

05348

1995

053

Serie Research Memoranda

ECONOMISCHE ANALYSE VAN MATERIAAL-PRODUKT
KETENS MET EEN TOEPASSING VOOR DAKGOTEN

P.P.A.A.H. Kandelaars

Research Memorandum 1995-53



**Economische analyse van materiaal-produkt
ketens met een toepassing voor dakgoten**

P.P.A.A.H. Kandelaars

**Ruimtelijke Economie
Vrije Universiteit
Amsterdam**

Economische analyse van materiaal-product ketens met een toepassing voor dakgoten

P.P.A.A.H. Kandelaars¹

Via een materiaal-product keten benadering worden interacties tussen materialen- en produktstromen voor een bepaalde dienst of service bekeken met als doel het verminderen van milieudruk door het inzetten van (economische) instrumenten. Deze benadering bekijkt de stromen economisch, fysiek en milieukundig waarbij rekening gehouden wordt met verschillende typen van substitutie en hergebruik. Er wordt een overzicht gegeven van verschillende manieren waarop materiaal- en produktstromen gemodelleerd kunnen worden, en twee toegepaste modellen worden besproken voor de materiaal-product keten van dakgoten.

Twee belangrijke milieuproblemen zijn uitputting van grondstoffen en milieuvervuiling. Deze problemen zijn het gevolg van het gebruik van materialen in de economie. Met een integrale analyse van materiaal- en produktstromen kan een duidelijk overzicht verkregen worden van problemen, knelpunten, mogelijke oplossingen en de gevolgen daarvan voor milieu en economie. Een dergelijke aanpak kan ertoe bijdragen dat het oplossen van één probleem niet ongemerkt andere problemen vergroot of creëert. Veranderingen kunnen bijvoorbeeld optreden door technologische vooruitgang of door de inzet van beleidsinstrumenten. Als basis voor een integrale benadering kunnen materiaal-product (M-P) ketens dienen. In M-P ketens worden de fysieke, economische en milieukundige kant van materialen en producten geïntegreerd en met het analyseren van deze ketens kunnen de gevolgen van economische instrumenten op het materiaal- en produktgebruik onderzocht worden.

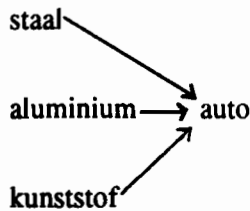
1. Integraal ketenbeheer en materiaal-product ketens

Integraal ketenbeheer vormt een van de pijlers van het Nederlandse overheidsbeleid ten aanzien van het milieu (VROM, 1993). Bij ketenbeheer worden de productie-, consumptie- en afvalfase tegelijkertijd bekeken. Deze aanpak biedt de overheid de mogelijkheid om instrumenten in te zetten op verschillende plaatsen in de M-P keten.

Bij het analyseren van ketens kan worden gekeken naar alle materialen waaruit een bepaald produkt samengesteld is. Deze benadering is een onderdeel van een levenscyclusanalyse (LCA), waarbij gekeken wordt naar alle milieu-aspecten van de totale levenscyclus van een bepaald produkt, inclusief het materiaalgebruik. Dit is aan te duiden als een *convergerende* keten omdat er meerdere materialen naar een produkt gaan. In figuur 1 is hiervan een

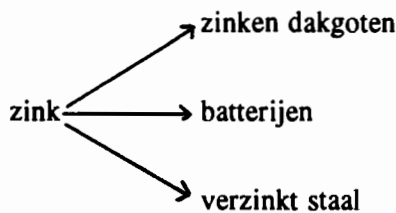
¹ De auteur is als onderzoeker in opleiding werkzaam bij de vakgroep Ruimtelijke Economie van de Vrije Universiteit in Amsterdam.

voorbeeld gegeven voor het gebruik van staal, aluminium en kunststoffen in auto's.



Figuur 1: Een convergerende keten waarbij drie materialen in één produkt gebruikt worden.

Een andere manier om het materiaalgebruik in ketens te bekijken is het maken van een materiaalbalans (MB). Hierbij staat één materiaal centraal dat voor verschillende produkten gebruikt wordt. Hierbij worden alle stromen van dit materiaal in een bepaald gebied en over een bepaalde tijdsperiode in kaart gebracht, bijvoorbeeld de cadmiumstroom in 1990 in Nederland. Ketens waarbij het materiaal centraal staat, zijn *divergent*, zoals in figuur 2 te zien is. Hier wordt een voorbeeld gegeven voor het gebruik van zink in dakgoten, batterijen en verzinkt staal.



Figuur 2: Een divergerende keten waarbij één materiaal voor drie produkten wordt gebruikt.

Bij deze twee benaderingen worden vier aspecten niet meegenomen: (i) de mogelijke substitutie van produkten of materialen; (ii) het hergebruik van materialen en produkten; (iii) de prijzen en kosten van materialen en produkten en hun interacties. Aan dit economische aspect wordt in de meeste LCA- en MB-studies geen aandacht geschonken terwijl de kosten en prijzen het gebruik, het hergebruik en de substitutie van zowel materialen als produkten sterk beïnvloeden. De vraag naar een bepaalde dienst wordt beïnvloed door de prijzen van produkten om aan deze dienst te voldoen terwijl de prijs van de produkten deels afhankelijk is van de prijzen van materialen. De materialen- en produktstromen kunnen beïnvloed worden door overheidsbeleid ten aanzien van de prijzen van materialen of produkten; en (iv) de veranderingen in de tijd, zoals technologische ontwikkelingen en prijsveranderingen. Dit dynamische aspect wordt al in enkele LCA- en MB-studies in beschouwing genomen (Moll, 1993, en Gilbert en Feenstra, 1992).

Deze vier aspecten zijn sterk gerelateerd: de economische en dynamische aspecten zijn gerelateerd aan de substitutie en het hergebruik van zowel materialen als produkten. Met behulp van materiaal-produkt (M-P) ketens kunnen deze aspecten worden meegenomen in de analyse.

De overheid kan ingrijpen in het economische proces door middel van (economische) instrumenten zoals heffingen, belastingen, subsidies en statiegeldsystemen. Naast de prijs van een produkt spelen voor een bepaalde produktkeuze ook andere factoren zoals technologie, smaak, modegevoeligheid, kwaliteit een rol. Naast de prijzen van de produkten zijn ook de technische mogelijkheden van het verzamelen, het scheiden en het hergebruiken van produkten en materialen van belang. Een glazen fles zal alleen dan ingezameld en hergebruikt worden als het én technisch mogelijk én economisch interessant is. De instrumenten die de overheid tot haar beschikking heeft kunnen met M-P ketens geanalyseerd worden.

2. M-P ketens: de koppeling van economische en milieukundige aspecten van materiaal- en produktstromen

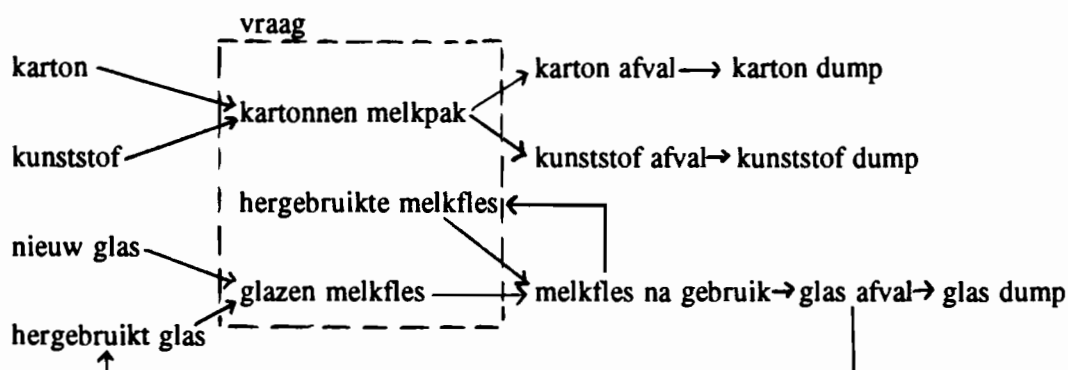
Het doel van M-P ketens is het bestuderen van schade aan het milieu door het gebruik van produkten of materialen en het analyseren van (economische) instrumenten om deze schade te verminderen. Een M-P keten bestaat uit een aantal gekoppelde materiaal- en produktstromen die een systeem vormen dat een bepaalde dienst of service kan verlenen (Opschoor, 1994).

Het economische aspect van M-P ketens komt tot uitdrukking in de keuzemogelijkheden van consumenten en producenten. Keuzes die onder andere gemaakt worden op basis van prijzen en kosten zijn: de keuze voor een bepaald produkt, de keuze voor materialen voor de produktie, het storten, verbranden of hergebruiken van gebruikte materialen en het gebruiken van nieuwe of hergebruikte materialen in het productieproces.

Als voorbeeld kan de M-P keten voor melkverpakkingen dienen. Voor deze dienst kan gekozen worden uit twee produkten, namelijk een glazen fles en een kartonnen pak, die onder andere gemaakt zijn van de materialen glas, karton en kunststof zoals te zien is in figuur 3. Deze benodigde materialen kunnen nieuw of hergebruikt² zijn. De glazen fles kan worden hergebruikt als produkt of het glas van de gebruikte fles kan worden hergebruikt. Een deel van het glas in de flessen wordt niet hergebruikt maar gestort of verbrand, omdat het niet apart ingezameld is. Het hergebruiken van produkten is één van de manieren om deze schade te verminderen. Hierbij kan een heffing op het storten of verbranden van het

² De term *hergebruik* wordt hier gebruikt voor zowel materialen als produkten. In het engels wordt het hergebruik van materialen veelal aangegeven door de term *recycling* en het hergebruik van produkten door de term *re-use*. Hier zal voor de duidelijkheid aangegeven worden of het hergebruik van materialen of produkten bedoeld wordt.

produkt een instrument zijn. De effecten van dergelijke instrumenten kan met een M-P keten geanalyseerd worden.



Figuur 3: M-P keten voor melkverpakkingen.

Bij M-P ketens worden de convergerende en divergerende ketens samengevoegd zoals in figuur 3 te zien is. Daarbij worden niet alle verbindingen tussen materialen en produkten meegenomen, maar een relevante deelverzameling. De criteria om een dergelijke deelverzameling vast te stellen kunnen gebaseerd zijn op milieukundige, economische en fysieke aspecten van bepaalde materialen of produkten. Voor het verminderen van het gebruik van een bepaald produkt kunnen substituten voor dat produkt en voor de materialen waaruit het produkt bestaat meegenomen worden als deze beïnvloedbaar zijn en als ze een relevante economische of milieukundige veranderingen teweeg kunnen brengen.

Om de produkten die een bepaalde dienst kunnen verlenen vergelijkbaar te maken is een eenheid nodig. Voor M-P ketens zijn functionele eenheden, die ook gebruikt worden voor LCA's, zoals het verpakken van een liter melk of het transport van een persoon over 100 kilometer zeer bruikbaar.

Voor een analyse van de milieu- en economische kenmerken van een M-P keten zijn de volgende gegevens van belang:

- (i) de productieprocessen van materialen en produkten, inclusief de benodigde productie-factoren;
- (ii) de vraag naar produkten en daarvan afgeleid de vraag naar materialen; en
- (iii) de kosten van productie, inzameling en hergebruik;

Het bekijken van M-P ketens met een fysieke (materiële), een milieukundige en een economische bril geeft een duidelijker beeld van de directe en de indirecte effecten van beleidsinstrumenten op deze drie gebieden. Een voorbeeld van een direct effect is de afname van het gebruik van een produkt als er een heffing op dat produkt wordt gezet. Een voorbeeld van een indirect effect is de toename van het gebruik van materiaal A als er op

materiaal B een heffing gezet wordt. Dit indirecte effect kan het beoogde milieu-effect volledig teniet doen of vervangen door een andersoortig (milieu) effect. Hergebruik van produkten en materialen kan met M-P ketens geïntegreerd worden onderzocht. De keuze tussen instrumenten ingezet op verschillende plaatsen in de keten kan afgewogen worden.

3. Hergebruik en substitutie

Twee belangrijke processen binnen M-P ketens die van belang zijn vanuit de doelstellingen van het verminderen of veranderen van het materiaalgebruik, zijn hergebruik en substitutie. Er zijn twee typen van *hergebruik* te onderscheiden, namelijk het hergebruik van materialen en van produkten. Bij het hergebruik van produkten wordt het eindproduct (het consumentengoed) opnieuw gebruikt zonder dat daarvoor een verandering aan of van het product nodig is. Dit is bijvoorbeeld het geval bij glazen melkflessen. Deze flessen worden na gebruik ingezameld (met behulp van een statiegeld-systeem) en schoongemaakt waarna ze weer opnieuw kunnen worden gebruikt. Twee complicaties zijn bij het hergebruiken van produkten van belang:

- (i) het inzamelen van de produkten; hoe en waar gebeurt dit, wie betaalt het en wat zijn de milieu-effecten?
- (ii) het schoonmaken van de produkten; welke reinigingsmiddelen worden gebruikt, hoeveel energie is nodig, wie betaalt het?

Bij het opnieuw gebruiken van materialen wordt het product na gebruik fysiek veranderd, bijvoorbeeld door demontage of omsmelten. Voordelen van het hergebruiken van materialen zijn dat minder afval ontstaat en dat minder materialen en energie gebruikt worden dan bij het gebruiken van nieuwe materialen. De inzameling, de verwerking, de afzet en de kwaliteit van het opnieuw gebruikte materiaal kunnen technische en economische problemen geven, zoals het niet kunnen scheiden van bepaalde materialen of het niet bestaan van een markt voor het gebruikte materiaal. Hergebruik heeft in een M-P keten tot gevolg dat de stroom van materialen en produkten niet slechts van materialen naar produkten loopt, maar dat kringlopen ontstaan (zie figuur 3).

Substitutie van produkten of materialen vormt een belangrijk onderdeel binnen M-P ketens. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen drie vormen van substitutie: (i) substitutie tussen produkten, (ii) substitutie tussen materialen, en (iii) substitutie van materialen door andere produktiefactoren zoals arbeid of kapitaal. Substitutie van product A door product B kan plaatsvinden als product B met dezelfde functie met een lagere prijs, een hogere kwaliteit of een beter imago op de markt komt. Substitutie van materiaal A door materiaal B kan optreden door een verandering in het productieproces of de technologie, maar ook door het goedkoper worden van één van de mogelijk te gebruiken materialen. Substitutie tussen

materialen en andere produktiefactoren kan plaatsvinden als er zuiniger met materialen omgegaan wordt door het inzetten van meer arbeid.

4. Economische modellen van M-P ketens

Om zowel de fysieke, milieukundige als de economische stromen in kaart te brengen, kan een model van de M-P keten gemaakt worden waarmee overheidsinstrumenten geanalyseerd kunnen worden. Modellen kunnen onder andere gebruikt worden (i) om de materiaal- en produktstromen te beschrijven, (ii) om materiaalgebruik en afvalstromen te voorspellen, (iii) om het gebruik van instrumenten te optimaliseren en (iv) om voor complexe systemen toekomst scenario's te onderzoeken. Een belangrijk onderscheid hierbij is dat tussen analytische en numerieke modellen, en tussen statische en dynamische modellen. In *analytische* modellen worden algemene relaties tussen bepaalde variabelen bekeken, terwijl bij *numerieke* modellen getallen en expliciete functies gebruikt worden. Simulatiemodellen zijn een categorie van numerieke modellen waarbij de getallen en functies nagebootst worden. *Statische* modellen richten zich op één tijdstip, één periode (b.v. een jaar) of een evenwichtssituatie terwijl in *dynamische* modellen de tijd een expliciete variabele is, waardoor tijdsaspecten geanalyseerd kunnen worden. In tabel 1 zijn een aantal mogelijke modellen gerelateerd aan studies die met deze typen modellen gedaan zijn.

Beschrijvende modellen geven de situatie op een bepaald moment of een bepaalde tijdsperiode weer. Een deel van de beschrijvende modellen richt zich op het uitvoeren van materiaal balansen voor bepaalde materialen of produkten in een bepaald gebied (Ayres en Norberg-Bohm, 1992a en 1992b). Een ander deel richt zich op het onderzoeken van knelpunten en mogelijkheden om deze op te lossen of op het inventariseren van de emissies en het afval (Fraanje e.a., 1992).

Voorspellende modellen zijn veelal gebaseerd op historische tijdreeksen waarbij de trend van het verleden geëxtrapoleerd wordt naar de toekomst. Het nut van M-P ketens is dat kan worden geanalyseerd wat de invloed is van veranderingen in één of meerdere fasen van de keten op de hele keten. Met voorspellende modellen op basis van volledig historische data kan slechts het verloop doorgetrokken worden onder de voorwaarde dat er geen veranderingen plaatsvinden. Modellen om te voorspellen maken veelal gebruik van elasticiteiten om toekomstige reacties op veranderingen te voorspellen (zie Mannaerts, 1993). Deze elasticiteiten gelden echter alleen voor marginale veranderingen en niet voor veranderingen in de trend.

Met *optimalisatiemodellen* kan getracht worden de kosten te minimaliseren voor het vervullen van de vraag. Hierbij kunnen tevens externe kosten, zoals milieuschade, meegenomen worden. Naast economische grootheden kunnen ook fysieke grootheden geoptimaliseerd worden, bijvoorbeeld het minimaliseren van de afvalstroom, het maximaliseren van het

percentage of de hoeveelheid opnieuw te gebruiken materiaal. Bij optimalisaties moet rekening gehouden worden met een aantal technische, materiële en economische voorwaarden. Voor de analyse van M-P ketens zijn zowel statische als dynamische optimalisatiemodellen bruikbaar om inzicht te krijgen in de fysieke en economische stromen binnen M-P ketens (Kandelaars en van den Bergh, 1996).

Gevolgen van veranderingen door bijvoorbeeld het inzetten van beleidsinstrumenten kunnen met *modellen voor scenario-analyse* doorgerekend worden (Gilbert en Feenstra, 1992). Deze modellen zijn zeer geschikt voor het analyseren van M-P ketens. Scenario's kunnen aangeven welke gevolgen bepaalde ontwikkelingen hebben en wat de doorwerking is van (financiële) instrumenten op de M-P keten. Ook kan het doorberekenen van kosten geanalyseerd worden zodat de gevolgen van veranderingen en instrumenten beter begrepen kunnen worden.

Tabel 1: Mogelijke modellen met gerelateerde studies.

doel van model		analytisch	numeriek
beschrijven	statisch		Ayres en Norberg-Bohm (1992a en 1992b), Voet v.d. e.a. (1994)
	dynamisch		
voorspellen	statisch		Huppes (1993)
	dynamisch		
optimaliseren	statisch	Wertz (1976), Lee (1984), Copeland (1991), Fullerton en Kinnaman (1995), Kandelaars en van den Bergh (1996)	Sullivan (1987), Lambert (1994), Starreveld en Van Ierland (1994), Weaver e.a. (1995)
	dynamisch	Morris (2 perioden) (1994)	
analyseren van scenario's	statisch		Porter (1978)
	dynamisch	Dinan (1993)	Olsthoorn e.a. (1991), Gilbert en Feenstra (1992), Mannaerts (1993), Opschoor (1994)

De bovenstaande modellen staan niet los van elkaar, maar kunnen ook samengevoegd worden. Vaak wordt een beschrijvend model als basis gebruikt voor de drie andere typen modellen. Een voorbeeld waarbij drie modellen geïntegreerd worden is een model waarbij op basis van een beschrijvend model voor verschillende scenario's de minimale kosten berekend worden. Ook is de beschrijving van beschikbare modellen niet volledig, maar slechts een indicatie van de mogelijkheden. Deze modellen kunnen zowel voor fysieke als wel economische analyses gebruikt worden. Ook meer economische georiënteerde modellen, zoals *evenwichtsmodellen* waarbij op de markt vraag en aanbod in evenwicht gebracht worden door de prijs, kunnen gebruikt worden (zie Deacon, 1995). Voor M-P ketens zijn zowel de markten voor producten, materialen en andere produktiefactoren zoals energie van belang.

5. Een toepassing: dakgoten

Als illustratie van een toepassing van een M-P keten analyse is gekozen voor dakgoten. Dakgoten maken deel uit van de bouwsector waar het overheidsbeleid zich naast het verminderen van het energiegebruik en kwaliteitsbevordering richt op integraal ketenbeheer (de Haas en Anink, 1993). De keuze voor dakgoten is gebaseerd op het gebruik van het zware metaal zink, dat twee milieuproblemen veroorzaakt: (i) hoge concentraties kunnen gewassen aantasten en organismen in het oppervlaktewater schaden; en (ii) de voorraad zink is eindig (Gorter, 1994). Met M-P ketens kunnen de effecten van (economische) instrumenten om het gebruik van zink te verminderen geanalyseerd worden.

Voor deze M-P keten zijn twee modellen gemaakt: een statisch optimalisatie model en een dynamisch simulatiemodel. Er is voor deze twee modellen gekozen om een inzicht te krijgen in het materiaal- en produktgebruik als het doel minimalisering van de kosten (optimalisatiemodel) en in het dynamische verloop van de vraag, de kosten en het materiaalgebruik (simulatiemodel). Hierna worden deze modellen en hun resultaten kort beschreven. Allereerst is voor beide modellen een functionele eenheid vastgesteld, namelijk een dakgoot van 12 meter. Consumenten kunnen kiezen tussen twee typen dakgoten: een pvc of een zinken dakgoot.

In het statische optimalisatiemodel worden voor verschillende scenario's de totale sociale kosten om aan het voldoen van de vraag naar dakgoten geminimaliseerd (12). Dit statische en numerieke model combineert dus een optimalisatie met scenario-analyse. De kosten bestaan uit productie-, hergebruik- en afvalkosten. De verdeling van de vraag naar dakgoten over de twee types dakgoten wordt bepaald door de kosten van de productie, het hergebruik en het afval. De zinken en pvc dakgoten worden niet hergebruikt als produkt, maar alleen als materiaal. Met behulp van scenario's zijn verschillende economische en fysieke/milieu resultaten verkregen zoals in tabel 2 te zien is.

Op basis van deze resultaten kan een bepaald instrument gekozen worden, afhankelijk van de prioriteiten van de overheid, de wensen van producenten en consumenten en de haalbaarheid.

Tabel 2: Presentatie van indicatoren onder verschillende scenario's van het statische optimalisatiemodel.

scenario's	basis	heffing op zinken dakgoten	meer hergebruik door statiegeld op materialen	heffing op zinken dakgoten en subsidie voor hergebruik	afvalheffing	huidige situatie
indicatoren						
kosten (in miljoenen guldens)	19.8	23.2	19.6	21.8	20.1	20.5
zinken dakgoten (in eenheden)	129000	0	129000	0	75600	103200
pvc dakgoten (in eenheden)	0	129000	0	129000	53400	25800
niet hergebruikt zink (in kilo's)	381840	0	190920	0	223776	305472
niet hergebruikt pvc (in kilo's)	0	468270	0	156090	193842	93654

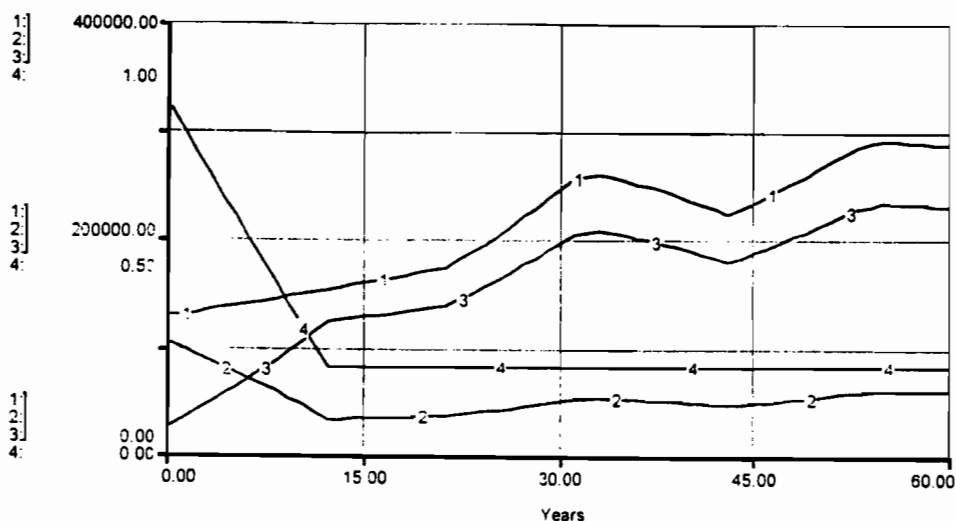
Bron: (Kandelaars en van den Bergh, 1996).

In het dynamische simulatiemodel worden verschillende scenario's geanalyseerd waarbij het verloop van zowel fysieke als economische grootheden over een tijdsperiode kan worden weergegeven. Met een simulatiemodel wordt de werkelijkheid nagebootst, hetgeen duidelijk kan maken welke richting en welke invloed bepaalde ontwikkelingen kunnen hebben. De resultaten van dit model zijn onder andere de verdeling van de vraag over de twee typen dakgoten (zie figuur 4), de hoeveelheid benodigde materialen en de kosten die gemaakt worden. Alle resultaten zijn weergegeven voor een periode van 60 jaar. Een gedetailleerde beschrijving van dit model staat in (Kandelaars e.a., 1995).

In figuur 4 geeft lijn 1 het aantal dakgoten dat gevraagd wordt weer. Deze vraag wordt verdeeld over zinken (lijn 2) en pvc dakgoten (lijn 3) afhankelijk van een verdelingsfactor (lijn 4).

Deze twee modellen van M-P ketens tonen aan dat analyses met daarin economische en fysieke grootheden inzicht kunnen geven in de materiaal- en produktstromen op een statische dan wel dynamische manier. In deze modellen staat milieukundig het verminderen van de

hoeveelheid nieuw zink die gebruikt wordt centraal, en economisch worden de keuzes van producenten en consumenten tegelijkertijd bekeken. Met deze benadering wordt de vermindering van het gebruik van nieuw zink en economische factoren in een keten bekeken.



Figuur 4: Verdeling van de vraag over zinken en pvc dakgoten bij het scenario waarbij een heffing op zinken dakgoten wordt gelegd.

6. Conclusie

M-P ketens beschrijven de stromen van materialen en producten en hun onderlinge samenhang met daarbij de economische grootheden zoals prijzen en kosten. Het doel van M-P ketens is het analyseren van instrumenten om milieuproblemen aan te pakken en daarmee het beleid te ondersteunen. De meerwaarde van M-P ketens ten opzichte van LCA's en MB's is de mogelijkheid om rekening te houden met hergebruik, substitutie, economische en dynamische aspecten. Enkele modellen voor materiaal- en produktstromen zijn besproken. Het gebruik van M-P ketens is geïllustreerd met een toepassing voor dakgoten, waarvoor een statisch optimalisatie - en een dynamisch simulatiemodel gemaakt zijn.

De modellen en de toepassing geven aan dat met de analyse van M-P ketens inzicht te verkrijgen is in fysieke en economische stromen en hoe deze stromen beïnvloed kunnen worden door beleidsinstrumenten. Dit inzicht wordt verkregen door elke fase apart te modelleren, zodat het mogelijk wordt om de gevolgen van een interventie te bekijken voor de verschillende fasen. M-P ketens zijn geschikt voor het analyseren van substitutie of hergebruik en eventuele overheidsinstrumenten hierop. De afbakening van de keten is lastig, omdat veranderingen in de keten ook daarbuiten gevolgen kunnen hebben. Het verhogen van de prijs van zink heeft een effect op dakgoten, maar ook op het verzinken van staal en het

gebruik daarvan. De modellen voor M-P ketens verschillen wat betreft doelstelling, databehoefte, complexiteit en realisme. Afhankelijk van het doel en de beschikbare data kan er voor een bepaald model gekozen worden, waarmee aanbevelingen voor overheidsbeleid gedaan kunnen worden. De uiteindelijke afweging voor de keuze van ingrijpen of van het inzetten van instrumenten wordt op sociaal of politiek niveau gemaakt, waarbij de analyse van de M-P keten een hulpmiddel bij het besluitvormingsproces kan zijn. Voor het analyseren van vermindering van het gebruik van zink over een bepaalde tijdsperiode is een dynamisch model nodig, waarbij een simulatiemodel in combinatie met scenario-analyse de aangewezen weg lijkt vanwege de onzekerheid van de toekomst.

Verder onderzoek zou zich moeten richten op het in kaart brengen van produkten en het verbeteren van de data, bijvoorbeeld door uitgebreidere gegevens over de productie, de recycling, het hergebruik, technologische vooruitgang, kosten en prijzen. Hiervoor is M-P keten analyse een zinvolle methode.

De auteur dankt dr Jeroen van den Bergh (Ruimtelijke economie) en drs Monique Jansen (Management Technologie, Technische Universiteit Eindhoven) voor het geven van suggesties bij het schrijven van dit artikel.

Literatuur

- Ayres, R.U. and V. Norberg-Bohm (1992a). Industrial metabolism of sulfur, working paper 92/58/EP, INSEAD Fontainebleau.
- Ayres, R.U. and V. Norberg-Bohm (1992b). Industrial metabolism of nitrogen, working paper 92/57/EP, INSEAD Fontainebleau.
- Copeland, B.R. (1991). International trade in waste products in the presence of illegal disposal, *Journal of environmental economics and management*, Vol. 20:143-162.
- Deacon, R.T. (1993). Taxation, depletion, and welfare: a simulation study of the U.S. petroleum resource, *Journal of environmental economics and management*, Vol. 24:159-187.
- Deacon, R.T. (1995). Assessing the relationship between government policy and deforestation, *Journal of environmental economics and management*, Vol. 28:1-18.
- Dinan, T.M. (1993). Economic efficiency effects of alternative policies for reducing waste disposal, *Journal of environmental economics and management*, Vol. 25:242-256.
- Fraanje, P., D. Anink and F. de Haas (1992). Vernieuwbare grondstoffen voor de bouw, Woon|Energie, Gouda.
- Fullerton, D. and T.C. Kinnaman (1995). Garbage, recycling, and illicit burning or dumping, *Journal of environmental economics and management*, Vol. 29:78-91.
- Gilbert, A.J. and J.F. Feenstra (1992). An indicator of sustainable development - diffusion

- of cadmium, Instituut voor Milieuvraagstukken, Amsterdam.
- Gorter, J. (1994). Zinkbalans voor Nederland 1990. Deel 1: de economische stromen, CBS-publication.
- Haas, F.A.C. de and D.A. Anink (1993). Bouwen binnen de milieugebruiksruimte, Woon|Energie, Gouda.
- Huppes, G. (1993). *Macro-environmental policy: principles and design*, Elsevier science publishers BV, Amsterdam.
- Kandelaars, P.P.A.A.H., J.B. Opschoor and J.C.J.M. van den Bergh (1995). A dynamic simulation model for Materials-Product-Chains, Tinbergen Institute discussion paper 95-61, Amsterdam.
- Kandelaars, P. and J. van den Bergh (1996). Materials-product chains: theory and an application to zinc and pvc gutters, *Environmental and resource economics*, forthcoming.
- Lambert, A.J.D. (1994). Ketenbeschrijving van produktiesystemen, *Milieu*, Vol. 1.
- Lee, D.W. (1984). The economics of enforcing pollution taxation, *Journal of environmental economics and management*, Vol. 11:147-160.
- Mannaerts, H. (1993). Het verbruik van non-energetische grondstoffen op lange termijn, CPB-onderzoeksmemorandum 109.
- Moll, H.C. (1993). *Energy counts and materials matter in models for sustainable development*, STYX publications, Groningen.
- Morris, G.E. and D.M. Holthausen (1994). The economics of household solid waste generation and disposal, *Journal of environmental economics and management*, Vol. 26:215-234.
- Olsthoorn, A.A., M. van Herwijnen and P.C. Koppert (1991). Ketenbeheer van vliegias met dynamische materiaalbalansen, *Milieu*, vol 1:7-11.
- Opschoor, J.B. (1994). Chain management in environmental policy: analytical and evaluative concepts, in: Opschoor, J.B. and R.K. Turner (eds) (1994), *Economic incentives and environmental policies*, Kluwer academic publishers, Dordrecht, p. 197-227.
- Porter, R.C. (1978). A social benefit-cost analysis of mandatory deposits on beverage containers, *Journal of environmental economics and management*, Vol. 5:351-375.
- Starreveld, P.F. and E.C. van Ierland (1994). Recycling of plastics: a material balance optimisation model, *Environmental and resource economics*, Vol. 4:251-264.
- Sullivan, A.M. (1987). Policy options for toxics disposal: laissez-faire, subsidization, and enforcement, *Journal of environmental economics and management*, Vol. 14:48-71.
- Voet, E. v.d. , L. van Egmond, R. Kleijn, G. Huppes (1994). Cadmium in the european community: a policy-oriented analysis, *Waste management and research*, nr.12:507-526.
- Voet, E. v.d., R. Huele, R. Kleijn, P. Mulder en L. v. Oers (1995). SFINX: gereedschap voor de analyse van stofstromen door economie en milieu van een gebied, *Milieu*, Vol. 3:134-140.

- Voet, E. v.d., R. Kleijn and G. Huppes (1995). Economic characteristics of chemicals as a basis for pollutants policy, *Ecological Economics*, Vol. 13, 11-26.
- VROM (1993). Nota produkt en milieu, Den Haag.
- Weaver, P.M., H.L. Gabel, J.M. Bloemhof-Ruwaard and L.N. van Wassenhove (1995). Optimising environmental product life cycles: a case study of the european pulp and paper sector, CMER working paper, INSEAD, Fontainebleau.
- Wertz, K.L. (1976). Economic factors influencing households' production of refuse, *Journal of environmental economics and management*, Vol. 2:263-272.