderen. Als de lift zich op de eerste verdieping bevindt, kan hij naar de begane grond of naar de tweede verdieping overgaan. De lift kan uiteraard niet in één overgang van de eerste naar de derde verdieping. De transitierelatie ziet er dus als volgt uit: $T = \{(0,1), (1,2), (2,3), (3,2), (2,1), (1,0)\}$. Het toestandsdiagram is als volgt:



Figuur 1: Het toestandsdiagram van een lift in een gebouw met 4 bouwlagen.

Als S en T erg groot worden, wordt een toestandsdiagram complex en onoverzichtelijk en is het maken ervan een zeer inefficiënt karwei. Er zijn snellere manieren om het transitie-systeem grafisch vast te leggen. Eén van die manieren werd bedacht door Carl Adam Petri: Petri-netten.

2.2 *Bouwstenen van klassieke Petri-netten*

Een Petri-net bevat passieve en actieve elementen. De passieve elementen noemt men kanalen (Engels: channels). Een kanaal vervult in het systeem één of meer van de volgende rollen:

- medium (bijv. telefoonlijn of distributiekanaal)
- buffer (bijv. een wachtrij)
- geografische lokatie (bijv. een verdieping van een gebouw)
- toestand of fase (bijv. een jaargetijde)
- conditie (bijv. het al of niet vrij zijn van een machine)

Kanalen worden weergegeven door een rondje:



De actieve elementen noemt men processoren (Engels: processors). Voor alle duidelijkheid dient vermeld te worden dat een processor een elementair ofwel ondeelbaar proces weergeeft. Dit is belangrijk als straks hiërarchie binnen de Petri-netten wordt geïntroduceerd. Een processor heeft in een systeem één of meer van de volgende rollen:

- gebeurtenis (bijv. de overgang van lente naar zomer)
- transformatie (bijv. fabricageproces)
- transport

Processoren worden weergegeven door een vierkantje met een zwarte hoekje rechtsonderin:



De kanalen en processoren worden gericht verbonden met een pijl. Deze verbindingen kunnen een multiplicitéit hebben; dat wil zeggen dat de verbinding enkelvoudig of meervoudig kan zijn. De multiplicitéit van een input-kanaal van een processor p wordt $I(k,p)$ genoemd. Als I tussen een kanaal k en processor p nul is, dan is er geen verbinding tussen k en p (die een input zou zijn voor p). De multiplicitéit van een output-kanaal wordt aangegeven met $O(k,p)$. De systematiek voor O is analoog aan I . Schematisch kunnen de input-kanalen en de output-kanalen als volgt worden weergegeven:



Figuur 2: Schematische weergave van een input- en een output-kanaal met processor p en kanaal k . Het komt ook voor dat, wanneer $I(k,p)$ en/of $O(k,p)$ gelijk zijn aan twee of drie, er twee of drie pijlen worden getekend. Als er één pijl staat, en geen I of O wordt vermeld, dan geldt $I=1$ of $O=1$.

De toestand wordt aangegeven door tokens, die zich in de kanalen bevinden. De toestand in het Petri-net wordt weergegeven door de verdeling van tokens over de kanalen. Een token kan één of meer van de volgende rollen vervullen:

- fysiek object (bijv. een produkt, of een persoon)
- informatie (bijv. een gegeven)
- verzameling van objecten of informatie (bijv. een volle vrachtwagen of een adressenbestand)
- toestand of fase (bijv. om aan te geven dat de vrachtwagenchauffeur rijdt of pauzeert)
- conditie (in dit geval duidt de aanwezigheid van een token in een zeker kanaal erop dat aan een zekere voorwaarde is voldaan.)

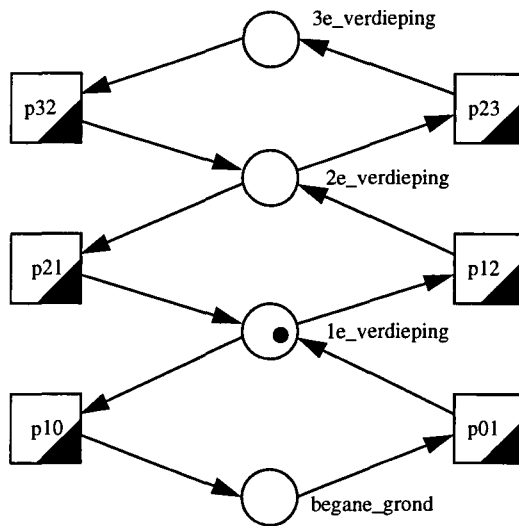
Een token wordt weergegeven door een dikke stip: ●

De toestand van een systeem kan veranderen door een processor die vuurt. Tijdens het vuren vindt er een transitie plaats uit de transitierelatie. Een processor vuurt door uit alle input-kanalen tokens te halen met multipliciteit $I(k,p)$ en aan alle output-kanalen $O(k,p)$ tokens toe te voegen. Een processor kan dus alleen dan vuren, wanneer al zijn input-kanalen k_i voorzien zijn van de vereiste $I(k_i,p)$ tokens. Indien dit het geval is, is een processor 'enabled', en moet hij vuren.

Een kleine vertaalslag naar goederenstromen is misschien nuttig. In de logistiek worden de processen, die de goederenstromen ondergaan, opgesplitst in drie soorten. Men onderscheidt daarbij transformatie naar vorm (een fabricageproces, weer te geven door een processor), transformatie naar plaats (transport, ook weer te geven door een processor) en transformatie naar tijd (opslag, weer te geven door een kanaal). De elementen kanaal en processor zijn geschikt voor het modelleren van goederenstromen. De tokens kunnen dan de rol van de goederen vervullen.

Opnieuw het voorbeeld met de lift (zie Figuur 3):

De lift van het toestandsdiagram uit Figuur 1 kan ook met behulp van een Petri-net worden weergegeven. We voeren zes processoren in, die overeenkomen met de opgesomde transities uit de transitierelatie. Drie processoren stellen dus een liftbeweging omhoog voor, en drie stellen er een liftbeweging omlaag voor. De toestanden worden weergegeven met kanalen. Als een processor vuurt, verandert de toestand. De lift gaat dan één verdieping omhoog of omlaag.



Figuur 3: Het Petri-net van de lift (die zich momenteel op de 1e verdieping bevindt).

2.3 Eenvoudige wiskundige beschrijving van een klassiek Petri-net

Nu de bouwstenen van een Petri-net enigszins bekend zijn, is het mogelijk om een vluchtige kennis-making te hebben met de wiskunde die ermee samenhangt. Zoals in de inleiding al gemeld zal niet in details worden getreden.

We definiëren:

K = de verzameling van alle kanalen k

P = de verzameling van alle processoren p

$I(k,p)$ = de input-multipliciteit van kanaal k naar processor p

$O(k,p)$ = de output-multipliciteit van processor p naar kanaal k

Definitie van een klassiek Petri-net:

Een klassiek Petri-net is een 4-tupel (K,P,I,O) waarvoor het volgende geldt:

- K is een eindige verzameling kanalen
- P is een eindige verzameling processoren
- $I \in (K \times P) \rightarrow \mathbb{N}$ is een functie die de input-multipliciteiten bepaalt.
- $O \in (P \times K) \rightarrow \mathbb{N}$ is een functie die de output-multipliciteiten bepaalt.

De toestand wordt gedefinieerd met het getal s , dat aan ieder kanaal K een getal toekent. Dit wordt als volgt genoteerd: $s \in K \rightarrow \mathbb{N}$.

De toestandsruimte S = verzameling van alle mogelijke toestanden.

Een processor p kan slechts vuren als al zijn input-kanalen tenminste het aantal tokens bevatten dat overeenkomt met I . Processor p is enabled als: $\forall k \in K: s(k) \geq I(k,p)$.

De multipliciteit van de verbindingen met een processor p geeft aan hoeveel tokens worden geconsumeerd en geproduceerd. Het netto-effect op het aantal tokens bedraagt: $O(k,p) - I(k,p)$.

Indien p vuurt in toestand s_1 , dan leidt dat tot een nieuwe toestand s_2 met: $\forall k \in K: s_2(k) = s_1(k) - I(k,p) + O(k,p)$.

Nu kan in een bondige notatie het gehele transitie systeem en daarmee het gedrag van een willekeurig Petri-net (K,P,I,O) worden vastgelegd met S en T :

$$S = K \rightarrow \mathbf{N}$$

$$T = \{ (s_1, s_2) \in S \times S \mid \exists p \in P \quad \forall k \in K \quad s_1(k) \geq I(k,p) \wedge s_2(k) = s_1(k) - I(k,p) + O(k,p) \}$$

Een poging om het bovenstaande in woorden uit te drukken:

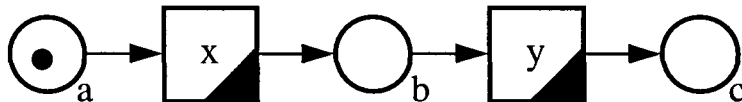
De toestandsruimte S bestaat uit alle functies van K naar \mathbf{N} , en de transitierelatie T wordt gegeven door alle transities van s_1 naar s_2 , beide binnen de toestandsruimte S , waarvoor geldt dat er een processor p aanwezig is die in toestand s_1 enabled is en die door te vuren toestand s_2 veroorzaakt.

2.4 Enkele typische netwerkstructuren

Hieronder volgen puntsgewijs een aantal typische structuren, die in het Petri-netwerk-formalisme zijn afgebeeld.

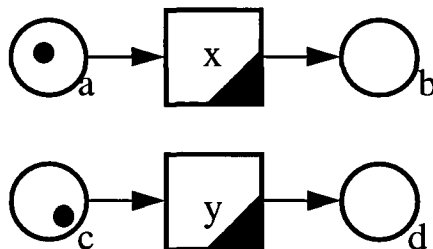
• Causaliteit

Hiermee wordt verwezen naar een oorzakelijk verband tussen twee gebeurtenissen x en y . Gebeurtenis y zal niet plaats vinden als gebeurtenis x niet daarvoor zal hebben plaatsgevonden. Grafisch ziet dat er zo uit:



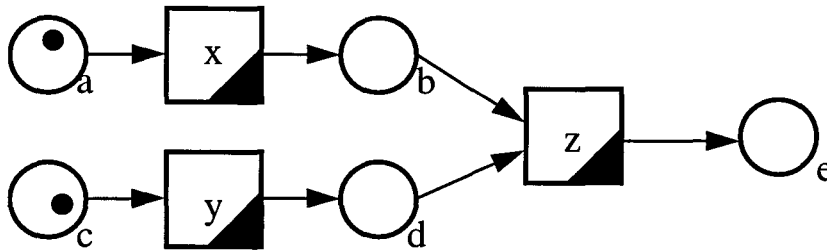
• parallelisme

Hiermee worden twee gebeurtenissen getypeerd die volledig van elkaar onafhankelijk verlopen. De gebeurtenissen hoeven niet perse gelijktijdig te verlopen. (Een klassiek Petri-net kent überhaupt geen tijd!) Een dergelijk proces kan als volgt worden afgebeeld:



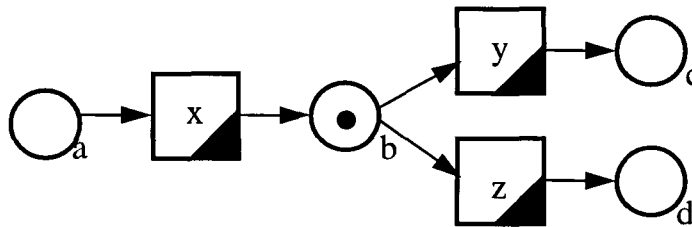
• synchronisatie

Bij synchronisatie is er sprake van afstemming. De bovenstaande parallelle structuur kan op een gegeven moment samenkomen, waarbij er synchronisatie optreedt. Eigenlijk is synchronisatie taalkundig een enigszins ongelukkig gekozen term, omdat het gelijktijdig betekent, terwijl er geen tijd bestaat. Het is echter zo dat in onderstaande structuur processor z pas kan vuren als zowel kanaal b als kanaal d bezet zijn door een token. Die twee worden er dan gelijktijdig uitgehaald (vandaar het woord synchronisatie) en in kanaal e komt er een token bij. Deze structuur doet denken aan een assemblage-afdeling, waar twee voorheen onafhankelijke halffabrikaten worden samengevoegd tot een produkt. Dit kan grafisch worden weergegeven:



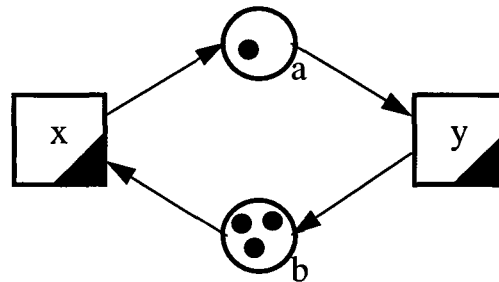
• conflict

Er is sprake van een conflict als er gelijktijdig twee processors enabled zijn, terwijl er maar één kan vuren. Als er één gevuurd heeft, zijn ze allebei niet meer enabled. Bij Petri-netten wordt er in geval van conflict op een non-deterministische wijze bepaald welke processor zal vuren. Dat is dus niet te voorspellen! In de figuur is er een conflict tussen processor y en processor z. Beide zijn enabled, maar slechts één kan er vuren.



• terugkoppeling

Er is sprake van terugkoppeling als twee processors met elkaar verbonden zijn op een manier zoals hieronder afgebeeld:

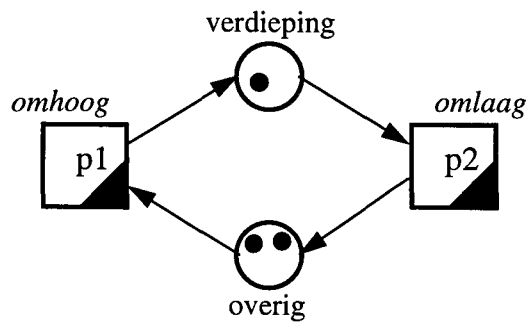


Aan het slot van deze inleiding over klassieke Petri-netten volgen nog twee stellingen:

1. Er zijn vele manieren om hetzelfde systeem te modelleren.

Voorbeeld met lift:

Dit kan het beste duidelijk worden gemaakt door nog een keer naar het voorbeeld van de lift te kijken. In Figuur 3 bij het vorige voorbeeld is een Petri-net voor de lift gemodelleerd. Het telt zes processors; drie voor omhoog, en drie voor omlaag. De toestand wordt gegeven door een token, dat zich bevindt in een kanaal. De toestand is gemakkelijk afleesbaar, en de lift is nog goed te herkennen in de weergave van de kanalen. Een veel compacter model van hetzelfde systeem kent maar twee processors: omhoog en omlaag, zoals in Figuur 4 is te zien.



Figuur 4: Opnieuw een model voor de lift.

Het aantal tokens in het kanaal *verdieping* geeft aan op welke verdieping de lift zich bevindt. De tokens in het kanaal *overig* hebben een belangrijke functie, maar zijn niet interessant voor de toestand. In het kanaal *overig* zitten immers altijd drie tokens minus het nummer van de verdieping waarop de lift zich bevindt.

Het model voor de lift is in zoverre illustratief, dat het goed duidelijk maakt hoe een Petri-net op verschillende manieren hetzelfde transitie-systeem weergeeft. De kwaliteit van een Petri-net hangt onder meer af van de eenvoud, de omvang en de begrijpelijkheid van het model. Het model moet passen bij het systeem dat gemodelleerd wordt en het doel waarvoor het model wordt gebruikt. De keuze voor een bepaalde modellering is echter ten dele subjectief.

2. Er zijn vele systemen die op dezelfde manier gemodelleerd kunnen worden.

Deze tweede stelling spreekt eigenlijk voor zich. Het is een variatie op het oude principe dat een model op tal van situaties van toepassing kan zijn. Zo zou het model uit Figuur 4 evenzogoed betrekking kunnen hebben op melkflessen. Volle flessen staan in het bovenste kanaal, lege flessen in het onderste. Als we een lege fles aan de deur zetten, vervangt de melkboer die door een volle (rechterprocessor). Als we de melk drinken, raakt de fles leeg (linkerprocessor).

2.5 Tekortkomingen van het klassieke Petri-net

Hoewel de Petri-netten een adequaat middel zijn om op een bondige manier een complex toestandsdiagram weer te geven, hebben de klassieke Petri-netten zelf ook nog steeds het nadeel dat de omvang al heel snel groot wordt. Daarmee ontstaan dezelfde nadelen als de nadelen die het toestandsdiagram had, en dat terwijl de Petri-netten eigenlijk waren ingevoerd om die nadelen op te lossen. Om te komen tot een compactere formulering van een complex klassiek Petri-netwerk zijn aan dit netwerk twee belangrijke dingen toegevoegd. Allereerst krijgen tokens een waarde. Ze zijn niet langer zwarte stippen met alleen een bepaalde rol, maar ze worden van elkaar onderscheidbaar door een voor die tokens kenmerkende waardering. Dit geven van een waarde wordt kleuren genoemd. In het vervolg worden de gekleurde Petri-netten geïntroduceerd.

Een tweede maatregel om de omvang van een Petri-net terug te brengen tot overzichtelijk formaat is het toepassen van hiërarchie. Het netwerk wordt opgesplitst in niveaus. Het bovenste niveau is een zeer eenvoudige weergave van het systeem. Deelsystemen daarvan worden op een lager niveau verbijzonderd. Ook dit deelsysteem kan deelsystemen bevatten, die op een nog lager niveau worden gespecificeerd, en zo kan men doorgaan. Ook deze hiërarchische opbouw wordt nog besproken.

Naast het nadeel van de omvang en de complexiteit heeft het Petri-net het nadeel dat het geen tijd kent. De netwerken geven een aardig beeld van de voorwaarden wanneer processen kunnen verlopen. Ze kennen causaliteit, parallelisatie, synchronisatie, maar ze bieden geen beeld van het verloop van

de toestanden in de tijd. Dit is bij validatie van het model natuurlijk een heel belangrijk punt. Dit probleem wordt opgelost door aan de tokens een tijdstempel te geven, en de bij de processordefinitie het begrip vertraging in te voegen.

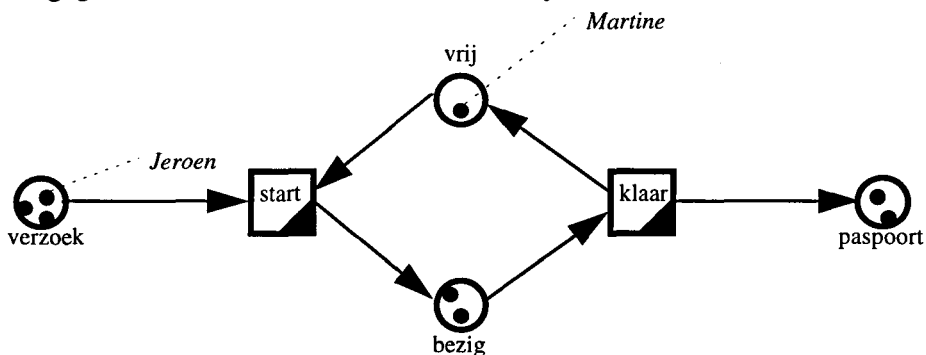
Door het invoeren van kleur en tijd verandert de aard van het Petri-net aanzienlijk. Bovendien maakt de invoering van hiërarchie het mogelijk om op een overzichtelijke wijze aggregatieniveaus aan te leggen en het netwerk een compacte structuur mee te geven. Het klassieke Petri-net wordt daarmee vervangen door een hoog-niveau Petri-net; dat wil dus zeggen een Petri-net met kleur, tijd en hiërarchie. Deze drie vernieuwingen zullen in de volgende paragrafen besproken worden.

3. Petri-netten met kleur

Zoals hierboven al werd toegelicht is het handig om tokens van elkaar te kunnen onderscheiden. Dit wordt mogelijk gemaakt door het geven van een waarde aan bepaalde tokens. Men spreekt ook wel van het geven van een kleur aan een token. Niet elke waarde is echter toegestaan. Het type van de waarde van tokens dient exact overeen te komen met de andere tokens in hetzelfde kanaal; anders kunnen ze niet met elkaar vergeleken worden en bestaat er geen correct onderscheid. Daarom dienen niet alleen de tokens een waarde te krijgen, maar dienen de kanalen ook een definitie te hebben van welk type ze zijn.

Voorbeeld met balie:

Het proces van het kleur geven van een klassiek Petri-net kan worden toegelicht met een model van de balie in een gemeentehuis waar paspoorten worden gemaakt. Om een paspoort te krijgen dient een inwoner van de betreffende gemeente naar het gemeentehuis te gaan met het verzoek om een paspoort. Aan de balie werken drie mensen. Als tenminste één van deze mensen vrij is, dan wordt de persoon direct geholpen. Hij dient bepaalde gegevens over zichzelf te leveren, en de baliemedewerker verwerkt deze in een nieuw paspoort. De persoon kan het paspoort meenemen als het klaar is. In Figuur 5 wordt een weergave gegeven van het klassieke Petri-net dat bij deze situatie hoort.

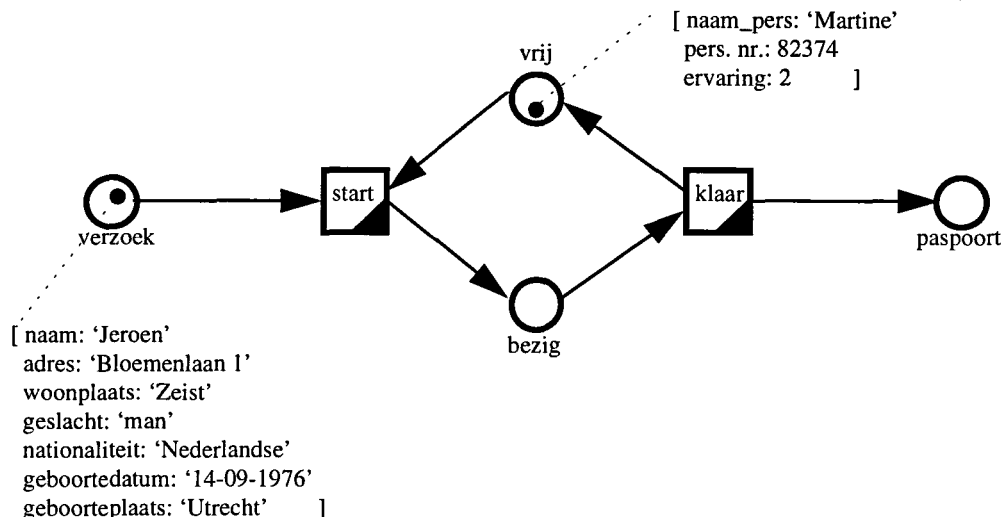


Figuur 5: Een klassiek Petri-net van de paspoortbalie.

Om het geven van kleur aan de tokens duidelijk te maken, nemen we voor het gemak alle tokens uit bovenstaande figuur weg, behalve twee: Jeroen en Martine. Deze twee gaan we nader bekijken.

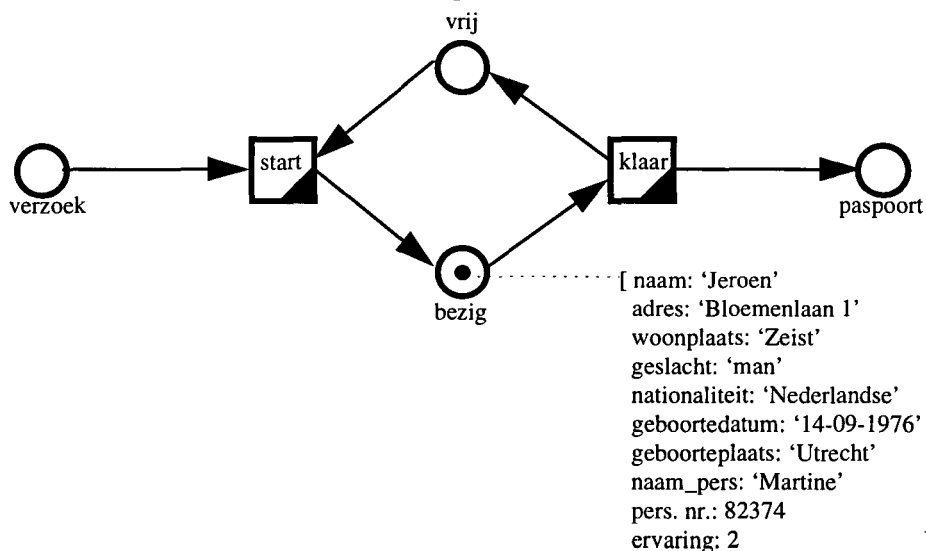
Wanneer iemand verzoekt om een paspoort, dient hij de volgende gegevens aan de baliemedewerker bekend te maken: de naam, het adres, de woonplaats, het geslacht, de nationaliteit, de geboortedatum en de geboorteplaats. Deze attributen behoren bij de tokens die zich in het kanaal ‘verzoek’ bevinden. Het kanaaltipe van ‘verzoek’ luidt dus: [naam:str., adres:str., woonplaats:str., geslacht:str., nationaliteit:str., geboortedatum:str., geboorteplaats:str.]. De tokens zijn van elkaar onderscheidbaar door hun attribuutwaarde. Het token dat in Figuur 5 als Jeroen wordt aangewezen, krijgt de attribuutwaarden die in

Figuur 6 worden gegeven. In het systeem krijgt ook Martine bepaalde attribuutwaarden, die overeenkomen met de naam, het personeelsnummer en het aantal jaren ervaring.



Figuur 6: De attribuutwaarden van Jeroen en Martine.

Wanneer nu processor 'start' vuurt, zullen de tokens uit de kanalen 'verzoek' en 'vrij' worden gehaald, en zal er in het kanaal 'bezig' een nieuw token ontstaan, dat de waarden van Jeroen en Martine combineert in één tupel.



Figuur 7: De situatie van de balie nadat 'start' gevuurd heeft.

Het is duidelijk dat processor 'start' twee bestaande tokens heeft geconsumeerd en een nieuw token heeft geproduceerd van een nieuw type. Dit nieuwe token had uit nog meer informatie kunnen bestaan dan een samenvoeging van de twee tokens van voor het vuren, Het had bijvoorbeeld ook nog eens informatie kunnen bevatten over het klantnummer.

Wanneer de processor 'klaar' hierna vuurt, splitsen de gegevens zich weer. De gegevens van Martine komen weer in het kanaal 'vrij' terug en de gegevens van 'Jeroen' worden in een paspoort verwerkt. Bij een gekleurd Petri-net hoeft een processor echter niet alle output-kanalen te vullen! Het kan zijn dat Jeroen geen paspoort krijgt omdat hij zijn pasfoto's vergeten is. Dan keert Martine terug naar vrij, maar komt er geen token bij in het kanaal 'paspoort'.

Uit het voorbeeld blijkt dat de processor op grond van inputwaarden bepaalt welke tokens geproduceerd worden en met welke waarde. Het gedrag van een processor is niet langer vanzelfsprekend; de processor krijgt een zekere intelligentie. Processordefinitie, ook wel processorspecificatie genoemd, wordt daardoor heel belangrijk. Dit legt het gedrag van een processor precies vast. Een van de gevolgen hiervan is dat een processor voortaan niet meer vanzelfsprekend enabled is als er voldoende tokens in zijn input-kanalen zitten. Deze tokens moeten met hun waarden soms voldoen aan bepaalde voorwaarden of precondities. Ook een dergelijke preconditie moet in de processorspecificatie worden opgenomen. Voortaan is een processor pas enabled als er voldoende tokens in de input-kanalen aanwezig zijn en als de waarden van eeze tokens voldoen aan de preconditie.

In sommige kanalen is het aantal tokens voortaan niet meer zo belangrijk. Veel belangrijker wordt dan de informatie die de tokens in dat kanaal geven. Er bestaat zelfs een speciaal soort kanaal, waar altijd maar één token in zit; de waarde van dit token kan na iedere vuring veranderen, maar het aantal tokens in zo'n kanaal niet. Een dergelijk kanaal heet een store, en wordt afgebeeld als een kanaal met een kruis erin:



De naam store doet al een duidelijke functie vermoeden: het is een geschikte wijze om een magazijn te modelleren. Het is ondoenlijk om voor ieder object in dat magazijn een token te tekenen, maar dat ene token in de store bevat precies de waarde van het aantal objecten dat op voorraad gehouden wordt. Wanneer een processor vuurt, gebruikt hij de informatie uit dat token, verandert die informatie eventueel, maar altijd komt er een vernieuwd token terug in de store.

De uitbreiding van de klassieke Petri-netten met kleur brengt veel nieuwe mogelijkheden met zich mee. Tokens worden onderscheidbaar van elkaar. Met het onderscheiden van tokens kan eenzelfde netwerk voortaan meerdere processen modelleren. Ieder token uit een bepaalde categorie kan immers een eigen route door het netwerk hebben. Dit is een gevolg van het feit dat het gedrag van de processors aansluit bij de waarden van de tokens; processors mogen produceren, maar moeten het niet! Met deze enorme groei aan mogelijkheden binnen het netwerk wordt analyse uiteraard moeilijker, maar het kleuren van de tokens heeft tot resultaat dat de omvang van het nieuwe netwerk beperkter wordt dan die van het klassieke netwerk, en daarmee is het een oplossing voor het bezwaar tegen klassieke netwerken met betrekking op hun omvang en complexiteit.

4. Petri-netten met tijd

Een tweede gemis van de klassieke Petri-netten, naast de grote omvang, is het gebrek aan tijd. Zonder tijd is prestatie meting onmogelijk. De oplossing voor het invoeren van tijd is eigenlijk een eenvoudige aanvulling bij het kleuren van de tokens. In de vorige paragraaf werd uitgelegd dat het kleuren van tokens inhield dat aan de tokens bepaalde waarden werden toegevoegd. Bij het invoeren van tijd voegen we aan ieder token een extra waarde toe, namelijk een tijdstempel. Dit stempel geeft aan vanaf welk tijdstip het token beschikbaar is voor consumptie door een processor.

De toestand wordt uitgebreid; klassiek was het aantal tokens en hun verdeling over de kanalen belangrijk, maar nu dient ook nog per token aangegeven te worden wat het tijdstempel van ieder token is. Bovendien dient van ieder token de kleur te worden opgenomen in de toestand.

In de vorige paragraaf werd al uitgelegd dat een processor pas enabled is als er voldoende tokens in de input-kanalen zitten en ze volgens eventuele precondities geschikte waarden voor vuring hebben. Daar komt nu nog een eis bij. De te consumeren tokens dienen allemaal beschikbaar te zijn voor consumptie. Het tijdstip waarop inderdaad alle voor een vuring benodigde input-tokens beschikbaar zijn wordt gegeven door het token met het hoogste tijdstempel. Pas als dat token beschikbaar is, kan de processor

vuren. Er wordt dan gesproken van het enabblingstijdstip. De bijkomende eis is nu dat alleen de processor met het laagste enabblingstijdstip kan vuren.

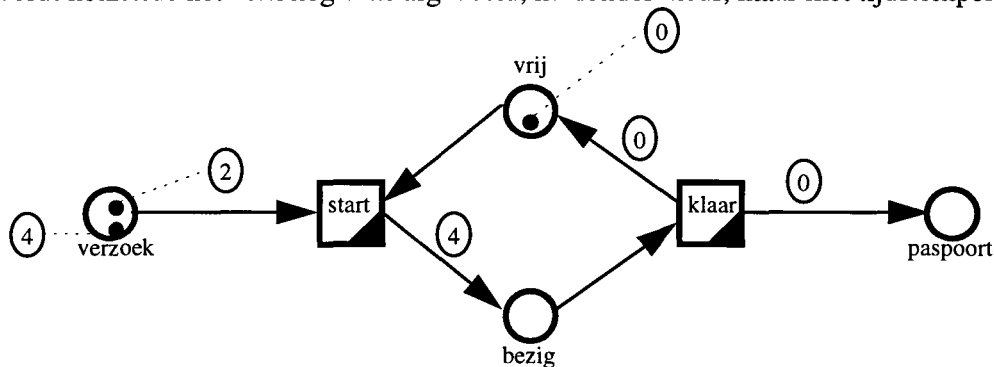
Voor de duidelijkheid zij vermeld dat hiermee nog steeds niet de situatie van conflict tussen twee processoren is geëlimineerd. Het is mogelijk dat er twee processoren zijn, die beide enabled zijn op hetzelfde tijdstip. Dan blijft er sprake van een non-deterministische keuze.

Bij het geven van kleur aan de tokens werd genoemd dat een processor bij vuring de waarde van een token kan veranderen. Dat geldt ook bij de tijdstempels. De processor die vuurt kan het tijdstempel verhogen. We spreken dan van vertraging. Als een processor bijvoorbeeld een proces voorstelt, dat in de werkelijkheid 10 tijdseenheden duurt, dan zal in het model de processor een vertraging van 10 tijdseenheden aan het token geven. Dat betekent dat het token pas 10 tijdseenheden later weer beschikbaar is voor een volgende vuring. Ook dit dient in de processordefinitie te worden vermeld.

De werking van tijdstempels kan inzichtelijk gemaakt worden door het voorbeeld van de paspoortbalie in het gemeentehuis nog eens terug te nemen. We laten de kleur van de tokens even weg, maar geven wel de tijdstempels weer.

Opnieuw het voorbeeld van de paspoortbalie:

In de vorige paragraaf is de paspoortbalie in een gemeentehuis geïntroduceerd. In Figuur 8 wordt hetzelfde netwerk nog eens afgebeeld, nu zonder kleur, maar met tijdstempels.



Figuur 8: De paspoortbalie met tijdstempels.

Het proces verloopt als volgt. Het enabblingstijdstip van 'start' is 2. Er is geen andere processor die een eerder enabblingstijdstip heeft, dus 'start' vuurt. Als 'start' vuurt, geeft de pijl uit 'start' aan dat er een vertraging optreedt van vier tijdseenheden. Dit is een modellering van de actie die aan de balie plaats vindt. Processor 'klaar' krijgt enabblingstijdstip 6, en aangezien er geen andere processor eerder enabled is, vuurt 'klaar'. Zonder vertraging komt er een token in de kanalen 'paspoort' en 'vrij'. Processor 'start' krijgt nu het enabblingstijdstip 6, en kan vuren.

Het is gebruikelijk de toestand in tabelvorm te geven. Van het bovenstaande proces ziet dat er (voor een deel) als volgt uit:

Begintoestand:

kanaal	tijdstempel
verzoek	2
	4
vrij	0
bezig	
paspoort	

Toestand nadat 'start' heeft gevuurd:

kanaal	tijdstempel
verzoek	4
vrij	
bezig	6
paspoort	

Toestand nadat 'klaar' heeft gevuurd:

kanaal	tijdstempel
verzoek	4
vrij	6
bezig	
paspoort	6

Het is duidelijk dat de vertraging van processor 'start' een belangrijke rol vervult in het verloop van het proces. De processorspecificatie is van groot belang. De manier waarop processors worden gespecificeerd hangt af van welk softwarepakket men gebruikt om het netwerk mee door te rekenen. In ieder geval kan een processor verbaal worden beschreven. Een voorbeeld van een processorspecificatie in woorden wordt hieronder gegeven.

voorbeeld: processorspecificatie van processor 'start' uit paspoortbalie

- Er is geen preconditionie
- Er wordt altijd één token geproduceerd voor kanaal 'bezig'
- De waarde van dit token is een tupel dat verkregen wordt door samenvoeging van de waarden van de twee geconsumeerde tokens.
- De vertraging van dit token is afhankelijk van het attribuut ervaring; is deze attribuutwaarde groter dan 5, dan is de vertraging gelijk aan 3, anders aan 4 tijdseenheden.

De uitbreiding met tijd is eigenlijk hetzelfde als de uitbreiding met kleur. Er wordt een waarde aan het token gehecht, en processors doen iets met die waarde bij vuring. De tijd is niet meer en niet minder dan een attribuut van de tokens.

5. Hiërarchie

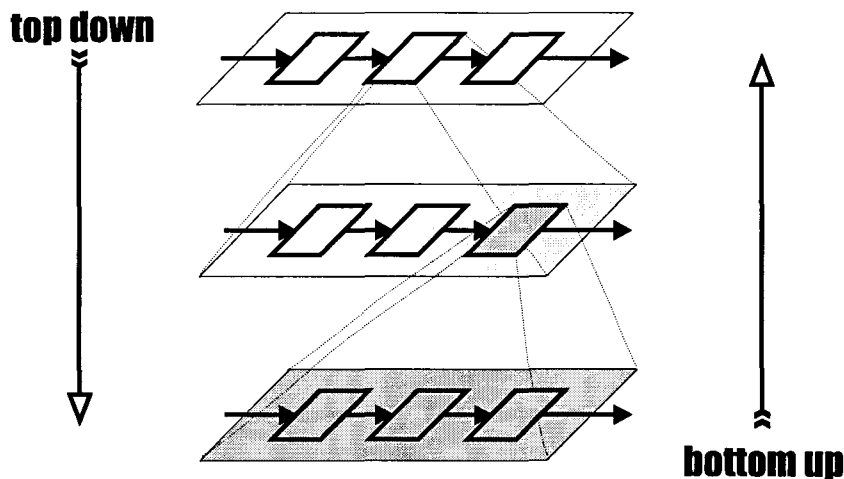
Het is soms mogelijk om een netwerk te bekijken op meerdere niveaus. Er is dan sprake van hiërarchie. Het onderscheid tussen niveaus heeft te maken met de mate van detaillering. Op hogere niveaus vindt minder detaillering plaats, waardoor er een beter overzicht bestaat van het gemodelleerde systeem. Het hoogste niveau van een gesloten systeem is één element, namelijk het systeem zelf. Er zijn in het algemeen twee manieren om tot een hiërarchische structuur te komen. Het is mogelijk om bij zo min mogelijk detail (ofwel het hoogste hiërarchische niveau) te beginnen en van daar uit te decompونeren tot het laagste hiërarchische niveau; dit heet de top-down-benadering. De beweging andersom begint in de complexiteit van de gedetailleerde werkelijkheid (het laagste hiërarchische niveau) en gaat componeren tot grotere eenheden met minder details; dit is de bottom-up-benadering. Het onderscheid in niveaus en de twee benaderingen kunnen eenvoudig in een figuur worden duidelijk gemaakt (zie Figuur 9).

Bij klassieke Petri-netten werd bij de introductie van processors en kanalen expliciet vermeld dat dit de elementaire bouwstenen zijn van het netwerk. Ze kunnen dus niet verder opgesplitst worden. De processors met hun kanalen vormen dus altijd het laagste hiërarchische niveau. Het is wel mogelijk om een niveau daarboven te creëren door het samenvoegen van processors tot een groep en die groep

te symboliseren met één symbool op een hoger hiërarchisch niveau. Zo'n groep noemt men een proces en het bijbehorende symbool is:



Een proces wordt gedefinieerd door het tekenen van de inwendige structuur op een lager hiërarchisch niveau. Een proces kan bestaan uit processors, kanalen, verbindingen of uit andere processen. Een proces is ook meerdere keren bruikbaar in een netwerk, zonder dat het iedere keer opnieuw gedefinieerd hoeft te worden. Wanneer de structuur van het proces meerdere keren voorkomt in een klassiek Petri-net, maar er toch kleine verschillen zijn tussen de exacte werking van die gelijke structuur (bijvoorbeeld een andere vertraging), dan dient het algemene proces een parameterisering te krijgen, die dit soort verschillen mogelijk maakt. Evenzo dienen de contacten met de buitenwereld van het proces goed gedefinieerd te zijn. Een proces heeft input-connectoren en output-connectoren. Dit zijn gewoon kanalen van een bepaald type, die pas een reële invulling krijgen door het proces ergens in het netwerk te plaatsen. Het juiste kanaaltipe voor zowel de input-kanalen als de output-kanalen is een stricte voorwaarde. Voor de volledigheid dient vermeld te worden dat er ook store-connectoren mogelijk zijn.



Figuur 9: Symbolische weergave van drie hiërarchische niveaus en van de twee benaderingen: top-down en bottom-up.

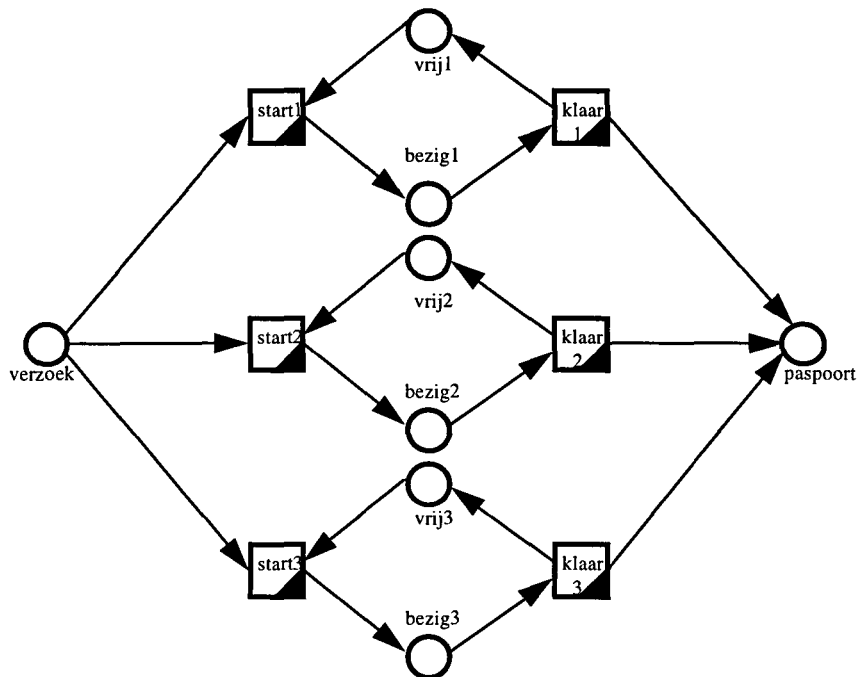
Zoals voorheen is het het gemakkelijkste om de consequenties van het invoeren van hiërarchie duidelijk te maken in een voorbeeld.

Voorbeeld met de balie:

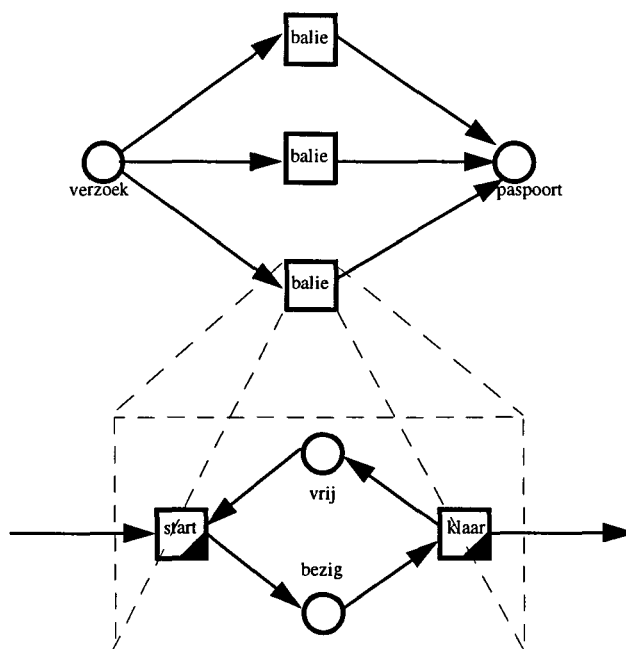
De structuur van de balie werd gegeven in Figuur 5. Er werden drie baliemedewerkers onderscheiden. In werkelijkheid hebben alledrie de medewerkers een eigen balie. Wel is er sprake van een gemeenschappelijke wachtrij. De ervaring van de drie medewerkers (die bepalend was voor de tijdsduur van het proces) verschilt enigszins. Bovendien hebben alledrie de balies nog een specialisatie: balie 1 verleent tevens rijbewijzen, balie 2 verleent tevens uittreksels uit het geboorteregister en balie 3 verleent toeristenkaarten. Een onderzoeker modelleert het systeem met een klassiek Petri-net op de manier van Figuur 10. Uit de figuur blijkt duidelijk dat er sprake is van drie keer dezelfde structuur. De specialisatie van de balies wordt niet meegenomen; dat kan altijd gemakkelijk in de precondities van de processors 'start1', 'start2' en 'start 3' wanneer het netwerk wordt gekleurd. De naam van het laatste kanaal, 'paspoort' is nogal ongelukkig gekozen misschien, omdat dit kanaal ook rijbewijzen, uittreksels uit het geboorteregister en toeristen-

kaarten kan bevatten. Ook dit is geen enkel probleem meer wanneer we de tokens een kleur geven. De onderzoeker kan tevreden zijn met het netwerk.

Toch vindt de onderzoeker zelf dat het geheel er nogal gecompliceerd uitziet, en hij wenst het te vereenvoudigen door het onderkennen van een zekere hiërarchie. Hij definieert het proces balie en maakt dit zichtbaar in een nieuwe grafische weergave. Het nieuwe netwerk is opgenomen in Figuur 11.



Figuur 10: Klassiek Petri-net van de paspoortbalie in het gemeentehuis.



Figuur 11: Toepassing van hiërarchie in de Petri-net van de paspoortbalie.

Voor de volledigheid dient vermeld te worden dat in Figuur 11 geen echte definitie is opgenomen van het proces 'balie'. Daarvoor zou er een parametrisatie nodig zijn (met daarin in ieder geval de attributen 'ervaring' en 'specialisatie') en een heldere definitie van het kanaaltype van de input-connector en de output-connector. De manier waarop deze parametrisatie en specificatie plaats vindt hangt, net als bij de werking van de processors, af van het computerprogramma dat wordt gebruikt. Het voert te ver om per programma zo'n specificatie als voorbeeld te geven.

6. Conclusie

Het hoog-niveau Petri-net is een compacte manier om een bepaald proces te modelleren. Daarbij dient wel gezegd te worden, dat analyse van een netwerk niet gemakkelijk is vanwege het grote aantal mogelijkheden dat de structuur schept. Door de tijd als een attribuut te behandelen, is de tijdloosheid van het klassieke Petri-net verholpen en kan er een prestatiemeting van het proces worden opgezet. Daarmee worden Petri-netten een geschikt middel voor simulatie. Door gebruik te maken van een zekere hiërarchie binnen het netwerk, wordt er voor een toeschouwer een overzichtelijkere structuur geschapen. Een hiërarchische structuur maakt het gemakkelijker te modelleren en te analyseren. Voor alle duidelijkheid moet worden gezegd dat het hierbij om de hiërarchie binnen het model gaat, en niet om hiërarchie binnen het systeem (zoals bijvoorbeeld bij een bepaald bedrijf met de toplaag, met het middenkader en de werkvloer).

7. Literatuur

Bij het opstellen van dit rapport is gebruik gemaakt van de volgende literatuur:

- [1] W. van der Aalst: Technieken voor procesmodellen, dictaat bij het college Specificeren van Informatiesystemen, 1995, Eindhoven
- [2] W. Reisig: A Primer in Petri Net Design, Springer-Verlag, 1992, Berlin/Heidelberg
- [3] W. Reisig: Petri Nets, an introduction, Springer-Verlag, 1985, Berlin/Heidelberg
- [4] L. Peterson: Petri net theory and the modelling of systems, Prentice Hall Inc., 1981, Englewood Cliffs

APPENDIX B:

Analyse van hiërarchische systemen: Multilayer Systems

1. Inleiding

Voor het nemen van een beslissing omtrent een te nemen maatregel bestaat in een bedrijf vaak een hiërarchie. Deze hiërarchie heeft vaak te maken met een structuur van verantwoordelijkheden en bevoegdheden. De organisatiekunde [1] tekent hierbij aan dat een hiërarchische structuur kan leiden tot overdreven formalisatie, schuiven met verantwoordelijkheden, vertragingen, kortom alles wat wel eens peioratief 'bureaucratie' wordt genoemd. (Dit woord komt uit de spreektaal en dient niet verward te worden met de enigszins verwante ideaalstructuur van Weber.) Het feit dat hiërarchische structuren er toch nog zijn, duidt op een aantal factoren aan de pluskant die nog zwaarder wegen dan de nadelen. Hieronder volgen meerdere redenen waarom bedrijven bij het nemen van beslissingen (toch) hiërarchie hebben ingevoerd:

1. Eén individu heeft beperkte capaciteit om alle informatie uit het proces in zich op te nemen en daarmee een goede beslissing te nemen. Tussenstations met eigen detailniveaus tussen proces en beslisser zijn vaak noodzakelijk.
2. Subsystemen kunnen in de praktijk geografisch gescheiden zijn, wat een zekere autonomie vereist. Ook om economische redenen komt het steeds vaker voor dat bedrijven decentraliseren [2] en een subsidiariteitsbeginsel invoeren om zo op lagere niveaus meer ondernemerschap te kweken.
3. Communicatie tussen niveaus veroorzaakt kosten en vertragingen, en vaak treedt er enigermate van vervorming op, wat de kwaliteit van de beslissing zelf of van de interpretatie daarvan aantast. Geaggregeerde informatie met niet meer details dan nodig is daarom vaak beter, goedkoper en sneller.

In het verleden zijn er methoden opgesteld om met deze hiërarchie om te gaan. Dit heeft geleid tot een stroming die in het Engels Hiërarchische Systemen Analyse wordt genoemd. Deze valt uiteen in twee verschillende benaderingen:

- A. Multilayer systems, ontwikkeld door Lefkowitz in 1966 [3]
- B. Multilevel systems, ontwikkeld door Mesarovic et al. in 1970 [4]

Voor de koppeling van hiërarchische niveaus aan verschillende tijdshorizonnen zijn een aantal ideeën ontleend aan het concept van de Multilayer Systems.

2. Multilayer Systems

Bij Multilayer Systems [3] wordt een systeem onder de loep genomen, waarvan men bepaalde variabelen c wil regelen om ze een gewenste waarde c_d te geven. Deze c_d wordt in een optimalisatieprocedure berekend. Voor een dergelijke optimalisatie is een algoritme nodig dat de doelen van het systeem en hun onderlinge prioriteit weergeeft. Dit geheel van informatie dat als input dient voor de optimalisatie van c noemen we β . Deze β dient om de zoveel tijd opnieuw te worden bepaald; dit heet adaptie.

In een bedrijf correspondeert dit concept met drie hiërarchische niveaus [5]:

1) het strategische niveau

Voor een lange periode worden globale doelstellingen geformuleerd voor het hele bedrijf (β). Dit zijn vaak doelstellingen die verband hebben met de vragen: wat gaan we doen en waarom? De belangrijkste toets vindt plaats door het meten van de verhouding tussen de opbrengsten en de offers, waarbij men vooral gespitst is op de effectiviteit en de efficiëntie. Belangrijke vraag is: wat gaan we doen? De planningshorizon is de langere termijn, wat kan variëren van enkele jaren tot ongeveer 15 jaar.

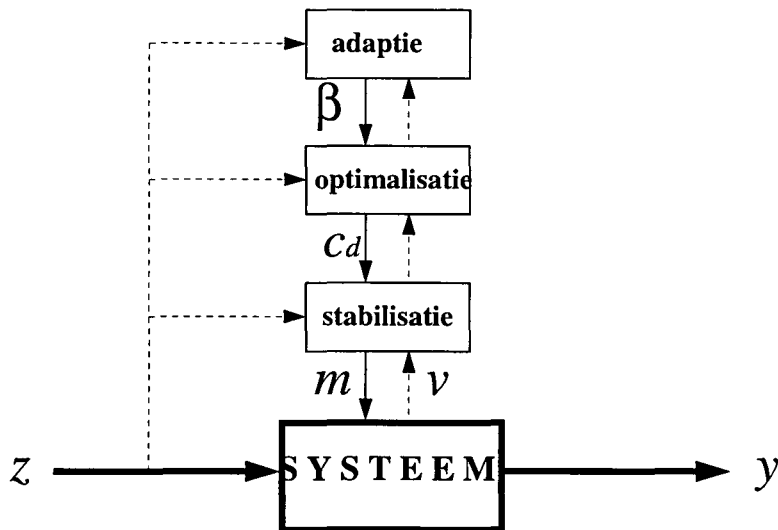
2) het tactisch niveau:

Gegeven de globale doelstellingen β is het de taak van dit niveau die doelstellingen te vertalen naar concrete prestaties op gebied van kwaliteit, tijdigheid (logistiek) en kosten. Er wordt voor een middellange termijn (enkele maanden tot enkele jaren) een verzameling van parameters c_d opgesteld die ervoor moeten zorgen dat het proces zo goed mogelijk voldoet aan de globale doelstellingen. Belangrijke vragen daarbij zijn: hoe gaan we het doen, en waarmee?

3) het operationeel niveau:

Dit niveau krijgt de parameters c_d van hogerhand en wordt geconfronteerd met de vraag hoe op korte termijn de benutting van capaciteit, materiaal, energie en milieu moet zijn om aan de doelstellingen van het tactisch niveau te voldoen. Op dit niveau wordt het proces direct aangestuurd en worden vragen beantwoord als: wie doen het, met hoevelen, met welk instrument en wanneer? De planningshorizon varieert van een uur tot een week.

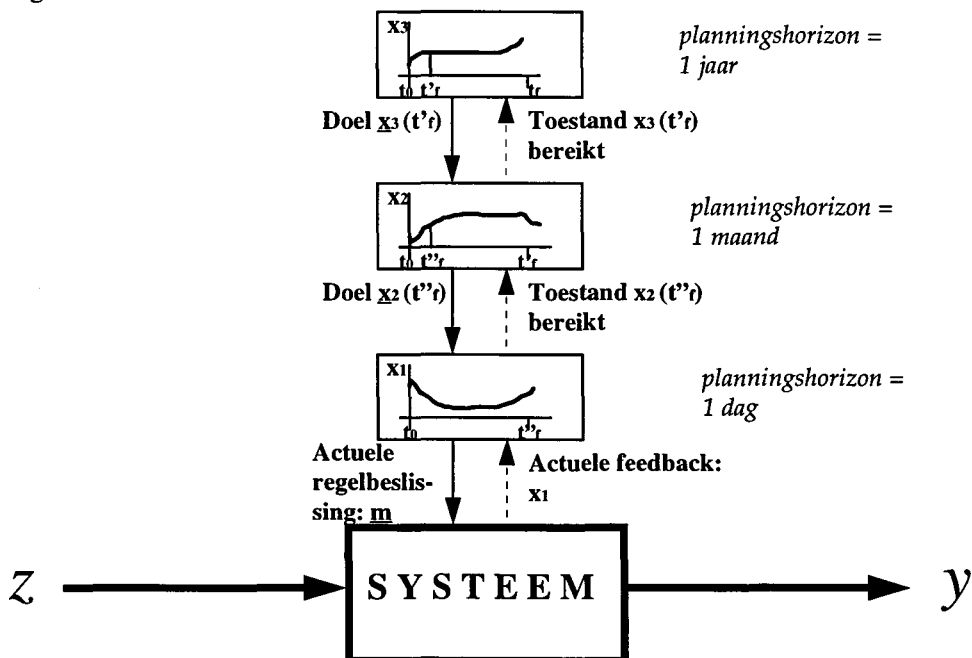
Bij een nauwkeurige beschouwing van de bedrijfshiërarchie blijkt dat er sprake is van twee criteria voor de hiërarchische opsplitsing: een functioneel criterium (adaptie \rightarrow optimalisatie \rightarrow stabilisatie) of een criterium dat samenhangt met de tijd (lange termijn \rightarrow middellange termijn \rightarrow korte termijn).



Figuur 1: Een systeem met een functionele hiërarchie van drie lagen. De niet-manipuleerbare inputs worden weergegeven door z , de manipuleerbare door m . De output is y , en de informatiestroom is v .

In Figuur 1 is een min of meer statische functionele multilayerhiërarchie gegeven. Hierbij is geen aandacht geschonken aan de planningshorizon. Bovendien geeft deze indeling het idee dat optimalisatie in één laag optreedt; functioneel gezien is dat ook zo, maar bij de uitleg van de drie hiërarchische niveaus in een bedrijf werd al duidelijk dat in wezen alle drie de niveaus het systeem proberen te optimaliseren gegeven bepaalde voorwaarden en omstandigheden. Met het stellen van voorwaarden kan een hoger niveau een lager niveau beïnvloeden.

Naast het functionele criterium werd een criterium genoemd dat met tijd verband hield. Dit criterium kan net als het functionele criterium in een figuur worden weergegeven. Een voorbeeld hiervan is afgebeeld in Figuur 2.



Figuur 2: Het multilayer concept toegepast op een multihorizon dynamisch regelsysteem.

In Figuur 2 is te zien dat op het hoogste niveau een koers wordt uitgestippeld met een eigen tijdshorizon en een gewenst gedrag voor x_3 . Hierbij is x_3 een geaggregeerde grootte. Wanneer x_3 wordt geoptimaliseerd resulteert dit in een \underline{x}_3 die optimaal is tussen t_0 en t_f (Het optimum wordt steeds aangegeven met een streepje onder de toestand. De werkelijke toestand wordt zonder streepje weergegeven.). Het interval $[t_0, t_f]$ heeft een lengte van een jaar. Een niveau lager is de planningshorizon een maand; dit correspondeert met het tijdstip t'_f . Er wordt dan gekeken naar de geplande toestand $\underline{x}_3(t'_f)$. De informatie die \underline{x}_3 voor de overige 11 maanden van het jaar bood wordt (nog) niet gebruikt. De gewenste toestand $\underline{x}_3(t'_f)$ wordt op het middelste niveau in een eigen optimalisatieproces vertaald naar een gewenste toestand $\underline{x}_2(t'_f)$. Deze gewenste toestand dient als input voor het onderste niveau; nu wordt alleen naar de eerste dag t''_f gekeken. Uiteraard is informatie over de huidige toestand $x_1(t_0)$ ook van belang. Hiermee en met $\underline{x}_2(t''_f)$ wordt een optimalisatieproces uitgevoerd dat leidt tot een systeeminput m die als doel heeft een gewenste toestand $\underline{x}_1(t''_f)$ te bereiken. Na een dag wordt informatie over de toestand van het systeem ingewonnen. Toestand $x_1(t''_f)$ is bereikt. Dit dient als input voor het optimalisatieproces van de volgende dag. De informatie kan ook om de zoveel tijd (bijvoorbeeld na een week) door worden gesluisd naar het middelste niveau, waar dan opnieuw voor een maand, met kennis van het gewenste verloop van het topniveau en met kennis van de actuele toestand van het systeem een nieuwe optimalisatie plaats vindt voor x_2 . Om de zoveel tijd gaat er ook geaggregeerde informatie naar het hoogste niveau, waar \underline{x}_3 bijgesteld kan worden.

3. Literatuur

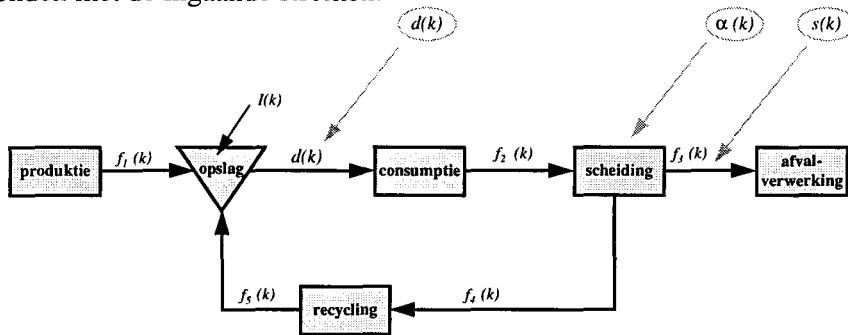
- [1] C.J. Lammers: Organisaties vergelijkenderwijs, Uitgeverij Het Spectrum B.V., 1991, Utrecht
- [2] E.G.J. Vosselman: ontwerp van 'management control'-systemen, een economische benadering, Kluwer bedrijfswetenschappen, 1996, Deventer
- [3] W. Findeisen et al.: Control and Coordination in hierarchical systems, John Wiley & Sons, 1980, Chichester, New York, Brisbane, Toronto
- [4] M.D. Mesarovic, D. Macko en Y. Takahara: Theory of hierarchical, multilevel systems, Academic Press, 1970, New York/Londen
- [5] H.H. van Mal: Groepentechnologie en classificatie, syllabus bij het college, TUE, 1994, Eindhoven

APPENDIX C:

De interne toestand van de stations consumptie en recycling

1. Inleiding

In de elementaire keten zijn de uitstromen uit de stations 'consumptie' en 'recycling' via een transferfunctie verbonden met de ingaande stromen.



Figuur 1: Stroomdiagram van de elementaire keten

De vergelijkingen hierbij zijn:

$$f_2(k) = \sum_{h=1}^H g_c(h) \cdot d(k-h) \quad \text{verg. C1}$$

en:

$$f_5(k) = \sum_{j=1}^J g_r(j) \cdot f_4(k-j) \quad \text{verg. C2}$$

Voor beide functies geldt dat de som van de factoren g_i 1 moet zijn. In deze appendix wordt geprobeerd een toestandsrepresentatie te maken voor de beide stations. Als voorbeeld wordt hier het station consumptie uitgewerkt. Voor recycling geldt een zelfde aanpak.

2. Toestandsrepresentatie

De vorm die wordt gehanteerd voor de interne toestand is de volgende:

$$\begin{aligned} \underline{x}_c(k+1) &= A\underline{x}_c(k) + Bd(k) \\ f_2(k) &= C\underline{x}_c(k) \end{aligned} \quad \text{verg. C3}$$

Hierin is de toestand $\underline{x}_c(k)$ een vector met H elementen. Het onderschrift c is toegevoegd om deze toestand niet te verwarren met de toestand van de keten. De toestand $\underline{x}_c(k)$ wordt gedefinieerd als:

$$\underline{x}_c(k) = \begin{pmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_H(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d(k-H) \\ d(k-H+1) \\ \vdots \\ d(k-1) \end{pmatrix} \quad \text{verg. C4}$$

De systeemmatrix A is een matrix van $H \times H$ en is een soort 'vershoven' eenheidsmatrix:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{verg. C5}$$

De matrix B heeft de vorm van een vector ter lengte H :

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{verg. C6}$$

De matrix C ($1 \times H$) tenslotte bevat de factoren $g_c(h)$:

$$C = (g_c(H) \quad g_c(H-1) \quad \cdots \quad g_c(1)) \quad \text{verg. C7}$$

3. Gebruikte literatuur

- [1] H. T. Nagle en C.L. Phillips: Digital Control System Analysis and Design, Prentice Hall, inc., 1990, Englewood Cliffs
- [2] R. Isermann: Digital Control Systems, Springer-Verlag, 1981, Berlijn/Heidelberg/New York

APPENDIX D:

Toestandsvergelijkingen

1. Inleiding

In het verslag is voor de elementaire keten een stelsel vergelijkingen gepresenteerd, waarvan een groot deel onafhankelijk was van het gekozen productiesysteem. Het betrof:

$$I(k+1) = I(k) + f_1(k) + f_5(k) - d(k)$$

$$f_2(k) = \sum_{h=1}^H g_c(h) \cdot d(k-h)$$

$$f_3(k+1) = [1 - \alpha(k)] \cdot f_2(k)$$

$$f_4(k+1) = \alpha(k) \cdot f_2(k)$$

$$f_5(k) = \sum_{j=1}^J g_r(j) \cdot f_4(k-j)$$

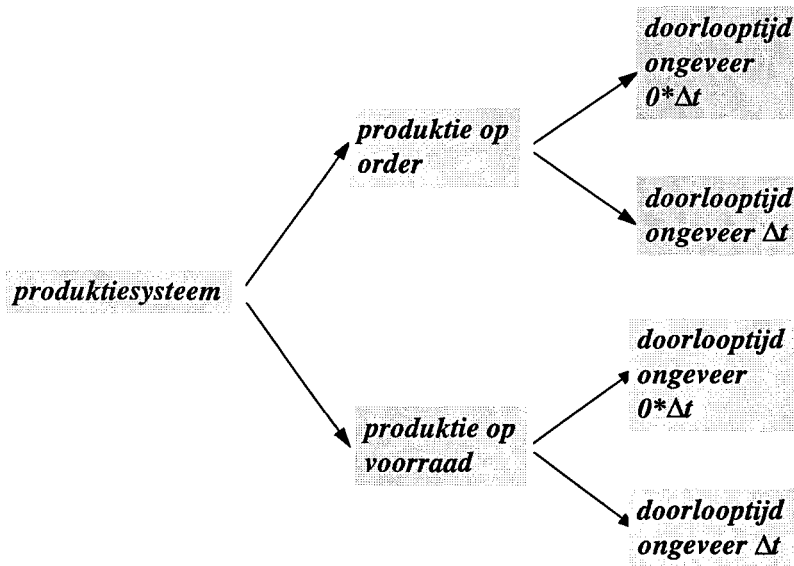
Om het volledige systeemgedrag te beschrijven is het nodig te kiezen voor een bepaald productiesysteem. Dan kan, mits voor alle perioden k geldt $f_i(k) > 0$, het hele stelstel vergelijkingen beschreven worden door de volgende twee vergelijkingen:

$$\underline{x}(k+1) = A \cdot \underline{x}(k) + B(\underline{x}(k)) \cdot \underline{u}(k) \quad \text{verg. D1}$$

$$\underline{y}(k) = C \cdot \underline{x}(k) + D \cdot \underline{u}(k) \quad \text{verg. D2}$$

Hierbij bevat de vector $\underline{y}(k)$ alle stromen uit de elementaire keten. De toestand wordt weergegeven door $\underline{x}(k)$.

In het verslag werd aangegeven dat er vier mogelijke productiesystemen werden bestudeerd. Er werd onderscheid gemaakt tussen productie op order en productie op voorraad, en voor deze beide situaties werd gewerkt met een ten opzichte van Δt verwaarloosbare doorlooptijd en een doorlooptijd ter grootte van Δt . Dit leverde de vier combinaties van figuur D1.



Figuur D1: Weergave van de totstandkoming van de vier bestudeerde produktiesystemen.

In het verslag werd een voorbeeld gegeven voor een keten met $H=3$ en $J=2$ bij een produktiesysteem met produktie op order en verwaarloosbare doorlooptijd. In de volgende paragrafen worden de andere drie produktiesystemen achtereenvolgens in de vorm geschreven van de vergelijkingen D1 en D2, waarbij eveneens geldt dat $H=3$ en $J=2$.

2. Produktie op order en een doorlooptijd van een periode

De produktiebeslissing voor dit systeem is:

$$f_1(k+1) = d(k+1) - f_5(k)$$

De toestand wordt als volgt gedefinieerd:

$$\underline{x}(k) = \begin{pmatrix} I(k) \\ x_{c1}(k) \\ x_{c2}(k) \\ x_{c3}(k) \\ f_3(k) \\ f_4(k) \\ x_{r1}(k) \\ x_{r2}(k) \\ f_5(k-1) \end{pmatrix}$$

De dimensie van de toestand is $H+J+4$. In dit voorbeeld geldt $H=3$ en $J=2$, dus is de dimensie 9.

Als aan de voorwaarde dat $f_i(k) > 0$ wordt voldaan, gelden de vergelijkingen D1 en D2. Daarbij heeft dan de systeemmatrix A deze vorm:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_r(2) & g_r(1) & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_c(3) & g_c(2) & g_c(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_r(2) & g_r(1) & 0 \end{pmatrix}$$

Voor B geldt:

$$B(\underline{x}(k)) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -\{g_c(3) \cdot x_2(k) + g_c(2) \cdot x_3(k) + g_c(1) \cdot x_4(k)\} \\ 0 & \{g_c(3) \cdot x_2(k) + g_c(2) \cdot x_3(k) + g_c(1) \cdot x_4(k)\} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

De stromenvector $\underline{y}(k)$ houdt dezelfde vorm, onafhankelijk van het gekozen produktiesysteem:

$$\underline{y}(k) = \begin{pmatrix} f_1(k) \\ I(k) \\ d(k) \\ f_2(k) \\ f_3(k) \\ f_4(k) \\ f_5(k) \end{pmatrix}$$

De matrix C heeft de volgende vorm:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_c(3) & g_c(2) & g_c(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_r(2) & g_r(1) & 0 \end{pmatrix}$$

Voor D geldt:

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Met de bovenstaande matrices en vectoren kan het systeemgedrag beschreven worden, mits de begin-toestand en het verloop van de inputs bekend zijn.

3. Productie op voorraad met verwaarloosbare doorlooptijd

Ook voor dit produktiesysteem kunnen de matrices uit de systeemvergelijking worden opgeschreven. De productiebeslissing is:

$$f_1(k+1) = N - I(k+1) - f_5(k+1)$$

Voor de toestandsvergelijking wordt de grootheid $i(k)$ gedefinieerd volgens:

$$i(k) = N - I(k)$$

Als aan de inmiddels bekende voorwaarde $f_i(k) > 0$ wordt voldaan, wordt de toestand gedefinieerd als:

$$\underline{x}(k) = \begin{pmatrix} i(k) \\ x_{c1}(k) \\ x_{c2}(k) \\ x_{c3}(k) \\ f_3(k) \\ f_4(k) \\ x_{r2}(k) \\ x_{r1}(k) \end{pmatrix}$$

De toestand heeft in het algemeen de dimensie $H+J+3$. Omdat in het voorbeeld geldt dat $H=3$ en $J=2$, heeft de bovenstaande toestand 8 elementen.

Voor A en B geldt:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_c(3) & g_c(2) & g_c(1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B(\underline{x}(k)) = \begin{pmatrix} 1 & & & & & & & 0 \\ 0 & & & & & & & 0 \\ 0 & & & & & & & 0 \\ 1 & & & & & & & 0 \\ 0 & -\{g_c(3) \cdot x_2(k) + g_c(2) \cdot x_3(k) + g_c(1) \cdot x_4(k)\} & & & & & & \\ 0 & \{g_c(3) \cdot x_2(k) + g_c(2) \cdot x_3(k) + g_c(1) \cdot x_4(k)\} & & & & & & \\ 0 & & & & & & & 0 \\ 0 & & & & & & & 0 \end{pmatrix}$$

Bij de vergelijking, waarmee uit de toestand $\underline{x}(k)$ de stromenvector $\underline{y}(k)$ wordt berekend, dient uit $i(k)$ de hoogte van de werkelijke voorraad te worden berekend. Dit betekent dat vergelijking D2 voor $\underline{y}(k)$ een iets ander uiterlijk krijgt:

$$\underline{y}(k) = C\underline{x}(k) + D\underline{u}(k) + \underline{n}$$

Hierin is \underline{n} een vector met daarin als tweede element de voorraadnorm N en verder alleen nullen:

$$\underline{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

De matrices C en D zien er als volgt uit:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_r(2) & -g_r(1) \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_c(3) & g_c(2) & g_c(1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_r(2) & g_r(1) \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

4. Productie op voorraad en een doorlooptijd van een periode

Evenals de voorgaande productiesystemen kan dit systeem beschreven worden in de inmiddels bekende vergelijkingen voor $\underline{x}(k)$ en $\underline{y}(k)$ (verg. A), mits aan de voorwaarde is voldaan dat $f_i(k) > 0$ voor alle k .

De productiebeslissing voor dit systeem luidt:

$$f_1(k+1) = N - I(k) - f_5(k)$$

De hierbij horende toestand telt $H+J+4$ elementen en wordt gedefinieerd als:

$$\underline{x}(k) = \begin{pmatrix} f_1(k) \\ i(k) \\ x_{c1}(k) \\ x_{c2}(k) \\ x_{c3}(k) \\ f_3(k) \\ f_4(k) \\ x_{r1}(k) \\ x_{r2}(k) \end{pmatrix}$$

Hierin is $i(k)$ wederom gedefinieerd als $N - I(k)$.

De systeemmatrix A wordt nu:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_r(2) & -g_r(1) \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_r(2) & -g_r(1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_c(3) & g_c(2) & g_c(1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Voor B geldt:

$$B(\underline{x}(k)) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -\{g_c(3) \cdot x_3(k) + g_c(2) \cdot x_4(k) + g_c(1) \cdot x_5(k)\} \\ 0 & \{g_c(3) \cdot x_3(k) + g_c(2) \cdot x_4(k) + g_c(1) \cdot x_5(k)\} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Ook hier wordt vergelijking D2 veranderd. Net als bij het andere systeem met productie op order geldt voor $y(k)$:

$$\underline{y}(k) = C\underline{x}(k) + D\underline{u}(k) + \underline{n}$$

Hierin is de vector n onveranderd ten opzichte van het systeem van productie op order met verwaarloosbare doorlooptijd.

De matrices C en D tot slot zien er als volgt uit:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_c(3) & g_c(2) & g_c(1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_r(2) & g_r(1) \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

5. Gebruikte literatuur

- [1] H. T. Nagle en C.L. Phillips: Digital Control System Analysis and Design, Prentice Hall, inc., 1990, Englewood Cliffs
- [2] R. Isermann: Digital Control Systems, Springer-Verlag, 1981, Berlijn/Heidelberg/New York

Appendix E:

Simulaties met verschillende produktiesystemen

1. Inleiding

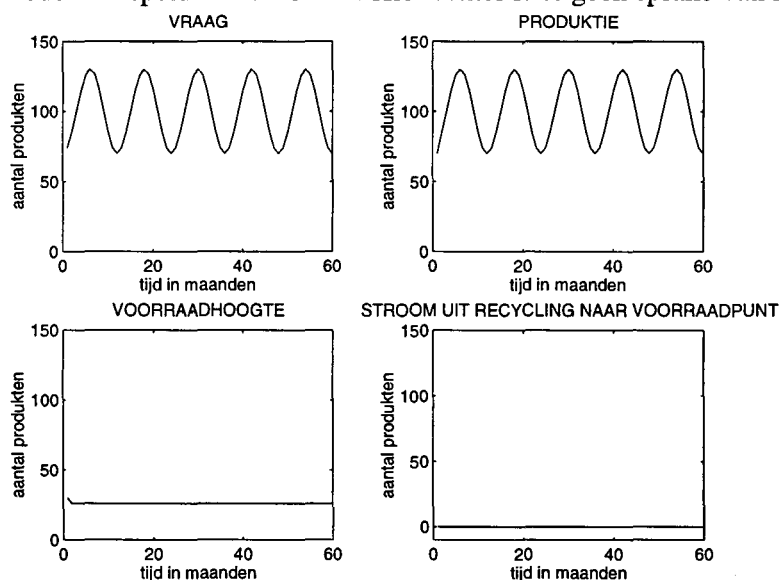
In het verslag worden vier produktiesystemen gepresenteerd. Voor alle vier systemen zijn simulaties uitgevoerd met gelijke inputs van vraag en recyclingpercentage. Omdat het overbodig is alle simulaties in beeld te brengen in het verslag, maar omdat het anderzijds toch interessant kan zijn te zien wat er met de andere produktiesystemen voor resultaten worden verkregen, zijn deze simulaties in deze bijlage opgenomen. Het betreft de simulaties zonder hergebruik (paragraaf 2), en de simulaties met een langzaam stijgend hergebruik (paragraaf 3).

2. Een situatie zonder hergebruik

In het verslag wordt het voorbeeld gegeven voor een JIT-systeem. De overige drie voorbeelden volgen hieronder:

produktie op order en een doorlooptijd van één periode

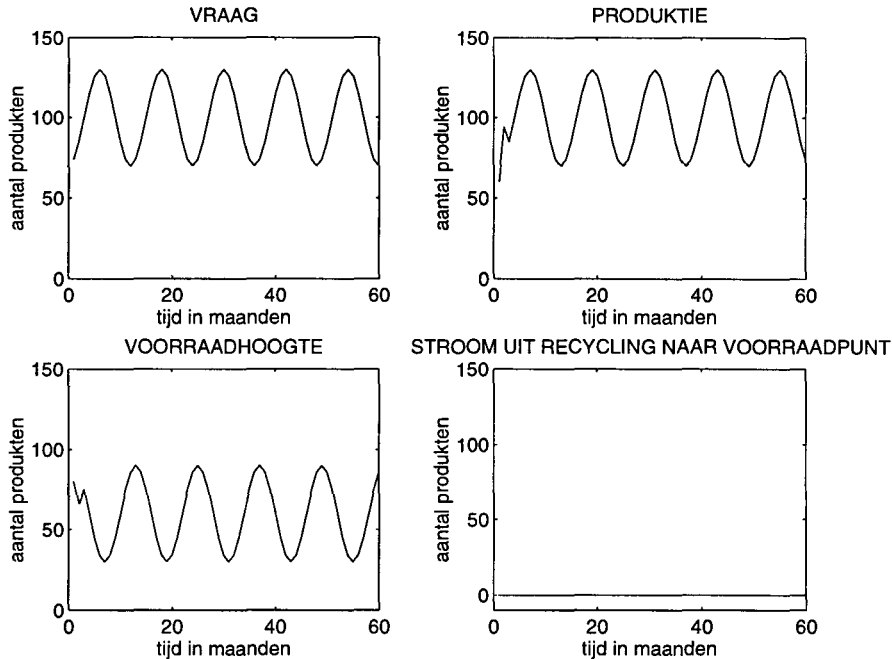
De resultaten van dit produktiesysteem lijken zonder recycling op die van het JIT-systeem. Omdat de vraag bekend is, is de voorraadhoogte controleerbaar. Er is geen onzekerheid. De doorlooptijd van een periode zal wel een onzekerheid met zich meebrengen als de stroom uit de recycling een periode voorspeld moet worden. Hier echter is er geen sprake van recycling.



Figuur E1: Weergave van de vraag, de produktie, de voorraadhoogte en de stroom uit de recycling naar het voorraadpunt. Op alle x-assen staat de tijd in maanden aangegeven; op de y-assen het aantal produkten per maand. Omdat α nul is, is er geen sprake van hergebruik.

Productie op voorraad en een verwaarloosbare doorlooptijd

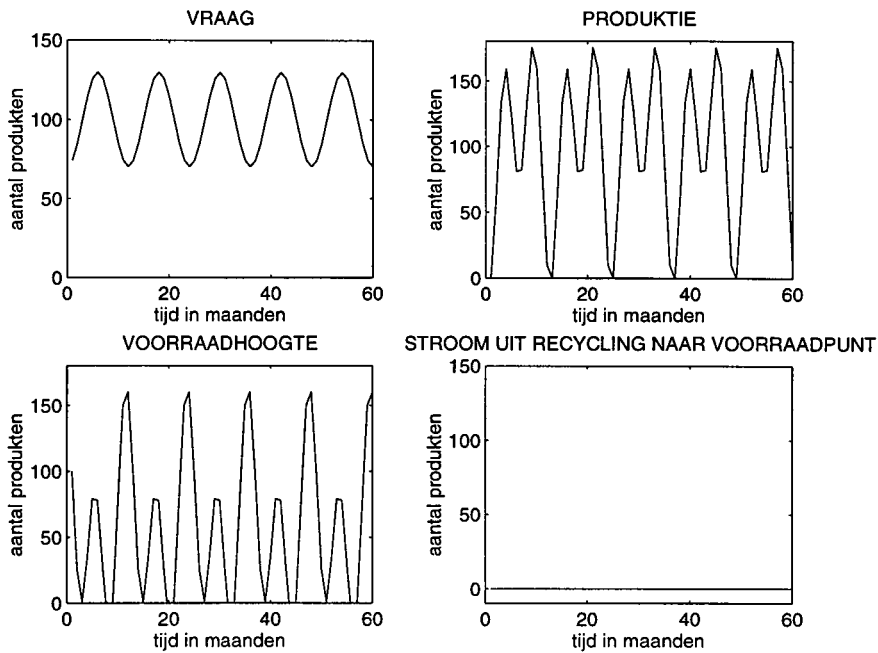
Een ander beeld ontstaat bij productie op voorraad. Bij een grotere vraag neemt het verschil tussen de voorraadnorm $N = 140$ en de werkelijke voorraadhoogte toe. De hoeveelheid productie moet dit verschil iedere periode compenseren. In Figuur E2 is te zien dat dit systeem onder de gesimuleerde omstandigheden, dus in een situatie zonder recycling, naar verwachting verloopt.



Figuur E2: Over een periode van vijf jaar worden de vraag, de productie, de voorraadhoogte en de stroom uit de recycling naar het voorraadopunt weergegeven. Op alle x-assen staat de tijd in maanden aangegeven; op de y-assen het aantal produkten per periode. Omdat α nul is, is er geen sprake van hergebruik.

Productie op voorraad en een doorlooptijd van een periode

In tegenstelling tot het systeem met productie op voorraad en een verwaarloosbare doorlooptijd doen zich bij dit productiesysteem problemen voor. De problemen komen voort uit de verhouding tussen periodeduur (de duur tussen twee beslissingen) en de doorlooptijd. Het systeem dat zo ontstaat is instabiel. Opvallend in figuur E3 zijn de grote schommelingen in de productie, van nul tot ongeveer 175, groter dus dan het maximum van de vraag. In praktijk zal dit systeem niet worden toegepast en moet er verfijndere methoden worden aangewend om een goed productiesysteem op te zetten gegeven de lange doorlooptijd.



Figuur 3: Over een periode van vijf jaar worden de vraag, de productie, de voorraadhoogte en de stroom uit de recycling naar het voorraadpunt weergegeven. Op alle x-assen staat de tijd in maanden aangegeven; op de y-assen het aantal producten per periode. Omdat α nul is, is er geen sprake van hergebruik.

Het is mogelijk om op de productie-vergelijking van het systeem met productie op voorraad en een doorlooptijd van een periode een Z-transformatie toe te passen. De productiebeslissing luidt: $f_1(k+1) = N - I(k) - f_5(k)$. De voorwaarde dat $f_i(k)$ groter of gelijk aan nul moet zijn wordt buiten beschouwing gelaten.

In de simulatie waarvan de resultaten in figuur E3 zijn weergegeven, geldt dat de recycling $f_5(k)$ nul is. In de onderstaande formules wordt de productie $f_i(k)$ vervangen door het symbool $p(k)$. De vraag wordt gerepresenteerd door $d(k)$. Er geldt:

$$\left. \begin{aligned} p(k+1) &= N - I(k) \\ I(k+1) &= I(k) + p(k) - d(k) \end{aligned} \right\} \Rightarrow p(k) - p(k-1) + p(k-2) = d(k-2) \quad \text{verg. E1}$$

Een Z-transformatie geeft het volgende verband tussen de getransformeerde grootheden $D(z)$ en $P(z)$:

$$P(z) = \frac{1}{z^2 - z + 1} \cdot D(z) \quad \text{verg. E2}$$

De bovenstaande vergelijking geeft aan dat er sprake is van een systeem dat op de rand zit van stabiliteit, omdat de polen van de noemer precies op de eenheidscircel van het complexe vlak vallen. De polen zijn $z_{1,2} = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} i\sqrt{3}$ en voor beide geldt dat $|z| = 1$.

In de simulaties is de vraag steeds een combinatie van een stapfunctie en een sinus. Omdat de sinus een tamelijk grote periode heeft en ten opzichte van de stap een kleinere amplitude, is het

in eerste instantie interessant om te kijken naar wat het systeem doet voor een stap-input. De Z-getransformeerde van een stapinput ter grootte van 100, is $100 \cdot z/(z-1)$. Deze uitdrukking voor $D(z)$ wordt ingevuld in vergelijking E2. Er wordt een breuksplitsing uitgevoerd om daarna gemakkelijk de uitdrukking voor $P(z)$ terug naar de tijd te kunnen transformeren.

$$P(z) = \frac{100 \cdot z}{(z-1)(z^2 - z + 1)} = 100 \cdot \left[\frac{z}{z-1} - \frac{z(z - \frac{1}{2})}{z^2 - z + 1} - \frac{\frac{1}{2}z}{z^2 - z + 1} \right] \quad \text{verg. E3}$$

Terugtransformeren naar het tijdsdomein levert voor $p(k)$ de uitdrukking.

$$p(k) = 100 \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{3}k\right) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}k\right) \right] \quad \text{verg. E4}$$

Bij narekening bleek deze bovenstaande formule dezelfde uitkomsten te geven als het model op een stapinput. In figuur 3, waar de input anders is, is nog wel duidelijk de periode van een half jaar (6 maanden) terug te zien, die ook in de uitdrukking voorkomt van $p(k)$.

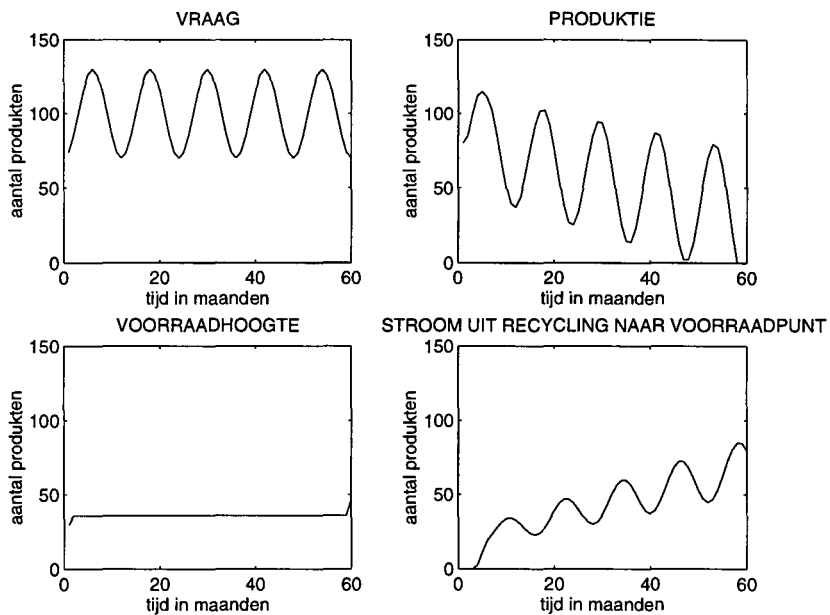
Uit het onaantrekkelijke gedrag van de produktie in het systeem met produktie op voorraad en een doorlooptijd van een periode mag worden opgemerkt dat een dergelijk systeem niet in aanmerking komt voor het beschrijven van de werkelijkheid. Bij de volgende beschouwingen wordt dit systeem buiten beschouwing gelaten.

3. Een situatie met langzaam stijgend hergebruik

In het verslag is de situatie besproken waarin α gedurende vijf jaar toenam van 20% aan het begin tot 70% aan het eind voor een systeem met produktie op order en een doorlooptijd van een periode. Hieronder volgen de twee simulaties voor de overige twee systemen (het systeem met produktie op voorraad met een doorlooptijd van een periode is afgefallen).

Produktie op order en een verwaarloosbare doorlooptijd

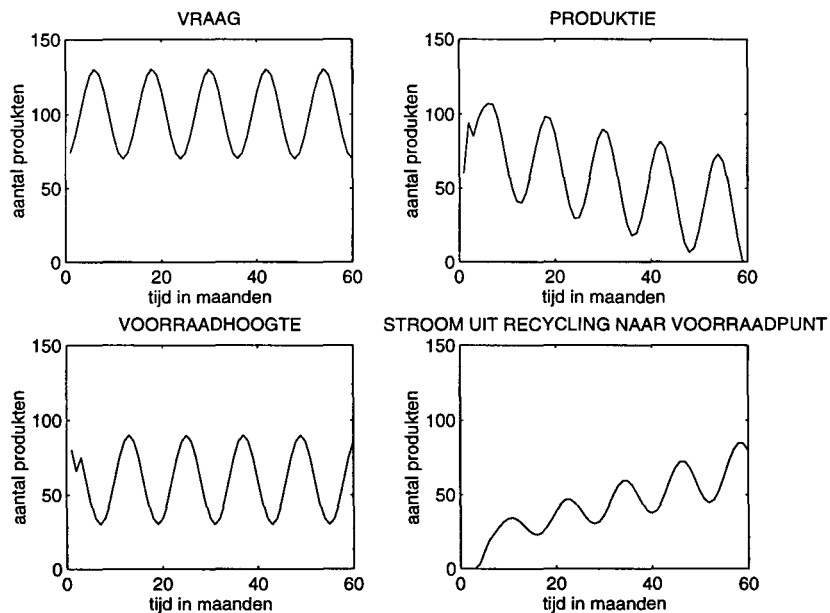
In figuur E4 is te zien dat het JIT-systeem de voorraad constant houdt, ook als het hergebruik toeneemt. Dit is een gevolg van het feit dat het JIT-systeem geen onzekerheid kent, in tegenstelling tot het systeem van produktie op order met een doorlooptijd van één periode, waar de stroom $f_5(k+1)$ voorspeld wordt door te kijken naar $f_5(k)$. Uiteraard zal bij het toenemen van de stroom uit de recycling de hoeveelheid te produceren goederen langzaam dalen. Ook deze trend is duidelijk aanwezig in figuur 4.



Figuur 4: Gedurende vijf jaar neemt het recyclingpercentage jaarlijks met 10% toe van 20% tot 70%. Op de horizontale assen is de tijd in maanden weergegeven. Op de verticale assen steeds het aantal producten.

Productie op voorraad met een verwaarloosbare doorlooptijd

Bij deze simulatie vertoont de voorraad hetzelfde gedrag als in de situatie zonder hergebruik. Weliswaar schommelt de voorraadhoogte, maar de schommelingen blijven binnen redelijke grenzen en zijn periodiek. De producent haalt uit de schommelingen de informatie, die bepaalt hoeveel hij zal produceren. De productiehoeveelheid daalt langzaam als gevolg van een groter hergebruik.



Figuur 5: Gedurende vijf jaar neemt het recyclingpercentage jaarlijks met 10% toe van 20% tot 70%. Op de horizontale assen is de tijd in maanden weergegeven. Op de verticale assen steeds het aantal producten.

4. Gebruikte literatuur

- [1] H.T. Nagle en C.L. Phillips: Digital Control Analysis and Design, Prentice Hall, inc., 1990, Englewood Cliffs
- [2] E.A. Silver, R. Peterson: Decision systems for inventory management and production planning, John Wiley & Sons, 1985, New York/Chichester
- [3] J.W.M. Bertrand, J.C. Wortmann, J. Wijngaard: Produktiebeheersing en material management, Stenfert Kroese Uitgevers, 1990, Leiden/Antwerpen

Appendix F:

Een methode voor optimalisatie met hiërarchie

1. Inleiding

In de hoofdstukken 6 en 8 zijn modellen gemaakt om het dynamisch gedrag van een produkt-procesketen te beschrijven. Deze beschrijvingen bieden een beeld van wat er gebeurt in de keten, en maken het mogelijk om de gevolgen van bepaalde beslissingen in te schatten, zoals gedaan werd in de simulaties van hoofdstuk 7 en hoofdstuk 9. Een interessante vraag bij deze simulaties luidt: wat zou de producent moeten doen met het percentage hergebruik om de totale ketenkosten zo laag mogelijk te maken? Ook de overheid heeft een soortgelijk optimalisatieprobleem: met welk storttarief kan de totale milieuschade worden geminimaliseerd? Deze vragen blijven in dit verslag onbeantwoord, maar er wordt in dit hoofdstuk wel een raamwerk geboden waarmee, gegeven de hiërarchie van de overheid en de producent, en gegeven het feit dat beide een ander criterium hebben, een optimalisatieprocedure plaats kan vinden. In paragraaf 2 wordt stilgestaan bij de hiërarchie in de optimalisatie en komen de relaties tussen de overheid en producent, hun criteria en hun inputs aan bod. Het optimalisatieprobleem wordt geïdentificeerd als een bekend probleem uit de spel-theorie, genaamd het Stackelberg-probleem. De Stackelbergstrategie, die dit probleem oplost, wordt in paragraaf 3 eerst beschreven voor een statisch probleem. Daarna vindt in paragraaf 4 de voor het ketenmodel benodigde uitbreiding plaats met discrete tijd.

2. De hiërarchie tussen de overheid en de keten

In hoofdstuk 5 werd stilgestaan bij de actoren en belanghebbenden binnen de keten. In de elementaire keten is het de producent die de ketenverantwoordelijkheid draagt en probeert om de gedurende K periodes gemaakte totale kosten binnen de keten te minimaliseren. In hoofdstuk 8 werd het criterium van de producent als volgt berekend uit de ketenoutput $TK(k)$ (de totale kosten in periode k):

$$J_1(\underline{y}(k), \alpha(k), s) = \sum_{k=1}^K TK(k)$$

De overheid heeft oog voor andere belangen en streeft ernaar de totale milieuschade gedurende K periodes zo laag mogelijk te maken. In hoofdstuk 8 werd dat als volgt genoteerd:

$$J_2(\underline{y}(k), \alpha(k)) = \sum_{k=1}^K TMS(k)$$

Omdat de overheid niet de vrijheid heeft om het storttarief s iedere maand te veranderen wordt s constant verondersteld binnen de K perioden. Hierbij is het opvallend dat deze input van de overheid niet voorkomt in het eigen criterium. Dat betekent in praktijk dat het storttarief alleen het gedrag van de producent zal beïnvloeden. Dit gedrag bepaalt echter wel de totale milieuschade en daarmee J_2 . De constatering in hoofdstuk 5 dat de overheid door gebruik te maken van belastingen (zoals het storttarief) probeert de keten tot een gewenst gedrag te manipuleren komt dus ook wiskundig tot uiting in de criteria van de producent en de overheid.

Uiteraard geldt tussen deze twee beslissers een zekere hiërarchie. Het is de overheid die met het storttarief weliswaar niet de vrijheid van de producent aantast, maar de producent kan niet om dit storttarief heen. Dit storttarief is een gegeven voor de producent. Op grond hiervan, en op grond van andere gegevens, zoals de vraag, zal de producent proberen zodanig $\alpha(k)$ te kiezen, dat J_1 wordt geminimaliseerd. Het is echter de overheid, die als eerste kiest en daarmee de optimalisatie van de producent beïnvloedt.

Zojuist is al vermeld dat de overheid en de producent andere karakteristieke tijden kennen. Het spreekt voor zich dat de overheid niet maandelijks het storttarief verandert; het wordt eens in de zoveel tijd vastgesteld, bijvoorbeeld jaarlijks. Producenten echter werken vaak met een kortere tijdschaal bij het bijstellen van het recyclingpercentage. Dit kan maandelijks gebeuren. Dat betekent dat de producent bij het bepalen van een $\alpha_{opt}(k=1..K)$ die het criterium J_1 optimaliseert iedere maand een andere $\alpha(k)$ kan hebben, terwijl de overheid K perioden vooruit moet kijken. Voor de overheid is dit een beperking. Beide hebben zij vooraf geen kennis van hoe groot de vraag $d(k)$ zal zijn, en dienen ze daarom gebruik te maken van scenario's van het verloop van $d(k)$.

Uit het bovenstaande verhaal komt duidelijk de hiërarchie naar voren, en ontstaat een beeld van een soort spel met twee spelers met verschillende criteria. Dit concept is bekend uit de speltheorie, en het heet een Stackelbergprobleem. Het is genoemd naar H. von Stackelberg die dit probleem voor het eerst heeft beschreven in zijn boek 'Marktform und Gleichgewicht' (1934).

Wanneer voor de optimalisatie een periode van een jaar wordt gekozen (daarna mag de overheid weer het storttarief veranderen), dan begint het 'spel' als volgt: de overheid is de leider en kiest op grond van een voorspelling van de vraag, en met kennis van de keten, voor een storttarief dat het criterium J_2 minimaliseert. De producent kiest op grond van dezelfde voorspelling van de vraag en gegeven het storttarief vervolgens voor een traject van het recyclingpercentage dat het criterium J_1 minimaliseert. De producent kan het percentage in de loop van het jaar maandelijks bijstellen. De keuze van de overheid en de keuzen van de producent leiden aan het eind van het jaar tot een zekere combinatie J_1, J_2 .

3. Statische Stackelbergstrategieën

3.1 Een statisch voorbeeld

Een statisch voorbeeld [1] maakt het mogelijk om een eerste indruk te geven van een optimalisatieprocedure met een dergelijke hiërarchie. De producent en de overheid hebben in dit voorbeeld ieder de keuze uit drie discrete instellingen voor hun input. De producent kan kiezen tussen α_1, α_2 en α_3 , de overheid uit s_1, s_2 en s_3 . Zodra de overheid kiest voor de instelling s_i om daarmee criterium J_2 te optimaliseren, dan zal de producent zijn eigen criterium optimaliseren door te kiezen voor de α_i die het minimale resultaat voor J_1 geeft. Dit proces kan aanschouwelijk worden gemaakt met een matrix. De getallenparen in de cellen geven de waarden J_1, J_2 weer van die combinatie van inputs.

<i>de overheid</i> → <i>de producent</i>	s_1	s_2	s_3
α_1	3,3	3,4	4,4
α_2	4,3	2,0	3,1
α_3	4,5	1,5	4,4

Figuur 1: Een statisch bimatrix-spel.

Het minimum voor J_2 bevindt zich bij (α_2, s_2) . Als de overheid op grond van deze kennis echter zou kiezen voor s_2 , dan kan de producent zijn criterium minimaliseren door te kiezen voor α_3 . Dit pakt voor de overheid zeer ongunstig uit, want zo wordt de waarde van J_2 5 in plaats van de beoogde 0. Blijkbaar zijn voor de overheid niet alle matrixcellen bereikbaar, want als de overheid de keuze heeft gemaakt, dan kiest de producent altijd de voor hem meest gunstige matrixcel. De cellen die wel bereikbaar zijn, zijn de minima van J_1 per kolom. Dus bij de keuze voor s_1 hoort α_1 , bij s_2 hoort α_3 en bij s_3 hoort α_2 . De overheid zal daarom kiezen voor s_3 , want van de drie bereikbare cellen leidt deze keuze naar de voor de overheid gunstigste uitkomst. De oplossing luidt: $(J_1, J_2) = (3, 1)$.

3.2 Definitie van de Stackelbergstrategie zonder tijd

Op grond van de kennis over de relatie tussen de producent en de overheid en in analogie met het statische voorbeeld hierboven is het mogelijk om de Stackelbergoplossing in een algemeen formalisme weer te geven. Hierbij wordt eerst een statisch formalisme gegeven[2], dat later wordt uitgebreid naar een dynamisch formalisme.

Stel U_α en U_s zijn de verzamelingen die alle toegestane strategieën bevatten voor respectievelijk de producent (α) en de overheid (s). Op grond van eerdere aannamen geldt voor deze twee verzamelingen:

$$U_\alpha = \{\alpha \in \mathfrak{R} \mid 0 \leq \alpha \leq 1\} \quad \text{verg. F1}$$

$$U_s = \{s \in \mathfrak{R} \mid s \geq 0\} \quad \text{verg. F2}$$

Met \mathfrak{R} de verzameling van alle reële getallen.

De criteria in één periode, $TK(\underline{y}, \alpha, s)$ en $TMS(\underline{y}, \alpha)$ zijn twee afbeeldingen van respectievelijk $U_\alpha \times U_s$ en U_α naar \mathfrak{R} behorende bij een zekere \underline{y} .

Zoals in het voorbeeld al werd aangegeven is de overheid de leider en ze probeert $TMS(\underline{y}, \alpha)$ te minimaliseren door een geschikte keuze van s . De producent probeert op zijn beurt $TK(\underline{y}, \alpha, s)$ te minimaliseren door te kiezen voor een geschikte α .

Definitie van de Stackelbergoplossing:

Indien er een afbeelding $T: U_s \rightarrow U_\alpha$ bestaat, zodanig dat voor iedere vaste $s \in U_s$ en vaste \underline{y} geldt: $TK(\underline{y}, T(\underline{y}, s), s) \leq TK(\underline{y}, \alpha, s)$ voor alle $\alpha \in U_\alpha$, en indien er een $s^* \in U_s$ bestaat zodanig dat geldt: $TMS(\underline{y}, T(\underline{y}, s^*)) \leq TMS(\underline{y}, T(\underline{y}, s))$, dan wordt het paar $(\alpha^*, s^*) \in U_\alpha \times U_s$, met $\alpha^* = T(\underline{y}, s^*)$, een Stackelbergoplossing genoemd.

In de bovenstaande definitie van de Stackelbergoplossing wordt eerst de afbeelding T gedefinieerd. Dit is de procedure die, gegeven \underline{y} en s , een α berekent die voor de producent de totale kosten minimaliseert. Op deze manier ontstaat voor een vaste \underline{y} een verzameling van punten $(T(s), s)$ die bij elke keuze van s steeds via $\alpha = T(s)$ het minimum van de totale kosten oplevert. Deze verzameling wordt ook wel de rationele reactieverzameling U_{rr} genoemd. Een Stackelbergoplossing wordt gevonden door uit alle punten in de rationele reactieverzameling (nog steeds bij vaste \underline{y}) dat punt te kiezen dat bij invulling de laagste totale milieuschade oplevert, ofwel:

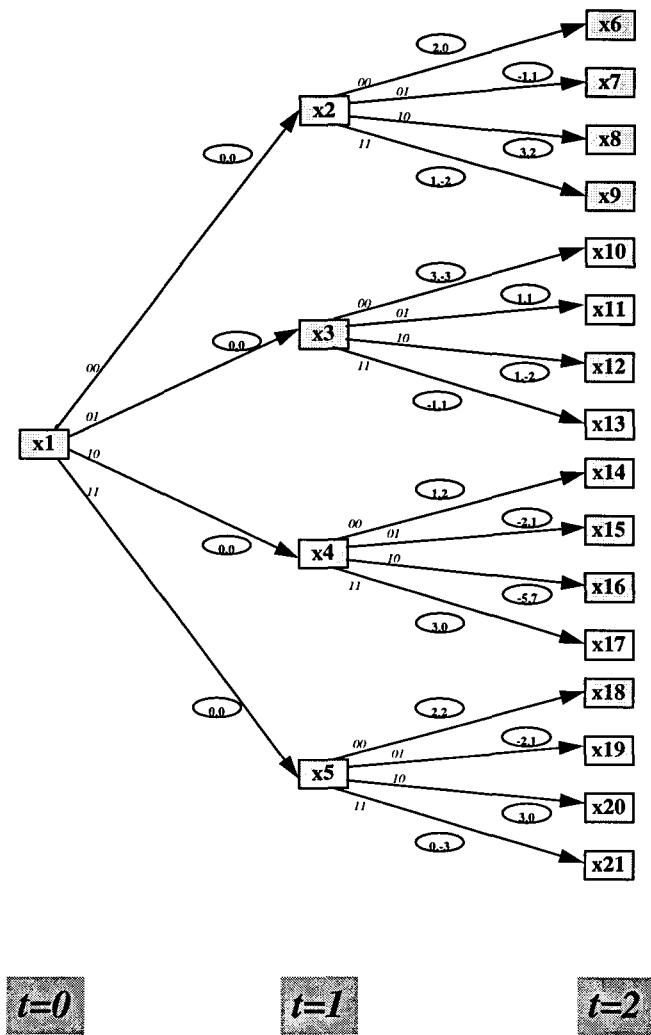
$$TMS(\underline{y}, \alpha^*) \leq TMS(\underline{y}, \alpha) \quad \forall (\alpha, s) \in U_{rr} \quad \text{verg. F3}$$

Al eerder was opgemerkt dat s ogenschijnlijk helemaal niet terugkomt in het criterium van de overheid. In de Stackelbergstrategie komt echter tot uiting dat s indirect, via de producent, wel degelijk van belang is voor het criterium van de overheid. Want kijkend naar vergelijking F3 mag niet vergeten worden dat (α, s) alleen een element van U_{rr} is als $\alpha = T(\underline{y}, s)$. Daarmee wordt TMS (zoals al tot uiting kwam in de definitie van de Stackelbergoplossing) een functie van \underline{y} en s .

4. Dynamische Stackelbergstrategieën in discrete tijd

4.1 Dynamisch voorbeeld

Evenals in de vorige paragraaf wordt allereerst een voorbeeld besproken. Met behulp van dit voorbeeld is het mogelijk om enkele opvallende eigenschappen van Stackelbergstrategieën duidelijk te maken. Daarvoor wordt in Figuur 2 een eenvoudige situatie weergegeven met de overheid en de producent, die ieder een eigen criterium hebben en die ieder één input tot hun beschikking hebben. Deze input (voor de producent $\alpha(k)$ en voor de overheid $s(k)$) kan bij beide slechts twee discrete waarden aannemen, die genoteerd worden als 0 en 1. In het voorbeeld wordt de overheid niet de beperking opgelegd dat er maar één s gekozen mag worden. Het voorbeeld duurt slechts twee perioden. De begingtoestand x_1 is gegeven. Iedere combinatie van inputs (00, 01, 10 of 11) (het eerste getal van ieder paar geeft de input van de producent, het tweede van de overheid) leidt een periode later tot een nieuwe toestand. In de tweede periode herhaalt dit proces zich. Er zijn op $t=2$ 16 verschillende toestanden bereikbaar. De gevolgen voor de criteria J_1 en J_2 worden weergegeven binnen de ovaaltjes. De overheid, met criterium J_2 kiest net als in het statisch voorbeeld steeds als eerste.



Figuur 2: Een discreet nonzero-sum spel met twee perioden en een eindige toestandsruimte.

Er zijn twee manieren om dit probleem aan te pakken, namelijk met de methode van voorwaartskoppeling en met de methode van terugkoppeling.

A Voorwaartskoppeling (open loop):

Voor de opeenvolgende combinaties van inputs wordt een bimatrix opgesteld, net als in het statische geval. In de rij van de overheidinputs en de kolom van de inputs van de producent staat als eerste getal de input op $t=0$, en als tweede getal de input op $t=1$.

<i>de overheid</i> → <i>de producent</i>	00	01	10	11
00	2,0	-1,1	3,-3	1,1
01	3,2	1,-2	1,-2	-1,1
10	1,2	-2,1	2,2	2,1
11	-5,7	3,0	3,0	0,-3

Figuur 3: Bimatrix bij het spel uit Figuur 2 voor de open-loop Stackelbergstrategie.

Geheel analoog aan het statische voorbeeld uit paragraaf 3.1 kan hier de Stackelbergoplossing worden bepaald. De Stackelbergoplossing is de combinatie $(01,10)$ die voor de criteria $(J1,J2) = (1,-2)$ oplevert. De eindtoestand is x_{12} .

B Terugwaartskoppeling (feedback)

De feedback Stackelbergoplossing wordt bepaald met dynamische programmering. Allereerst worden vier Stackelbergoplossingen bepaald voor de toestanden x_2, x_3, x_4, x_5 . Dit levert vier bimatrices.

$x=x_2$:

<i>de overheid</i> →	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>de producent</i>		
<i>0</i>	2,0	-1,1
<i>1</i>	3,2	1,-2

$x=x_3$:

<i>de overheid</i> →	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>de producent</i>		
<i>0</i>	3,-3	1,1
<i>1</i>	1,-2	-1,1

$x=x_4$:

<i>de overheid</i> →	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>de producent</i>		
<i>0</i>	1,2	-2,1
<i>1</i>	-5,7	3,0

$x=x_5$:

<i>de overheid</i> →	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>de producent</i>		
<i>0</i>	2,2	2,1
<i>1</i>	3,0	0,-3

Voor al deze vier toestanden kan de Stackelbergoplossing worden bepaald. Vervolgens kan voor de toestand x_1 een bimatrix worden opgesteld waarin in de matrixcel behorend bij de inputs die leiden tot toestand x_2 de Stackelbergoplossing voor x_2 komt te staan, en op de plaats van toestand x_3 de Stackelbergoplossing voor x_3 enz. Dit levert:

$x=x_1$:

<i>de overheid</i> →	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>de producent</i>		
<i>0</i>	2,0	1,-2
<i>1</i>	-2,1	0,-3

De Stackelbergoplossing in de bovenstaande matrix voor toestand x_1 is $(1,1)$, wat leidt tot x_5 . In x_5 is de Stackelbergoplossing gelijk aan $(1,1)$, wat het systeem in de toestand x_{21} brengt. De waarden van de criteria bij deze Stackelbergoplossing zijn dus $(J1,J2) = (0,-3)$.

C Vergelijking van de twee methoden:

Opmerkelijk is dat bij terugkoppeling de waarde van de criteria gunstiger uitkomt voor zowel de producent als de overheid. Voor de producent hangt dat samen met dit specifieke voorbeeld, maar als algemene stelling geldt dat voor de overheid als leider de methode met terugkoppeling altijd leidt tot een even gunstige of gunstiger waarde van zijn criterium dan met de methode van voorwaartskoppe-

ling. Er zijn meerdere redenen aan te wijzen die deze stelling verklaren [3]. De belangrijkste reden is het feit dat bij voorwaartskoppeling de producent al min of meer weet wat de overheid gaat doen, waardoor hij aan speelruimte wint om zijn eigen criterium te minimaliseren. Dit hoeft niet te leiden tot een lagere waarde van zijn eigen criterium (zie voorbeeld), maar het kan wel. Bij terugwaartskoppeling bepaalt de leider (de overheid) iedere stap opnieuw wat voor hem de meest gunstige oplossing levert, zoals gebruikelijk bij dynamische programmering. De producent moet hem wel volgen, anders schaadt hij zichzelf (Dat is immers een kenmerk van Stackelbergoplossingen: ze leveren de producent, gegeven de input van de overheid, een optimum op.).

4.2 Het discrete-tijdsysteem

Op grond van de inzichten uit de vorige paragraaf wordt dit systeem aangepakt met de methode van terugkoppeling (dynamische programmering). Het dynamisch gedrag uit het vorige hoofdstuk wordt beschreven volgens:

$$\underline{x}(k+1) = f(\underline{x}(k), d(k), \alpha(k)) \quad \text{verg. F4}$$

Er wordt in bovenstaande vergelijking gekozen voor de toestandsbeschrijving en niet voor de stromenvector $\underline{y}(k)$. Dit is geoorloofd, omdat zoals al eerder werd opgemerkt in hoofdstuk 8 de stromenvector wiskundig gezien eigenlijk een overbodige tussenstap is; de vector volgt uit $\underline{x}(k)$, $d(k)$ en $\alpha(k)$. Voor $\alpha(k)$ is natuurlijk nog steeds de voorwaarde $0 \leq \alpha(k) \leq 1$ van kracht.

Er geldt voor de criteria van de producent en de overheid:

$$J_1^{(K)} = \sum_{k=0}^K TK(\underline{x}(k), d(k), \alpha(k), s(k)) \quad \text{verg. F5}$$

$$J_2^{(K)} = \sum_{k=0}^K TMS(\underline{x}(k), d(k), \alpha(k)) \quad \text{verg. F6}$$

De methode van het dynamisch programmeren beschouwt het probleem op een tijdstip $k = n$ (met n tussen 0 en K), waarop een beslissing moet worden genomen. Voor de perioden later dan n heeft al een optimalisatie plaatsgevonden (analoog aan het voorbeeld van de terugwaartskoppeling voor het spel uit Figuur 2). Er wordt een grootheid $V_{n+1}^{(i)}(x)$ gedefinieerd als de waarde van criterium J_i voor de laatste $K-(n+1)$ perioden, waarop de feedback Stackelbergstrategie al is toegepast met de overheid als leider. De toestand bij het ingaan van periode $n+1$ is \underline{x} . Nu geldt:

$$V_n^{(1)} = V_{n+1}^{(1)}[f(\underline{x}, d, \alpha^*)] + TK_n(\underline{x}, d(n), \alpha^*(n), s^*(n)) \quad \text{verg. F7}$$

en:

$$V_n^{(2)} = \min_s \{V_{n+1}^{(2)}[f(\underline{x}, d, \alpha^*)] + TMS_n(\underline{x}(n), d(n), \alpha^*(n))\} \quad \text{verg. F8}$$

met daarin $\alpha^* = T(s^*)$ voor de laatste $K-(n+1)$ perioden.. De afbeelding $T_n(s(n))$ wordt gedefinieerd door onderstaande gelijkheid:

$$V_{n+1}^{(1)}[f(\underline{x}, d, T(s))] + TK_n(\underline{x}(n), d(n), T_n(s(n)), s(n))$$

$$= \min_{\alpha} \left\{ V_{n+1}^{(1)}[f(\underline{x}, d, \alpha)] + TK_n(\underline{x}(n), d(n), \alpha(n), s(n)) \right\}$$

verg. F9

In woorden betekent het bovenstaande dat de optimale beslissing voor de overheid volgens de Stackelbergstrategie in periode n wordt bepaald met een minimalisatie van de som van $V_{n+1}^{(2)} [f(\underline{x}, d, T(s))]$ en $TMS_n(\underline{x}(n), d(n), T_n(s(n)))$. De overheid weet immers dat voor iedere $s(n)$ die ze kiest, de producent zal reageren door een $\alpha(n) = T_n s(n)$ te kiezen zodanig, dat de som van $V_{n+1}^{(1)} [f(\underline{x}, d, \alpha)]$ en $TK_n(\underline{x}, d(n), \alpha(n), s(n))$ minimaal wordt.

Het optimalisatieprobleem van de twee verschillende criteria en de hiërarchie tussen overheid en producent is nu wiskundig geformuleerd. Het optimalisatieprobleem wordt aanmerkelijk eenvoudiger als K zo wordt gekozen dat $s(k)$ in die periode niet verandert; dan geldt $s(k)=s$. Dat betekent overigens niet dat $\alpha^*(k)=T_k(s)$ ook niet meer afhangt van k , omdat de afbeelding T_k iedere periode opnieuw dient te worden bepaald.

5. Gebruikte literatuur

- [1] C.I. Chen en Jose B. Cruz, jr.: Stackelberg Solution for Two-Person Games with Biased Information Patterns, IEEE Transactions on automatic control, vol ac-17, no.6, december 1972
- [2] M. Simaan en J.B. Cruz jr.: On the Stackelberg Strategy in Nonzero-Sum Games, Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 11, no.5, 1973
- [3] M. Simaan en J.B. Cruz jr.: Additional Aspects of the Stackelberg Strategy in Nonzero-Sum Games, Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 11, no. 6, 1973